

فصل اول

تحليل عيب های متقارن

Symmetrical Fault Analysis

۱-۱ مقدمه

عيب هاي سيستم های قدرت ناشي از حرارت آني تحت شرايط بهره برداري معيوب تجهيزات و برخورد صاعقه بر خطوط انتقال رخ مي دهد که در اينصورت براي حفاظت کل سيستم قدرت توسط رله هاي حفاظتي و با فرمان به کلید هاي قدرت هر سه فاز سيستم قطع خواهد شد. بنابر اين براي انتخاب صحيح کلید هاي قدرت و رله هاي حفاظتي ناچاريم مقدار جريان عبوري در آنها را در مواقع قبل و بعد از عيب و مخصوصا عيب سه فاز بدانيم و اين دليل چنين بررسي هائي را نشان مي دهد .

بايستي بدانيم اکثر عيوبی که اتفاق مي افتد سه فاز نيستند بلکه اتصال کوتاه تکفاز به زمين و دو فاز به زمين و بهم نيز اتفاق مي افتد که عيب های آخر تحت عنوان عيب های نامتقارن مي باشد بعلت اهميت بررسي عيب های متقارن سه فاز در ابتدا به آن پرداخته مي شود.

يك شبکه الكتريكي از مجموعه ژنراتورهاي سنكرون، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و بارها تشكيل شده است. برای سادگی، در شرايط بهره برداري شبکه قدرت در حين وقوع عيب مي توان از تاثير بارها صرفنظر نمود. زیرا در اين حالت مقدار پايين افتادن ولتاژ (Voltage dip) ناشي از وقوع اتصال کوتاه بسيار کم است و بنابر اين مقدار جريان عبوري از بارها در مقايسه با جريان هاي عيب قابل صرفنظر کردن مي باشند.

ژنراتورهاي سنكرون در عيب های اتصال کوتاه داراي مشخصه هاي رفتاري متغير با زمان مي باشند. در حين اتصال کوتاه مقدار شار بر قطب در ارتباط با تغييرات گذراي سيم پيچ هاي ميدان و دمپر بصورت ديناميكي تغيير خواهند کرد. بنابر اين در چند سيکل اول مقدار راکتانس از مقادير پايين راکتانس زیرگذرا به

سمت مقادیر بالای راکتانس گذرا و سپس در حالت ماندگار به مقادیر بالای راکتانس سنکرون تغییر خواهد کرد.

بدلیل وجود زمان جرقه (Arc) در داخل کلیدهای قدرت در حین قطع سیستم قدرت لازم است تا در حین اتصال کوتاه مقدار راکتانس مناسبی از ژنراتور سنکرون موجود باشد.

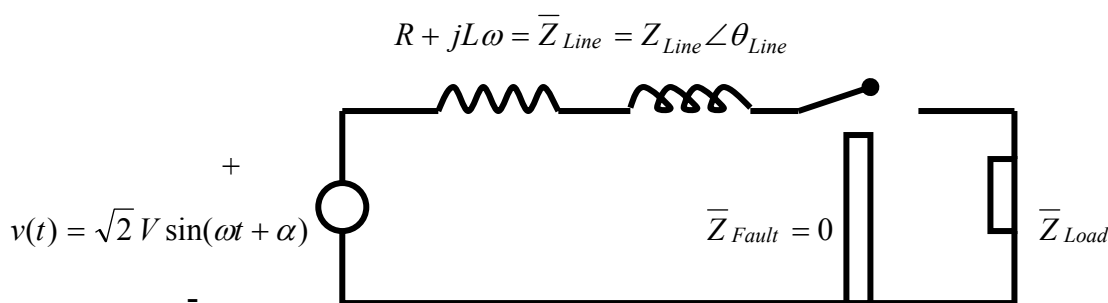
۲-۱ عملکرد قطع و وصل در مدار سری اهمی-سلفی

در این قسمت فرآیند اتصال کوتاه گذرا در یک خط انتقال کوتاه بررسی می شود. برای ساده سازی مساله فرضیات زیر انجام می شود:

الف- منبع ولتاژ (ژنراتور سنکرون) در هنگام اتصال کوتاه دارای عملکرد و خواص کلی یک ماشین سنکرون می باشد.

ب- با بی بار شدن خط انتقال عیب اتصال کوتاه نیز برطرف می شود.

پ- مقدار ظرفیت خازنی خط انتقال قابل صرف نظر بوده و خط انتقال به صورت ساده با یک امپدانس RL نشان داده می شود.



$$\bar{Z}_{Line} = R + jL\omega = Z \angle \theta_{Line} = \sqrt{R^2 + L^2 \omega^2} \angle \tan^{-1} \frac{L\omega}{R} \quad (1-1)$$

$$\bar{Z} = \bar{Z}_{Line} + \bar{Z}_{Fault} \quad (2-1)$$

فرض می شود که عیب اتصال کوتاه متقارن (سه فاز) در لحظه $t = 0$ رخ می دهد. پارامتر اختلاف فاز α مقدار موج ولتاژ لحظه ای را در حین وقوع اتصال کوتاه کنترل می کند. براساس تئوری مدارهای الکتریکی پس از وقوع اتصال کوتاه جریان مدار ترکیبی از دو بخش ماندگار و گذرا می باشد.

$$i(t) = i_s(t) + i_t(t) \quad s = \text{steady state} \quad t = \text{transient} \quad (3-1)$$

ازجریان بار در مقابل جریان عیب صرف نظر می شود.

$$i_s(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \quad \text{steady state current} \quad (4-1)$$

$$i_t(t) = i_t(0)e^{-\frac{R}{L}t} \quad \text{transient current} \quad (5-1)$$

$$i(0) = i_s(0) + i_t(0) = 0 \rightarrow i_t(t) = -i_s(0) \quad (6-1)$$

به عبارت دیگر در لحظه $t=0$ مدار اتصال کوتاه بسته می شود و در آن موقع هیچ جریانی عبور نمی کند. در این صورت $V(0) = \sqrt{2} V \sin \alpha$ بوده و مدار بصورت یک بار اهمی-سلفی با ثابت زمان $\frac{R}{L}$ تبدیل می شود. این نتیجه با استفاده از رابطه و معادله دیفرانسیل زیر حاصل می شود. پس در رژیم سینوسی داریم:

$$\begin{cases} i_s(t) = \frac{v(t)}{Z} = \frac{\sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha)}{Z \angle \theta} \rightarrow i_s(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) \\ L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = v(t) = \sqrt{2} V \sin(\omega t + \alpha) \Rightarrow i(t) = A \sin(\omega t + \alpha - \theta) \end{cases} \quad (7-1)$$

$$\begin{cases} i_t(t) = -i_s(0)e^{-\frac{R}{L}t} \\ i_s(0) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) \end{cases} \rightarrow i_t(t) = -\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (8-1)$$

$$i(t) = i_s(t) + i_t(t) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta) - \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t} \quad (9-1)$$

جریان کل شامل قسمت اول جریان مولفه سینوسی یا پاسخ ماندگار $(\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \theta))$ تحت عنوان

"جریان اتصال کوتاه متقارن" و قسمت دوم جریان مولفه DC یا پاسخ گذرا $(-\frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) e^{-\frac{R}{L}t})$

می باشد. این نتیجه از حل معادله دیفرانسیلی فوق در حالت رژیم سینوسی و گذرا نیز بدست می آید.

با صرف نظر از خطای نمائی در لحظات اولیه، جریان پیک اولیه $(t=0)$ برابر است با:

$$i_{mm} = i_{s,peak} + i_t(0) = \frac{\sqrt{2} V}{Z} - \frac{\sqrt{2} V}{Z} \sin(\alpha - \theta) \quad (10-1)$$

اگر مقدار مقاومت خط کوچک باشد (مدار تقریباً سلفی خالص باشد)، در آن صورت داریم:

$$\theta = 90 \rightarrow i_{mm} = \frac{\sqrt{2} V}{Z} (1 + \cos \alpha) = 2 \frac{\sqrt{2} V}{Z} \quad (11-1)$$

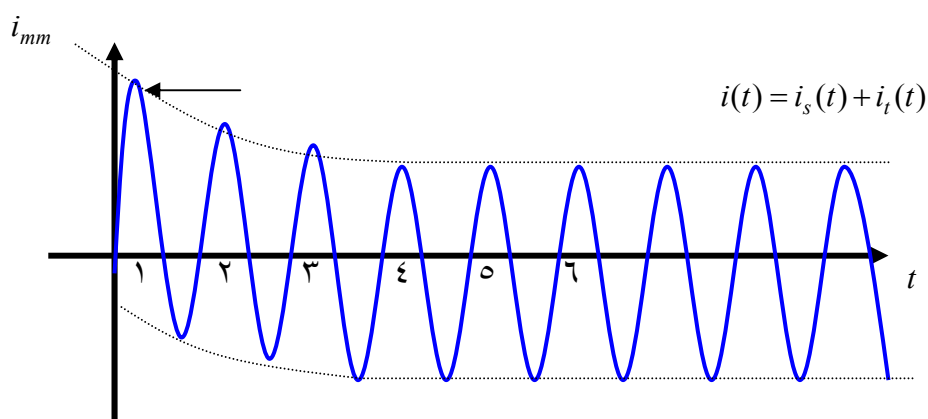
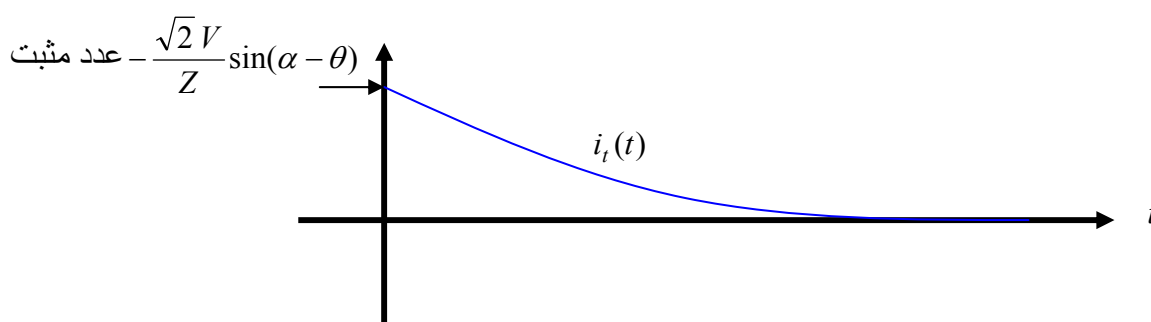
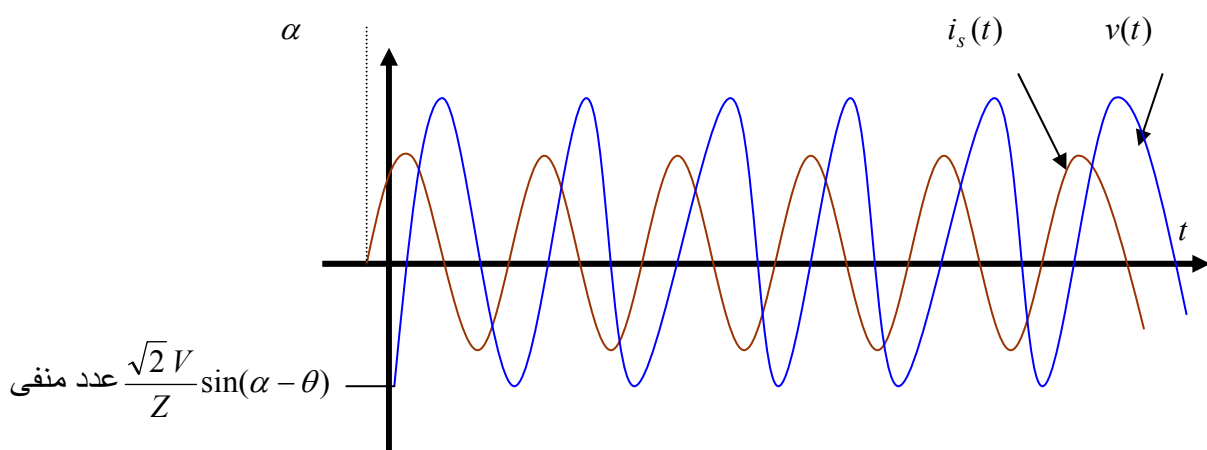
حداکثر جریان در $\alpha = 0$ اتفاق می افتد.

$$\alpha = 0 \rightarrow i_{mm} = 2 \frac{\sqrt{2} V}{Z} \quad (12-1)$$

جریان پیک اولیه i_{mm} معیاری برای انتخاب کلید قدرت می باشد. برای انتخاب کلیدهای قدرت مقدار جریان اتصال کوتاه لحظه ای i_{mm} به عنوان حداکثر مقدار جریان ممکن مهم است (جریان زیر گذرا). در

کلیدهای قدرت مدرن طراحی بصورتی است که پس از جریان چند پریود اول (۵ پریود یا کمتر) جریان قطع (Interrupt Current) در نظر گرفته می شود (جریان گذرا).

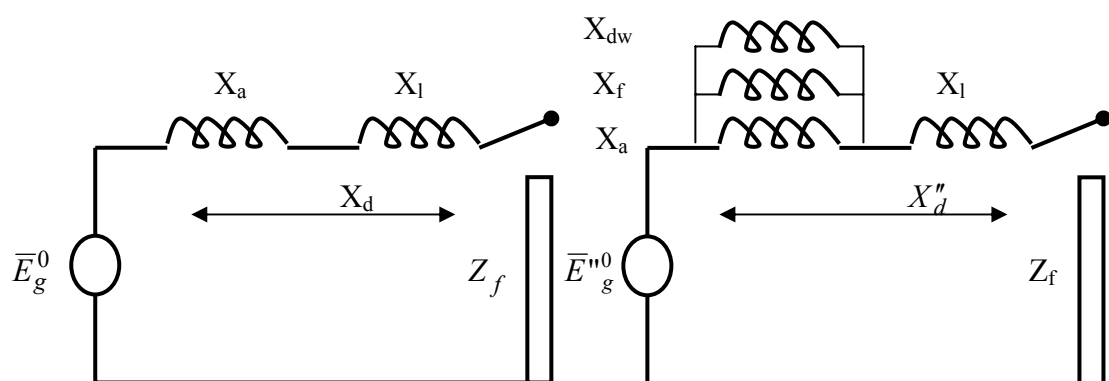
با کنار گذاشتن جریان پریودهای اول هنوز مقداری جریان مولفه DC وجود دارد و در کنار جریان قطع موجود می باشد. بدلیل مشکل بودن محاسبه مولفه DC، مخصوصا در شبکه های بزرگ و پیچیده، فقط جریان اتصال کوتاه متقارن سه فاز محاسبه می شود و سپس توسط يك ضریب مولفه DC لحاظ می شود.



i_{mm} = Maximum Momentary Current

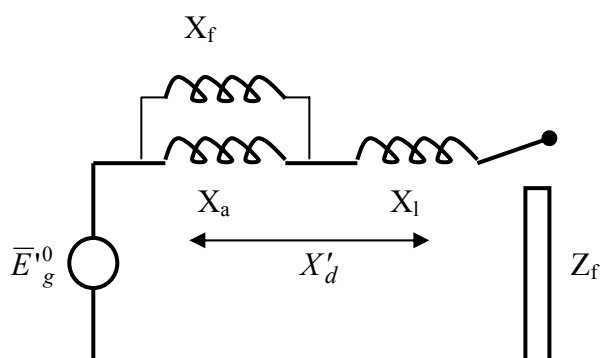
۳-۱ جریان اتصال کوتاه ماشين سنكرون بى بار

تحت شرایط اتصال کوتاه مداوم (ماندگار)، عكس العمل آرمیچر ژنراتور تولید شار ضد مغناطیس کنندگی می کند. تاثیر این عمل بوسیله راکتانس عكس العمل X_a سری و نیروی محرکه مغناطیسی (EMF) القایی مدل می شود. با ترکیب این راکتانس با راکتانس ناشی (Leakage Reactance) ماشین X_ℓ ، راکتانس سنكرون ماشین X_d (راکتانس سنكرون محور مستقیم در ماشین قطب برجسته) بدست می آید. مقاومت آرمیچر به خاطر كوچك بودن صرفنظر می شود. بنا براین مدل اتصال کوتاه ماندگار ماشین سنكرون برای هر وضعیت به صورت زیر است.



مدل اتصال کوتاه ماندگار

مدل تقریبی در پریود زیر گذرای اتصال کوتاه



مدل تقریبی در پریود گذرای اتصال کوتاه

$$X_d'' < X_d' < X_d \quad (۱۳-۱)$$

فرض می شود ژنراتور سنكرون در ابتدا بصورت مدار باز بوده و سپس بطور ناگهانی اتصال کوتاه می شود. ماشین سنكرون باعبوراز مراحل گذرا و زیر گذرا وارد مرحله ماندگار می شود، در این حالت کلید قدرت در چند سیكل اول از جریانهای زیاد قبل از رسیدن به شرایط ماندگار، صرفنظر می کند. بلافاصله پس

از برقراري شرایط اتصال کوتاه جریان مولفه DC در تمامی فازها ظاهر می شود که البته اندازه آنها با هم متفاوت می باشد زیرا برای هر فاز مقدار شکل موج ولتاژ در لحظه وقوع اتصال کوتاه فرق می کند. بر طبق شکلی که ترسیم خواهیم نمود جریان اتصال کوتاه ژنراتور در چند سیکل اولیه خیلی بیشتر از سیکل های بعدی می باشد و علت آن این می باشد که شار مغناطیسی در فاصله هوایی ماشین در لحظه وقوع اتصال کوتاه بسیار زیاد است و پس از عبور اتصال کوتاه از آرمیچر شار مذکور نیز کاهش می یابد. جریان های مولفه DC بصورت مجزا از هم بصورت تجربی در نظر گرفته می شوند و بنا براین برای حالت اتصال کوتاه فقط نیاز داریم تا به جریان های اتصال کوتاه سه فاز متقارن بپردازیم. بلافاصله پس وقوع اتصال کوتاه، جریان اتصال کوتاه متقارن بوسیله راکتانس نشتی ماشین محدود می شود زیرا شار فاصله هوایی نمی تواند سریعتر و بطور همزمان تغییر کند (براساس قضیه شار ثابت لینک شده است) در این صورت برای غلبه بر ضد مغناطیس کنندگی ناشی از جریان اتصال کوتاه آرمیچر جریان هایی از سیم پیچ های آرمیچر و میدان ظاهر شده و به شار اصلی کمک می کند.

سیم پیچی آرمیچر دارای اندوکتانس نشتی پایینی بوده و مقدار اندوکتانس نشتی سیم پیچ میدان بیشتر می باشد بنابراین ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر خیلی کمتر از ثابت زمانی سیم پیچی میدان خواهد بود بنابراین در بخش اولیه وقوع جریان اتصال کوتاه در سیم پیچی آرمیچر، سیم پیچی میدان و آرمیچر بصورت یک ترانسفورماتور که دارای جریان های القایی بوده و می توان تاثیر آنها را بصورت X_f (برای سیم پیچی میدان) و X_{dw} (برای سیم پیچی دمپر)، بصورت موازی با سیم پیچ آرمیچر X_a و نسبت تبدیل واحد در نظر گرفت. بدلیل اینکه ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر کمتر از سیم پیچی میدان است، بنابراین در بخش دوم وقوع اتصال کوتاه در سیم پیچی آرمیچر (شرایط گذرا) پس از طی شرایط فوق گذرا سیم پیچ دمپر X_{dw} بصورت مدار باز عمل نموده و پس از عبور از شرایط گذرا و رسیدن به حالت ماندگار جریان اتصال کوتاه، سیم پیچ میدان X_f نیز مدار باز خواهد شد.

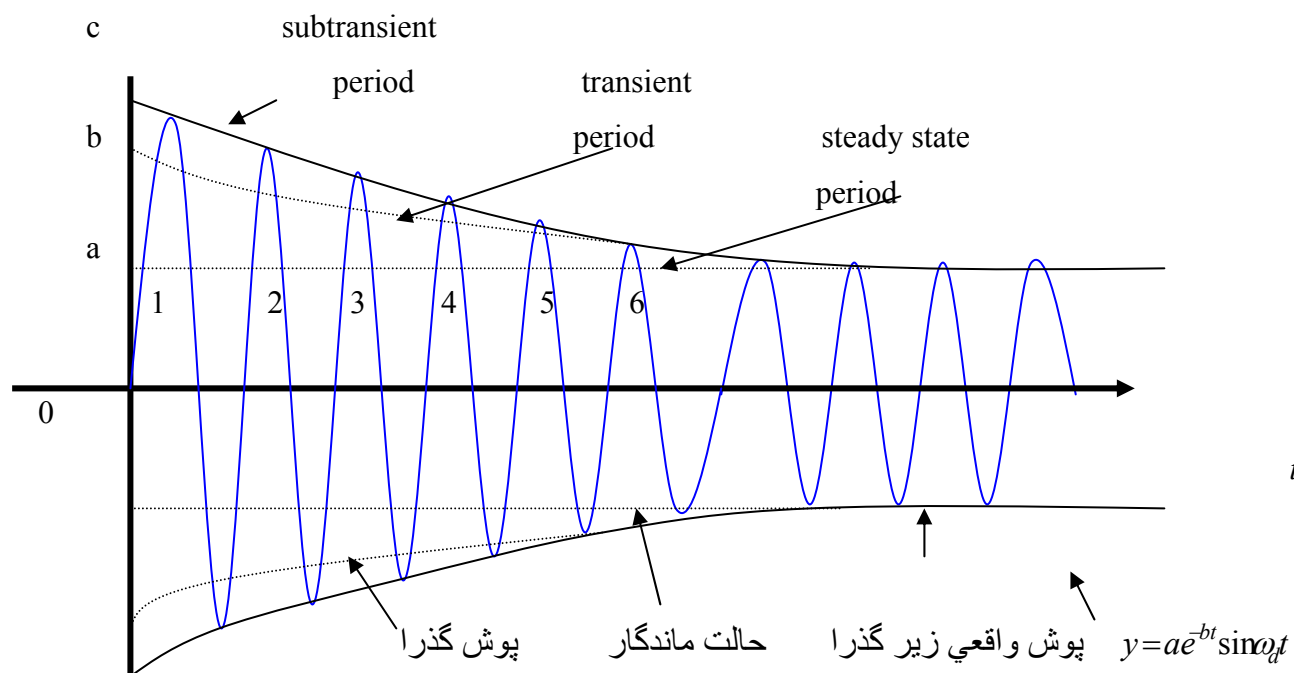
$$\begin{aligned} X_d'' &= (X_a \parallel X_f \parallel X_{dw}) + X_\ell && \text{subtransient reactance} \\ X_d' &= (X_a \parallel X_f) + X_\ell && \text{transient reactance} \\ X_d'' &= X_a + X_\ell && \text{synchronous reactance} \\ X_d'' &< X_d' < X_d \end{aligned} \quad (14-1)$$

بنابراین در این حالت ماشین سنکرون دارای راکتانس متغیر با زمان خواهد بود. هرگاه شکل موج جریان اتصال کوتاه ژنراتور سنکرون را پس از بین رفتن جریان مولفه DC مشاهده کنیم بصورت شکل زیر خواهد بود. لذا جریان اتصال کوتاه ماشین سنکرون به سه پریود تقسیم می شود.

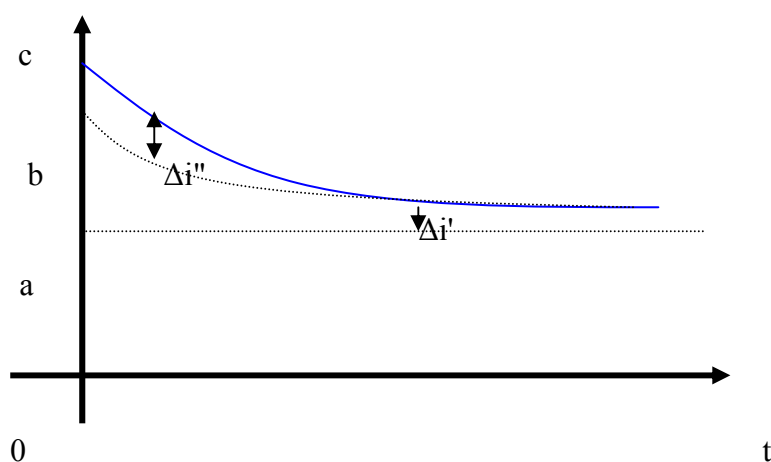
- پریود زیر گذرای اولیه: وقتی که جریان زیاد بوده و ماشین دارای راکتانس زیرگذرا باشد.

- پریود گذرای میانی: وقتی که ماشین دارای راکتانس گذرا باشد.

- پریود حالت ماندگار: ماشین دارای راکتانس سنکرون باشد.



جریانهای اتصال کوتاه متقارن در ماشین سنکرون



پوش جریان اتصال کوتاه متقارن سه فاز

اختلاف پوشهای گذرا و زیر گذرا توسط $\Delta i''$ (بادر نظر گرفتن جریان سیم پیچ آرمیچر) نشان داده می شود که با توجه به ثابت زمانی سیم پیچ آرمیچر به سرعت از بین می رود (به صورت نمایی). بطور مشابه $\Delta i'$ ها اختلاف بین پوشهای منحنی های ماندگار و گذرا می باشد که با توسط ثابت زمانی سیم پیچ میدان به سمت صفر می رود (بصورت منحنی نمایی).

$$I = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d}$$

Steady state current (rms)

$$I' = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d'}$$

Transient current (rms) excluding DC component

$$I'' = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{E_g^0}{X_d''}$$

Subtransient current (rms) excluding DC component X_d , X_d', X_d''

Direct axis synchronous, transient, sub transient reactance

$$\bar{E}_g^0$$

Per phase no load voltage (rms)

$$\Delta i'' = \Delta i''_0 e^{-\frac{t}{\tau_{dw}}}$$

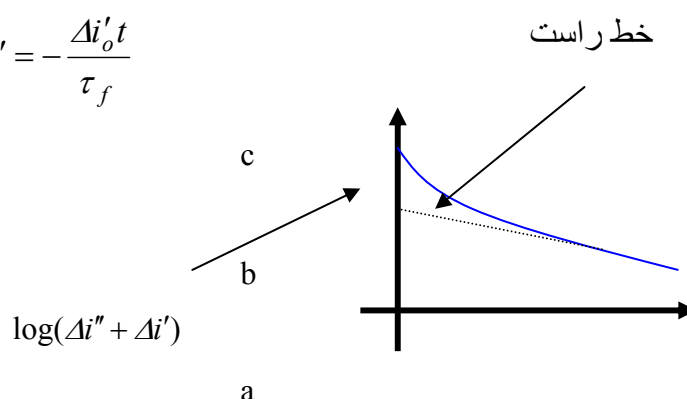
ثابت زمانی سیم پیچی آرمیچر

$$\Delta i' = \Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}}$$

ثابت زمانی سیم پیچی میدان

$$(\tau_{dw} \ll \tau_f) \rightarrow (t) \tau_{dw} \rightarrow (\Delta i'' \Rightarrow 0)$$

$$\log(\Delta i'' + \Delta i') \Big|_{t \gg \tau_{dw}} \approx \log \Delta i' = -\frac{\Delta i'_0 t}{\tau_f}$$



بنابراین برای زمان های $t \gg \tau_{dw}$ منحنی $\log(\Delta i'' + \Delta i')$ تبدیل به یک خط راست با شیب $-\Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}}$ می

شود با برون یابی این خط مستقیم در محور عمودی و در نقطه b که همان نقطه مورد نظر در منحنی جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن ژنراتور سنکرون می باشد، تلاقی پیدا می کند.

$$t = 0 \rightarrow \Delta i' \Big|_{t=0} = \Delta i'_0 e^{-\frac{t}{\tau_f}} \Big|_{t=0} = \Delta i'_0 = ab$$

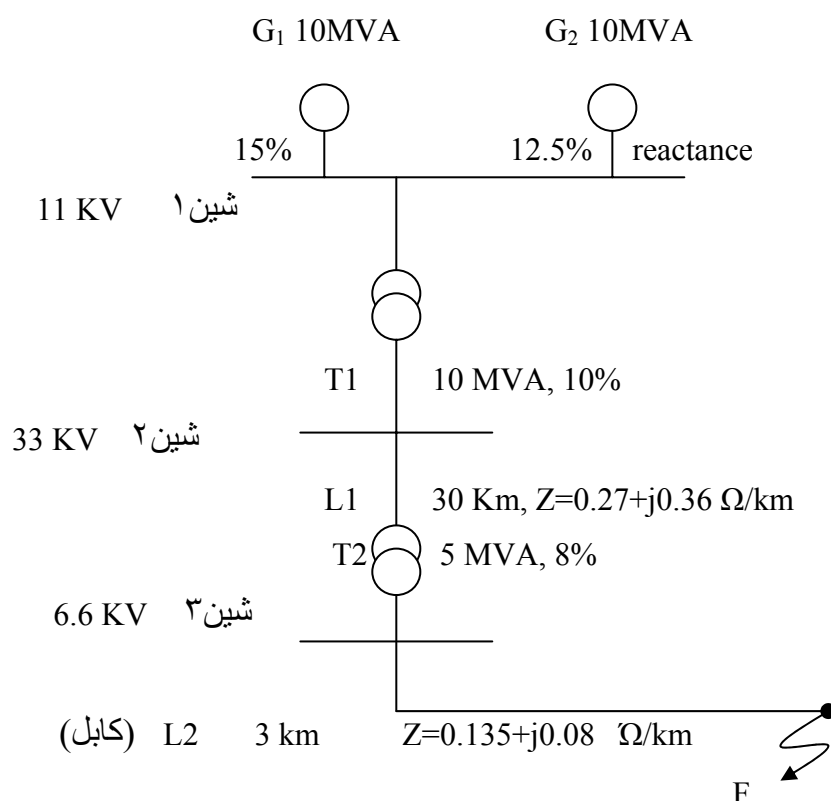
چون راکتانس ماشین ها علاوه بر مقدار تحریک به اشباع مغناطیسی نیز وابسته می باشد بنابراین بسته به نوع ماشین مقدار آنها در محدوده مشخصی قرار خواهد گرفت (جدول ۹، ۱ صفحه ۲۸۰ مرجع Nagrath).

موارد مهم:

- در حالت نرمال مقدار راکتانس زیرگذرای موتورها و ژنراتورهای سنکرون در مدارهای اتصال کوتاه برای محاسبه جریان لحظه ای استفاده می شود (محاسبه جریان زیرگذرا)
- در حالت قطع برای کلیدهای قدرت (به غیر آنها که به طور لحظه ای باز هستند) برای ژنراتورهای سنکرون از راکتانس زیر گذرا و برای موتور های سنکرون از راکتانس گذرا استفاده می شود (محاسبه جریان گذرا).
- در مطالعات پایداری نیز از راکتانس گذرا استفاده می شود.

حالت	راکتانس ژنراتور و موتور	شرایط محاسبه	راکتانس ژنراتور	راکتانس موتور
زیرگذرا	زیر گذرا	جریان لحظه ای	زیرگذرا	زیرگذرا
گذرا	گذرا	جریان قطع	زیرگذرا	گذرا
ماندگار	سنکرون	پایداری	گذرا	گذرا

مثال: در شبکه شعاعی زیر اتصال کوتاه متقارن سه فاز در نقطه F رخ داده است. جریان عیب و ولتاژ خط را در شین ۱۱ کیلو ولت تحت شرایط وقوع عیب محاسبه کنید. توان نامی مبنا برابر ۱۰۰ مگاوات آمپر انتخاب می شود.



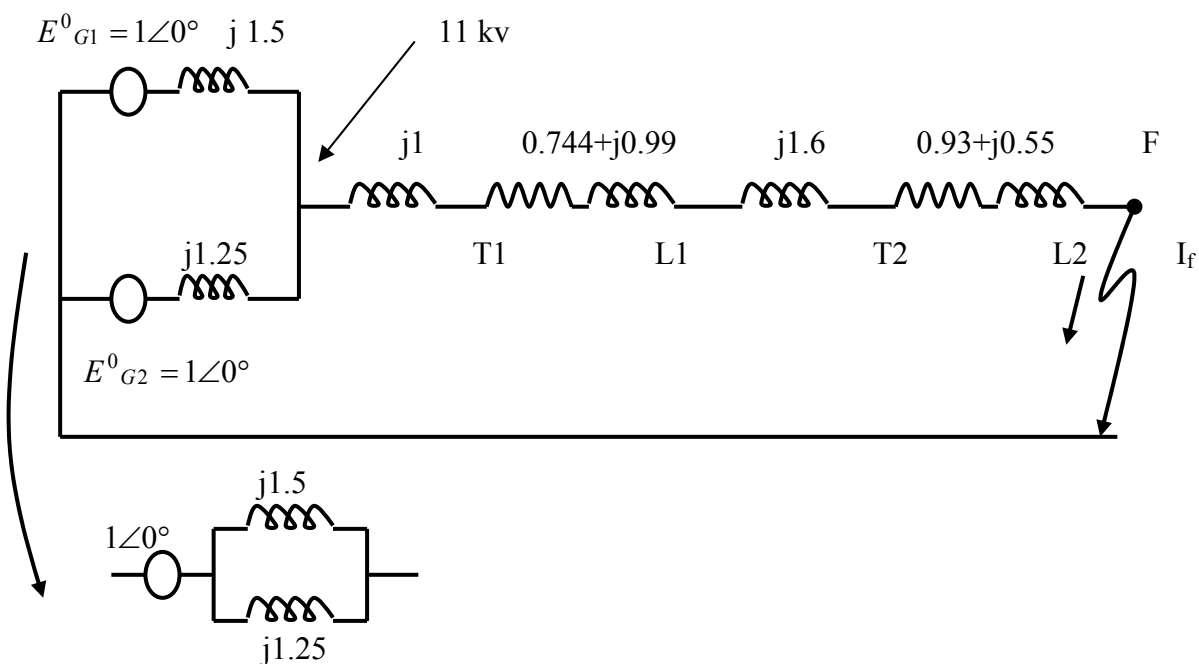
$$V_{b1} = 11 \text{ KV}, V_{b2} = 33 \text{ KV}, V_{b3} = 6.6 \text{ KV}$$

$$X_{G1} = j0.15 \times \frac{100 \text{ MVA}}{10 \text{ MVA}} = j1.5 \text{ pu} \quad X_{G2} = j0.125 \times \frac{100}{10} = j1.25 \text{ pu}$$

$$X_{T1} = j0.1 \times \frac{100}{10} = j1 \text{ pu} \quad X_{T2} = j0.08 \times \frac{100}{5} = j1.6 \text{ pu}$$

$$Z_{L1} = \frac{30 \times (0.27 + j0.36)}{(33\text{k})^2 / 100\text{M}} = 0.744 + j0.99 \text{ pu}$$

$$Z_{L2} = \frac{3 \times (0.135 + j0.08)}{(6.6\text{k})^2 / 100\text{M}} = 0.93 + j0.55 \text{ pu}$$



$$\bar{Z}_{total} = (j1.5 \parallel j1.25) + (j1) + (0.744 + j0.99) + (j1.6) + (0.93 + j0.55)$$

$$\rightarrow \bar{Z}_{total} = 1.647 + j4.82 = 5.1 \angle 70.8^\circ \text{ pu}$$

$$V_{b,3p} = \sqrt{3} V_{b,1p} \rightarrow V_{pu,L} = \frac{V_L}{V_{b,3p}} = \frac{\sqrt{3} V_p}{\sqrt{3} V_{b,1p}} = \frac{V_p}{V_{b,1p}} = V_{pu,1p}$$

$$I_{b,3p} = \frac{100 \text{ M}}{\sqrt{3} \times 6.6 \text{ K}} = 8750 \text{ A} = \frac{100 \text{ M}/3}{6.6 \text{ K}/\sqrt{3}} = I_{b,1p}$$

$$I_{b,3p} = I_{b,1p} \Rightarrow \bar{I}_{pu,L} = \bar{I}_{pu,1p} \Rightarrow \bar{I}_{pu} = \frac{S_{pu,3p}}{V_{pu,L}} = \frac{S_{pu,1p}}{V_{pu,1p}}$$

$$\bar{I}_F = \frac{1 \angle 0^\circ}{5.1 \angle 70.8^\circ} = 0.196 \angle -70.8^\circ \text{ pu}$$

$$I_F = 0.196 \times 8750 = 1715 \text{ A}$$

$$\bar{Z}_{11KV-F} = (j1) + (0.744 + j0.99) + (j1.6) + (0.93 + j0.55) = 1.674 + j4.14 = 4.47 \angle 67.98^\circ \text{ pu}$$

$$\bar{V}_{11KV-F} = \bar{Z}_{11KV-F} \times \bar{I}_F = (4.47 \angle 67.98^\circ) \times (0.196 \angle -70.8^\circ) = 0.88 \angle -2.82^\circ \text{ pu}$$

$$\bar{V}_{11KV} = 0.88 \angle -2.82^\circ \times 11KV = 9.68 \angle -2.82^\circ \text{ KV}$$

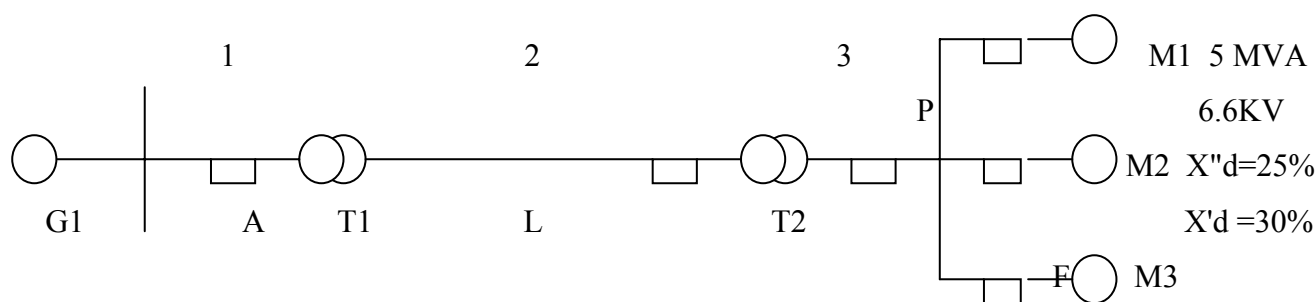
مثال : در شکل زیر ژنراتور از طریق ترانسفورماتورهای T1, T2 و خط انتقال L و موتور های M1, M2, M3 متصل شده است. قبل از وقوع عیب اتصال کوتاه سه فاز متقارن در نقطه F مقدار ولتاژ در شین موتورها (نقطه P) برابر 6.6 KV است. با وقوع اتصال کوتاه در نقطه F مطلوب است محاسبه:

الف- جریان زیرگذرای عیب

ب- جریان زیر گذرا در کلید قدرت B

پ- جریان لحظه ای در کلید قدرت B

ت- جریان قطع به وسیله کلید قدرت B در مدت زمان پنج سیکل (محاسبه جریان گذرا)



25MVA	25MVA	$X_L=15\%$	25MVA	B
11Kv	11 / 66	درمبنای	66 / 6.6	
$X''_d=20\%$	$X=10\%$	25MVA	$X_L=10\%$	
		66 Kv		

فرض می شود که قبل از وقوع عیب سیستم در حالت بی باری بوده است (چون حالت بی باری است پس از جریان قبل از عیب صر فنظر شده است و سطح ولتاژ در تمام نقاط شبکه یکسان می باشد) قدرت مبنای سیستم را 25 MVA در نظر بگیرید.

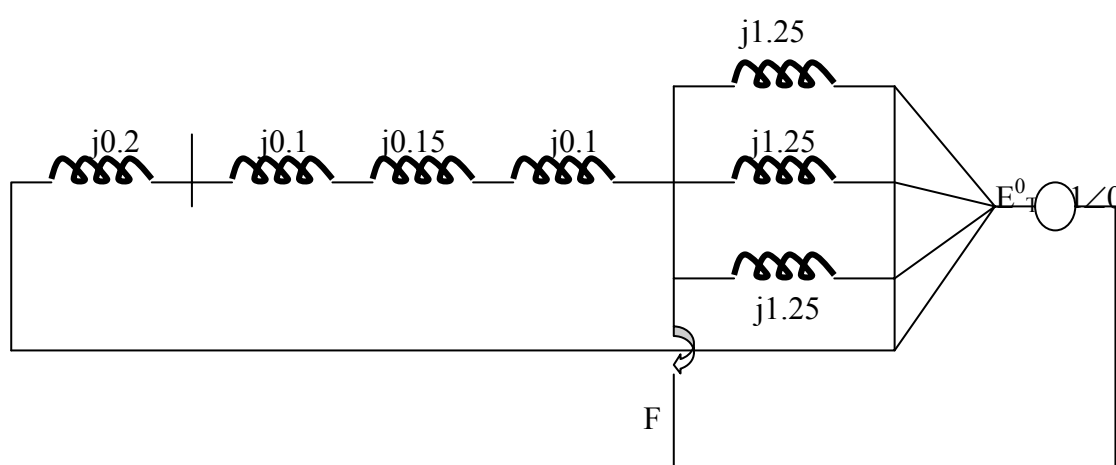
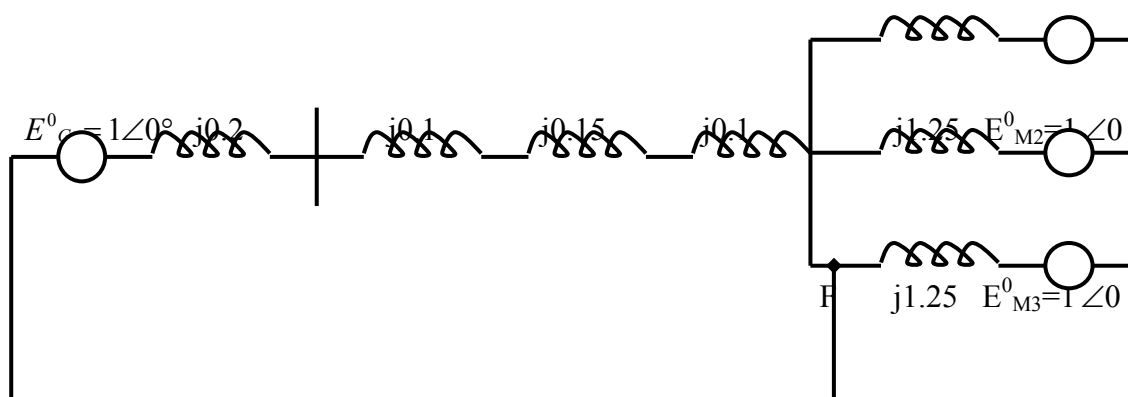
الف: برای هر موتور

$$S_{base} = 25MVA \rightarrow V_{b1} = 11KV \rightarrow V_{b2} = 66KV \rightarrow V_{b3} = 6.6KV$$

$$X''_d = j0.25 \times \frac{25M}{5M} = j1.25 \text{ pu} \rightarrow X'_d = j0.3 \times \frac{25M}{5M} = j1.5 \text{ pu}$$

بقیه تجهیزات در مبنای صحیح می باشد مدل مداری سیستم جهت محاسبات به صورت زیر می باشد

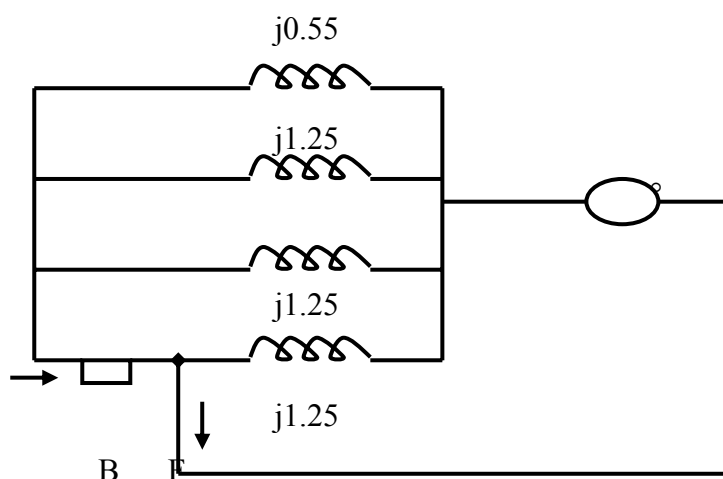
$$j1.25 \quad 6.6/6.6KV$$



مدار معادل تونن از دید F

بخاطر بي بار بودن مدار قبل از اتصال کوتاه امپدانس معادل از دید F با معادل منبع سري شده است در حالیکه این مسئله همیشه صحيح نبوده و در موارد بارداري مدار يك اشتباه بزرگ و نابخشودني مي باشد در حالت بارداري امپدانس معادل از دید F با ولتاژ دو سر F نسبت به زمین به عنان منبع معادل تونن سري مي شود.

الف : پس از ترسیم مدار معادل تونن و خلاصه کردن آن داریم :



I_{scB} I_{sc}

مدار خلاصه شده مدار معادل تونن از دید نقطه F (برای محاسبه جریان زیرگذرا)

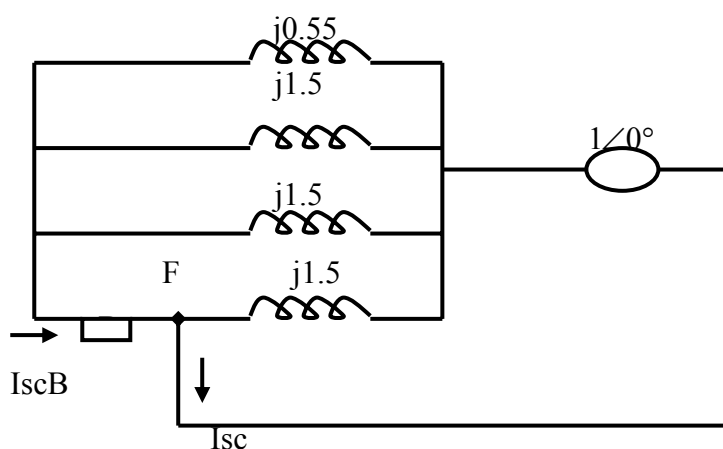
$$I_{sc} = \left(3 \times \frac{1}{j1.23} + \frac{1}{j0.55}\right) \times (1 \angle 0^\circ) = -j4.22 \text{ pu} \rightarrow$$

$$I_{base3} = \frac{25M}{\sqrt{3} \times 6.6Kv} 2187 A \rightarrow I_{sc} = -j9229 A$$

ب:

$$I_{scB} = \left(2 \times \frac{1}{j1.25} + \frac{1}{j0.55}\right) = -j3.42 \text{ pu} = -j7499.5 A$$

پ: برای یافتن جریان لحظه ای در کلید قدرت B بایستی جریان مولفه DC را به جریان زیر گذرای به دست آمده از قسمت ب اضافه کنیم علاوه بر محاسبه جریان مولفه DC می توان از روش تجربی نیز برای تاثیر این مولفه به صورت ضربی از جریان زیر گذرا استفاده کرد .



$$I_{sc,B} = 1.6 \times I_{scB} = 1.6 \times 9 - j7479.5 = -j1196 A$$

ضریب ۱/۶ در بخش بعدی بیان خواهد شد.

ت: برای محاسبه جریان کلید قدرت B با کنار گذاشتن پنج سیکل اول در آن بایستی جریان گذرای کلید قدرت B محاسبه شود پس در این حالت به جای راکتانس زیر گذرای X''_{dm} از راکتانس گذرای X'_{dm} استفاده می شود.

$$I_{sc,B} = \left(2 \times \frac{1}{j1.5} + \frac{1}{j0.55}\right) \times (1 \angle 0^\circ) = -j3.1515 \text{ pu} = -j6892 A$$

جریان گذرا

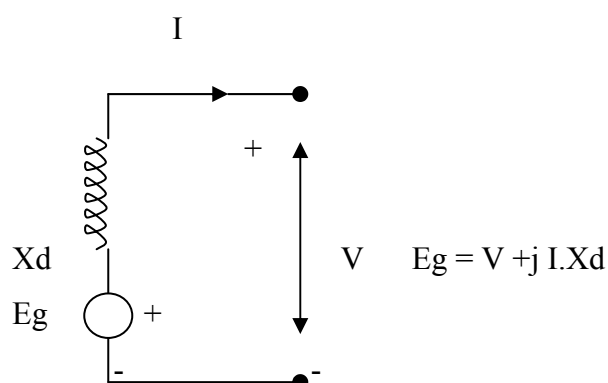
جریان قطع با مولفه DC : برای محاسبه جریان لحظه ای (momentary) کلید قدرت با احتساب جریان مولفه DC برای حالت گذرا طبق اطلاعات در بخش بعدی برای سرعت کلید قدرت در ۵ سیکل اولیه ضریب ۱,۵ در نظر گرفته شده است .

$$I_{sc,B(momentary)} = 1.1 \times (-j6892) = -j7582A$$

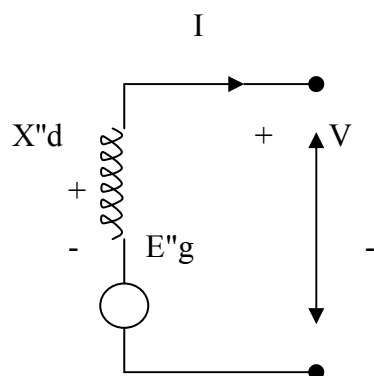
۱-۴ جریان اتصال کوتاه ماشین سنکرون باردار

بررسی اتصال کوتاه در حالت بارداری ماشین سنکرون قدری پیچیده می باشد و خارج از حوصله این درس می باشد با این حال سعی می شود در حد حوصله درس اتصال کوتاه در شرایط بارداری ماشین سنکرون تحلیل شود.

شکل زیر مدار معادل بارداری ماشین سنکرون را در شرایط ماندگار برای جریان بار و ولتاژ ترمینال نشان می دهد E_g ولتاژ القایی ژنراتور سنکرون در حالت بارداری و X_d راکتانس سنکرون محور مستقیم ماشین سنکرون است.

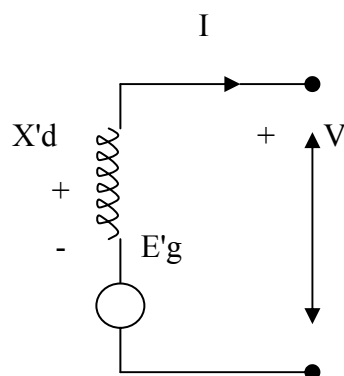


وقتی اتصال کوتاهی در دو سر ماشین سنکرون رخ می دهد مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت ماندگار تبدیل به مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت گذرا و زیر گذرا تبدیل می شود.



مدار معادل بارداری در حالت زیر گذرا

$$E''g = V + j I X''d$$



مدار معادل بارداری ماشین سنکرون در حالت گذرا

$$E'g = V + j I X'd$$

E''_g = voltage behind the subtransient reactance ولتاژ پشت راکتانس زیر گذرا

E'_g = voltage behind the transient reactance ولتاژ پشت راکتانس گذرا

$I = 0 \rightarrow E''_g = E'_g = E_g = \text{no load voltage}$ در حالت بی باری

برای موتور سنکرون نیز در سه حالت ماندگار و گذرا و زیر گذرا در بارداری روابط بال صادق می باشد فقط باید به جای جمع تفریق بگذاریم

$$E''_m = V - j I X''_{dm} \quad , \quad E'_m = V - j I X'_{dm} \quad , \quad E_m = V - j I X_{dm}$$

بنابراین هرگاه در مورد اتصال کوتاه در یکی سیستم قدرت به هم پیوسته بحث کنیم در این صورت ماشین سنکرون (ژنراتور ها و موتور ها) با مدار معادل مربوطه به صورت ولتاژ پشت راکتانس زیر گذرا (گذرا) جایگزین می شود بقیه قسمت های سیستم نیز به صورت عناصر پسیو بدون تغییر باقی می ماند.

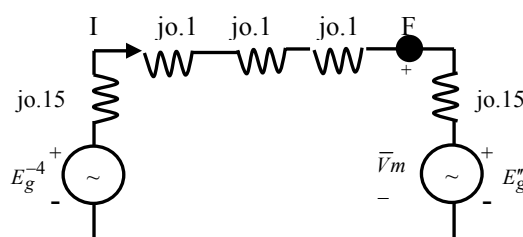
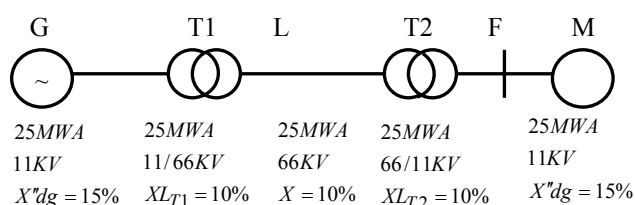
مثال- در سیستم قدرت زیر ژنراتور سنکرون G از طریق ترانسفورماتورهای T1 و T2 و خط انتقال L به موتور سنکرون M متصل شده اند. در لحظه ای اتصال کوتاه سه فاز دو سر ترمینالهای موتور سنکرون، ولتاژ ترمینالهای آن برابر ۱۰/۶ کیلو ولت و دربار ۱۵ مگاوات و ضریب قدرت ۰/۸ پیش فاز است. جریان زیرگذاری ژنراتور سنکرون، موتور سنکرون و جریان زیرگذاری عیب را محاسبه کنید. حل: تمام راکتانس ها در توان مبنا ۲۵ مگا ولت آمپر در نظر گرفته می شوند.

$$S_{base} = 25 \text{ MVA}$$

$$V_{b1} = 11 \text{ KV}$$

$$V_{b2} = 66 \text{ KV}$$

$$V_{b3} = 11 \text{ KV}$$



مدار معادل قبل از عیب

Prefault Condition:

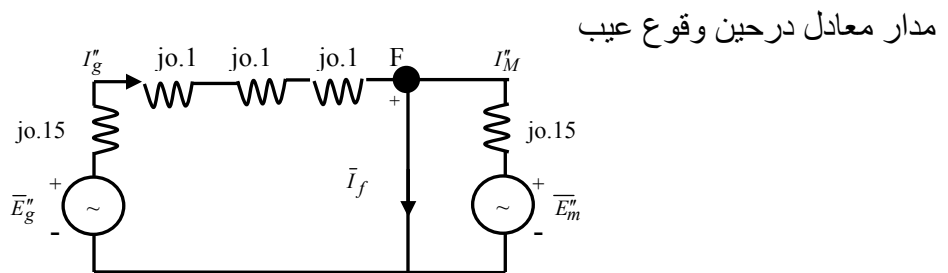
$$\text{Prefault Voltage of Motor} \rightarrow \bar{V}_m = \frac{10.6^k}{11k} = 0.9636 \angle 0^\circ \text{ Pu}$$

$$\text{Load of Motor} = 15 \text{ Mw}, 0.8 \text{ Pf Leading} \Rightarrow \frac{15M}{25M} = 0.6 \text{ Pu}, 0.8 \text{ Pu Leading}$$

$$\text{Prefault Current } \bar{I} = \frac{0.6}{0.9636 \times 0.8} \angle +36.9^\circ = \frac{S_{3p}, \text{Pu}}{V_L, \text{Pu}} = \frac{S_{1p}, \text{Pu}}{V_{1p}, \text{Pu}} = 0.7783 \angle +36.9^\circ$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Voltage behind Subtransient reactance (Generator)} \\ \bar{E}_g'' = \bar{V}_m + (j0.15 + j0.1 + j0.1 + j0.1) \times \bar{I} = 0.7536 + j0.28 \text{ Pu} = 0.8039 \angle 20.38^\circ \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Voltage behind Subtransient reactance (Motor)} \\ \bar{E}_m'' = \bar{V}_m - j0.15 \times \bar{I} = 1.0336 - j0.0933 \text{ Pu} = 1.0378 \angle -5.16^\circ \end{array} \right.$$



Under faulted Condition:

$$\bar{I}_g'' = \bar{E}_g'' / (j0.15 + j0.1 + j0.1 + j0.1) = 0.6226 - j1.6746 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_M'' = \bar{E}_M'' / j0.15 = -0.6226 - j6.8906 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_f = \bar{I}_g'' + \bar{I}_M'' = -j8.5653 \text{ Pu}$$

$$I_{base} (\text{generator} / \text{motor}) = \frac{25M}{\sqrt{3} \times 11^k} = 1312.2^A$$

$$I_g'' = 816.4 - j2197.4 \text{ A}$$

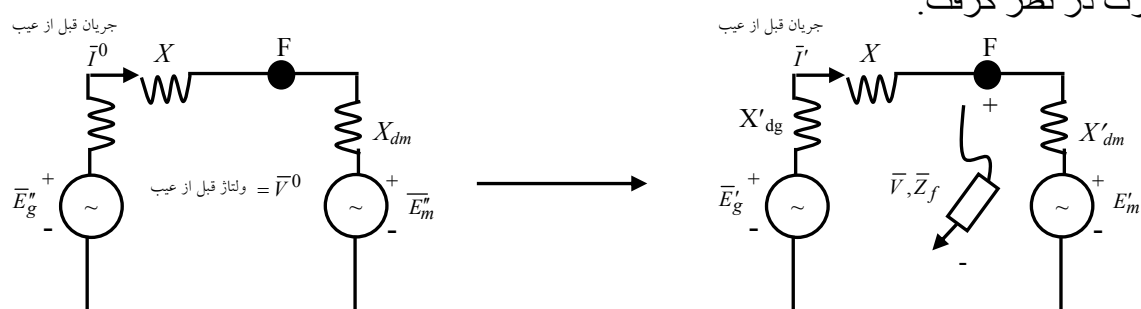
$$I_m'' = -816.2 - j9041.8 \text{ A}$$

$$I_f'' = -j11239 \text{ A}$$

۵-۱ محاسبه جریان اتصال کوتاه با استفاده از قضیه تونن

یکی از روشهای محاسبه جریان اتصال کوتاه از طریق کاربرد روش و قضیه تونن است. این روش سریعتر و راحتتر از روش محاسباتی سیستماتیک در شبکه‌های الکتریکی بزرگ است. قضیه تونن یک راه حل کلی است و اینجا از طریق بررسی یک مثال تحلیل می‌شود.

فرض کنید ژنراتور سنکرون از طریق یک خط انتقال به موتور سنکرون متصل شده است. مدل مداری این سیستم در شرایط ماندگار بصورت زیر است. فرض کنید نقطه‌ای عیب F در سر ترمینال موتور سنکرون اتفاق بیفتد. در لحظه‌ای وقوع عیب برحسب شرایط می‌توان مدل حالت گذرا یا زیرگذرا را برای مدل مولدی سیستم قدرت در نظر گرفت.



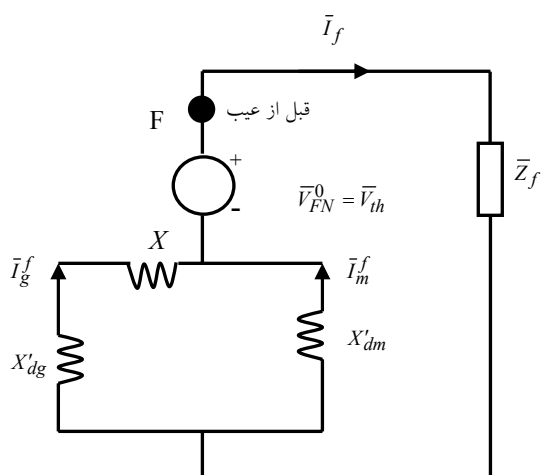
برای محاسبه جریان گذرا از مدل حالت گذرا و برای محاسبه‌ی جریان زیر گذرا از مدل حالت زیر گذرا استفاده می‌شود در اینصورت ولتاژهای پشت را کتانس گذرا و یا زیرگذرا بصورت سری باراکتانس‌های مذکور ترسیم می‌شوند.

- از دید نقطه‌ی F مدار معادل تونن بصورت زیر در می‌آید:

$$\bar{I}_f = \frac{\bar{V}_{th}}{\bar{Z}_{th} + \bar{Z}_f} \quad \text{جریان ناشی از عیب}$$

$$\bar{I}_g^f = \frac{X'_d m}{X'_d g + X + X'_d m} \bar{I}_f$$

$$\bar{I}_m^f = \frac{X'_d g + X}{X'_d g + X + X'_d m} \bar{I}_f$$



در حالت کلی نمی‌توان جریان خارج از امپدانس تونن را به داخل آن برد و توزیع کرد

جریان کل = جریان قبل از عیب + جریان ناشی از عیب

ولتاژ کل = ولتاژ قبل از عیب + ولتاژ ناشی از عیب

$$\bar{I}_g = \bar{I}^0 + \bar{I}_g^f \quad \bar{E}_g = \bar{E}_m = 1 \angle 0^\circ \text{ (فقط در حالت بی باری امکان دارد)}$$

$$\bar{I}_m = -\bar{I}^0 + \bar{I}_m^f$$

$$\bar{V} = \bar{V}_{FN} = \bar{V}_{FN}^0 + (-jX_{th}\bar{I}_f)$$

مراحل عملیات محاسبه جریان اتصال کوتاه فوق:

(۱) تحلیل حالت ماندگار سیستم در شرایط بار داری (تحلیل پخش بار)

(۲) تعویض راکتانس ماشین سنکرون با راکتانس زیرگذاري گذرا در شرایط عیب اتصال کوتاه- صفر کردن تمامی منابع و محاسبه‌ای امپدانس تونن

(۳) اتصال امپدانس تونن به نقطه (سر) منفي ولتاژ نقطه‌ای عیب (با مقدار قبل از عیب) بصورت سری و محاسبه‌ی جریانها و ولتاژهای حین عیب با اتصال مدار معادل تونن در نقطه‌ی عیب توسط امپدانس عیب

(۴) جریان و ولتاژ کل هر نقطه‌ای در سیستم از مجموع جریانها و ولتاژهای مرحله ۱ و ۳ محاسبه می‌شود. در صورت عدم اطلاعات کافی از سیستم در شرایط قبل از عیب (ماندگار) فرایض زیر قابل انتخاب هستند:

فرض ۱: اندازه تمامی ولتاژهای قبل از عیب برابر ۱ پریونیت فرض می‌شوند

فرض ۲: تمامی جریانهای قبل از عیب برابر صفر فرض می‌شوند.

۶-۱ انتخاب کلیدهای قدرت

دو پارامترهای اصلی برای انتخاب کلید قدرت با استفاده از محاسبات اتصال کوتاه عبارتند از:

جریان لحظه‌ای نامی Rated Momentary Current

جریان قطع نامی Rated Interrupting Current

در رژیم زیرگذرا:

- برای محاسبه‌ی جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه متقارن پاسخ سینوسی از راکتانس‌های زیرگذرا در ماشین‌های سنکرون استفاده می‌شود.

- برای محاسبه جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه (موثر) کل با در نظر گرفتن جریان مولفه DC بایستی جریان لحظه‌ای اتصال کوتاه متقارن پاسخ سینوسی را در ضریب تجربی ۱.۶ ضرب نمائیم.

$$I_{mm} \approx 1.6 \times I_{mm} |_{X'd}$$

در رژیم گذرا:

- برای محاسبه‌ی جریان قطع اتصال کوتاه پاسخ سینوسی از راکتانس زیرگذرا برای ژنراتور سنکرون و راکتانس گذرا برای موتور سنکرون استفاده می‌شود در شرایط موتور القایی اکثراً صرفنظر می‌شود (در برخی محاسبات ممکن است شرایط موتور القایی نیز در نظر گرفته شود)
- برای محاسبه جریان قطع اتصال کوتاه کل، با در نظر گرفتن جریان مولفه‌ی DC بایستی جریان قطع اتصال کوتاه پاسخ سینوسی را با استفاده از ضرایب زیر در ضرایب مربوطه ضرب کنیم:

$$I_{intr} \approx \text{ضریب} \times I_{intr} |_{x''_{dg}, x''_{dm}}$$

سرعت کلید قدرت	8 سیکل یا آهسته تر	5 سیکل	3 سیکل	2 سیکل
ضریب	1	1.1	1.2	1.4

- اگر قدرت اتصال کوتاه کلید بیشتر از 500 MVA باشد، هر کدام از ضرایب فوق 0.1 افزایش می‌یابد.
- ضرایب فوق برای کلیدهای هوایی با مقدار نامی 600^V یا کمتر برابر 1.25 می‌باشد.
- در رنج مشخصی جریان قطع اتصال کوتاه کلید قدرت بطور معکوس با ولتاژ کار آن متناسب است.
- ولتاژ کار نمی‌تواند از حد ماکزیم طراحی شده افزایش یابد و نیز جریان قطع اتصال کوتاه نیز نمی‌تواند از مقدار حداکثر جریان قطع نامی بیشتر باشد در چنین رنج‌های کاری حاصلضرب ولتاژ کار و جریان قطع ثابت است بنابراین منطقی و مناسب است که جریان نامی کلید قدرت بصورت قدرت اتصال کوتاه (SC MVA) قطع بصورت زیر بیان شود:

Rated interrupting MVA (three-phase) Capacity

$$= \sqrt{3} V_{L, \text{rated}}^{(KV)} \times I_{L, \text{rated interrupting}} (KA)$$

- بنابراین بجای محاسبه جریان اتصال کوتاه قطع، مقدار قدرت اتصال کوتاه SC MVA سه فاز وقفه محاسبه می‌گردد:

$$SC \text{ MVA (3-phase)} = \sqrt{3} \times \text{Prefault Line Voltage (KV)} \times SC \text{ Current (KA)}$$

- اگر جریان و ولتاژ در پایه مقادیر سه فاز بصورت پریونیت باشند:

$$SC \text{ MVA (3-phase)} = V_{\text{prefault}} \times I_{sc} \times (MVA)_{\text{base}}$$

- واضح است که مقدار MVA نامی قطع در يك کلید قدرت بیشتر (یا برابر) از SC MVA لازم برای وجود قطع است.

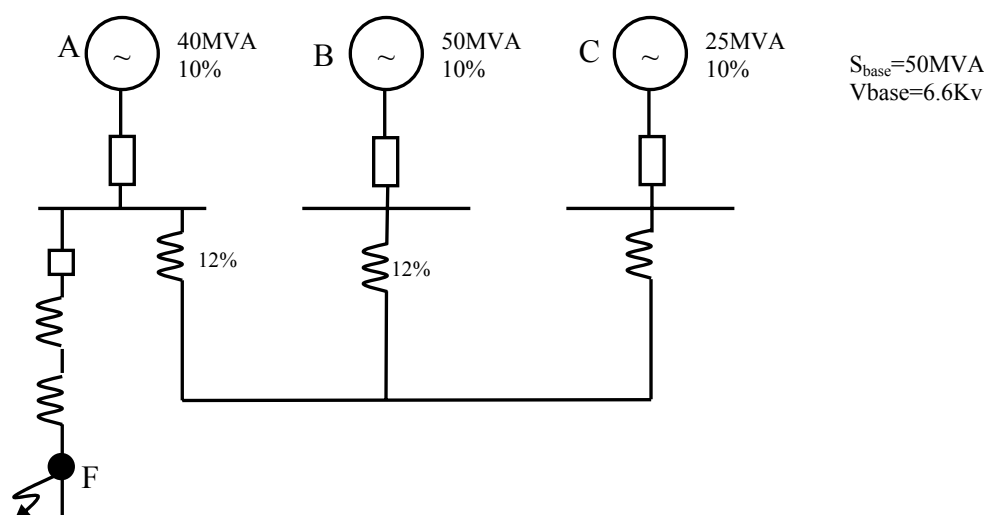
برای انتخاب کلید قدرت در یک منطقه ابتدا لازم است مقدار SC MVA حداکثر ممکن قطع را با در نظر گرفتن نوع و محل عیب و مقدار ظرفیت تولید انرژی (ژنراتور سنکرون و حتی برای کار موتوری سنکرون) تجهیزات متصل به سیستم قدرت محاسبه شود.

توجه: عیب اتصال کوتاه سه فاز معمولاً دارای بیشترین مقدار SC MVA است و کلید قدرت بایستی توانایی تحمل و قطع (Interrupting) آنرا داشته باشد. در یک حالت استثنا عیب اتصال کوتاه تکفاز به زمین LG در نزدیکی ترمینال ژنراتور سنکرون خطرناکتر از عیب اتصال کوتاه سه فاز بوده و جریان آن بیشتر است. در یک سیستم قدرت ساده حداکثر مقدار SC MVA در محل عیب مشخص است. اما در سیستمهای قدرت بزرگ برای یافتن حداکثر مقدار SC MVA بایستی محاسبات اتصال کوتاه در محل های ممکن و مختلف انجام گیرد.

مثال) سه ژنراتور ۶/۶ کیلو ولتی A, B, C باراکتانس نشستی ۱۰٪ و مقدار MVA نامی 25, 50, 40 بصورت شکل زیر بهم متصل شده اند. ترمینال هر یک از ژنراتورها از طریق راکتانس محدود کننده باراکتانس ۱۲٪ بر اساس مقادیر نامی هر یک از ژنراتورها به شبکه متصل شده اند. یک خط تغذیه سه فاز با ولتاژ ۶/۶ کیلو ولت از ژنراتور A گرفته شده است.

امپدانس خط تغذیه برابر $j0.06 + j0.12$ اهم بر فاز است. مقدار حداکثر MVA که خط تغذیه در اتصال کوتاه متقارن و در انتهای خود میتواند تحمل کند را محاسبه کنید.

فرض: قبل از وقوع عیب شبکه در حالت بی باری است (جریان بی باری برابر صفر می باشد)



$$\bar{Z}_{feeder} = \frac{0.06 + j0.12}{(6.6k)^2 / 50M} = 0.069 + j0.138 \text{ Pu}$$

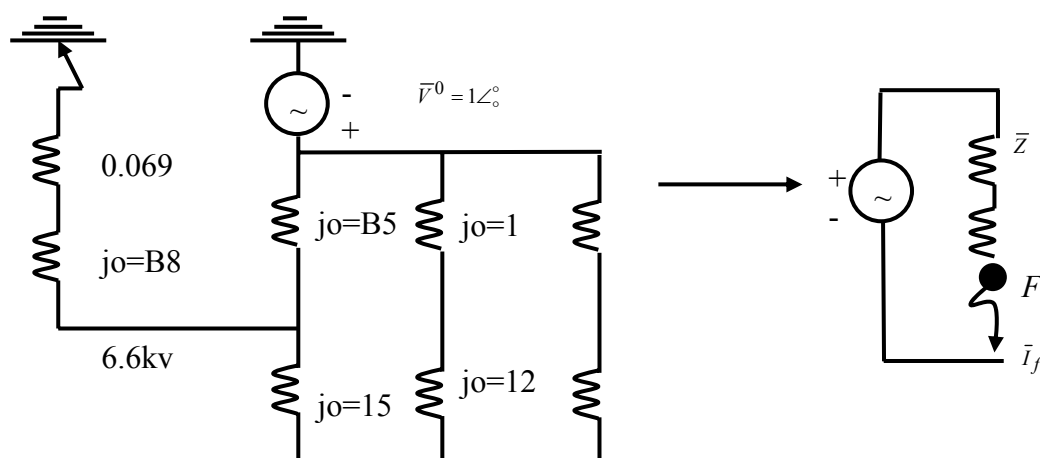
$$\text{Generator: } X_{G,A} = j0.1 \times \frac{50M}{40M} = j0.125 \text{ Pu}, X_{G,B} = j0.1 \text{ Pu}, X_{G,C} =$$

$$j0.1 \times \frac{50M}{25M} = j0.2 \text{ Pu}$$

$$\text{Reactor: } X_{R,A} = j0.12 \times \frac{50M}{40M} = j0.15 \text{ Pu}, X_{R,B} = j0.12 \text{ Pu}, X_{R,C} =$$

$$j0.12 \times \frac{50M}{25M} = j0.24 \text{ Pu}$$

به علت بی بار بودن قبل از وقوع عیب:



$$\bar{Z} = (0.069 + j0.138) + [j0.125 \parallel (j0.15 + j0.22 \parallel j0.44)]$$

$$= 0.069 + j0.226 = 0.236 \angle 73^\circ \text{ Pu}$$

$$\bar{S}_{sc} = \bar{V}^0 \bar{I}_f^* = \bar{V}^0 \left(\frac{\bar{V}^0}{\bar{Z}} \right)^* = \frac{\bar{V}^{02}}{\bar{Z}^*} = \frac{1}{\bar{Z}^*}$$

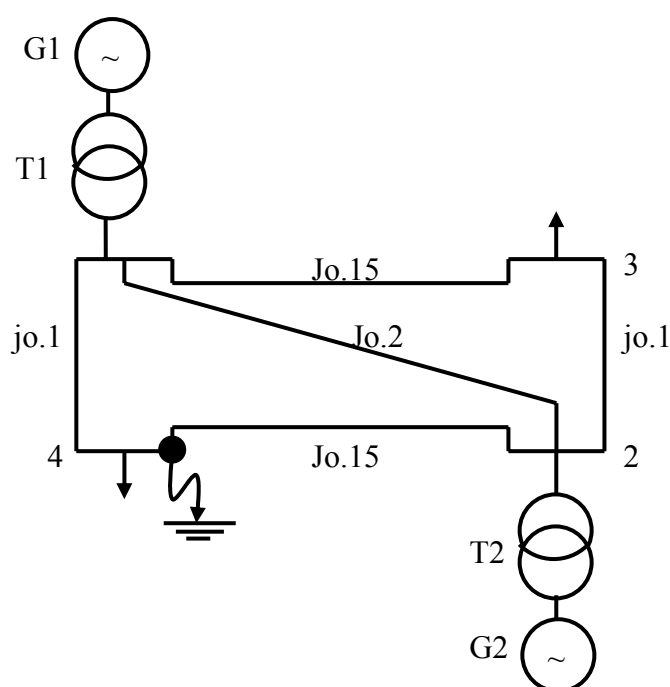
$$\bar{S}_{sc}, \text{Pu} = \frac{1}{\bar{Z}^*} \times S_{base} = \frac{1}{0.236 \angle -73^\circ} \times 50M = 0.212 \angle 73^\circ \text{ MVA}$$

مثال: شبکه‌ی ۴ شینه‌ی زیر را در نظر بگیرید شین‌های ۱ و ۲ تولید و شین‌های ۳ و ۴ شین‌های بار هستند مقادیر نامی ژنراتورها 100MVA ، 11kv و راکتانس گذرای ۱۰% می‌باشند. دو عدد ترانسفورماتور 100MVA ، 11/110kv باراکتانس نشتی 5% ، ژنراتورها را به شین‌های مربوط وصل نموده‌اند. راکتانس خطوط در مقادیر نامی 100MVA و 110kv طبق شکل داده شده‌اند.

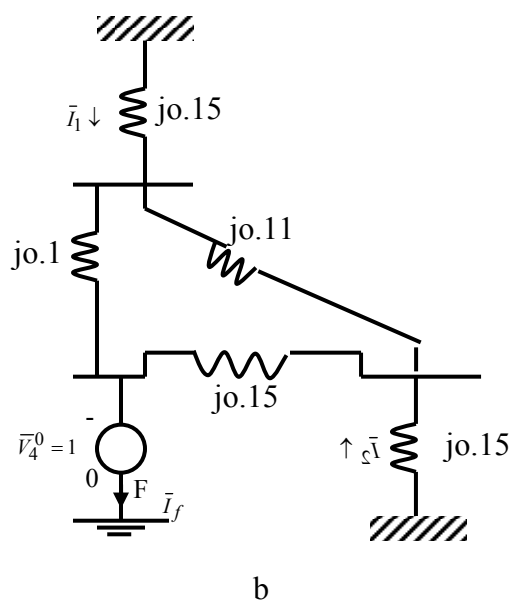
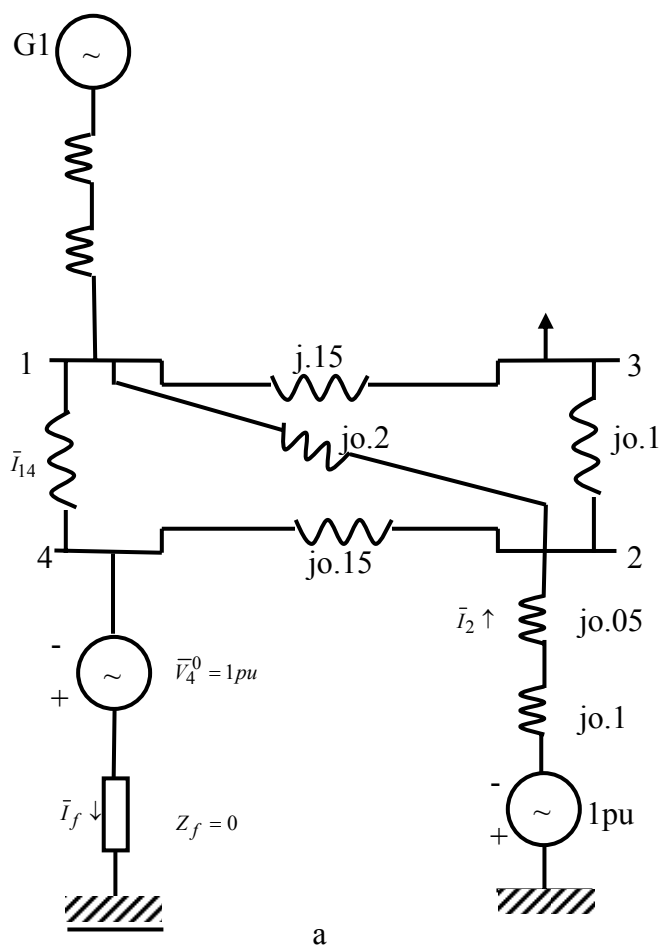
جریان اتصال کوتاه سه فاز متقارن را بدون امپدانس عیب در شین بار ۴ محاسبه کنید.

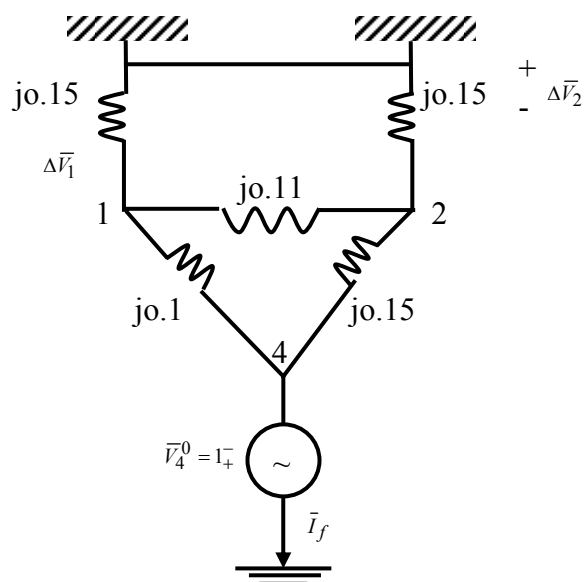
فرض کنید ولتاژها و جریان‌های قبل از عیب به ترتیب 0,1 پریونیت می‌باشند.

$$V_{base}=11kv \text{ و } S_{base} = 100MVA$$

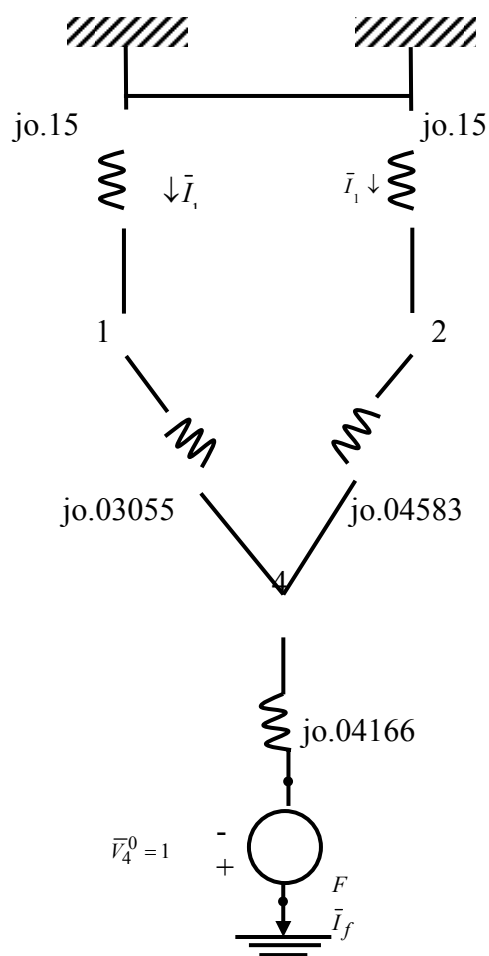


مدار معادل تونن را از دید نقطه عیب ترسیم می‌کنیم:

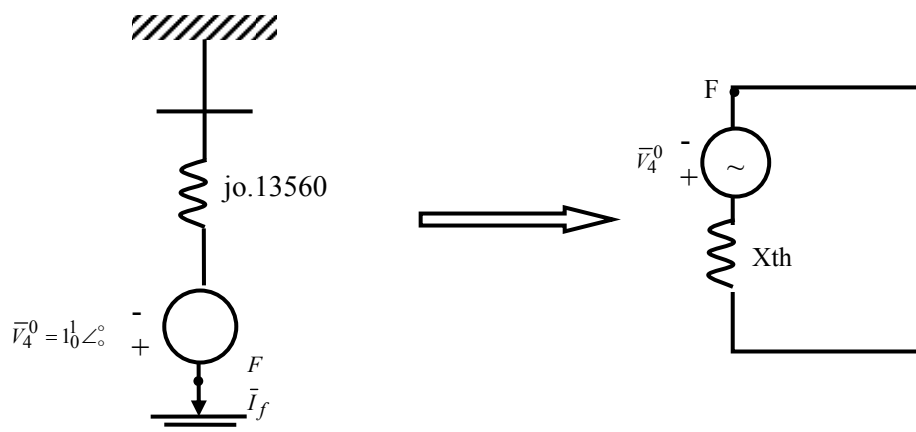
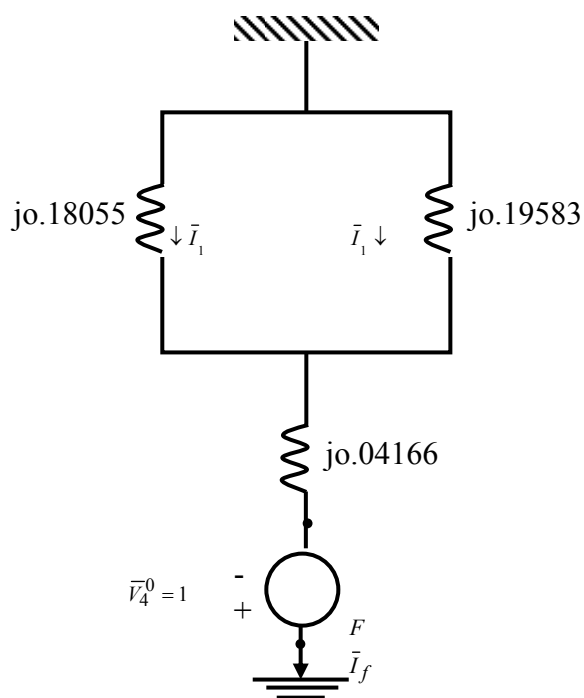




(c)



(d)



$$\bar{I}_F = \frac{1\angle 0^\circ}{j0.13560} = -j7.37463 \text{ Pu (f) از شکل}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_f \times \frac{j0.19583}{j0.37638} = -j3.83701 \text{ Pu (e) از شکل}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_f \times \frac{j0.18055}{j0.37638} = -j3.53762 \text{ Pu}$$

تغییرات ولتاژ در شین‌های ۱، ۲، ۳: (از شکل (c))

$$\Delta \bar{V}_1 = \bar{I}_1 \times j0.15 = 0.57555 \text{ Pu}$$

$$\Delta \bar{V}_2 = \bar{I}_2 \times j0.15 = 0.53064 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_1^f = \bar{V}_1^0 - \Delta \bar{V}_1 = 1 \angle 0^\circ - 0.57555 = 0.42445 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_2^f = \bar{V}_2^0 - \Delta \bar{V}_2 = 1 \angle 0^\circ - 0.53064 = 0.46936 \text{ Pu}$$

شکل (a)

$$\bar{I}_{13} = (\bar{V}_1^f - \bar{V}_2^f) / (j0.15 + j0.1) = j0.17964 \text{ Pu}$$

$$\Delta \bar{V}_3 = \Delta \bar{V}_1 + \Delta \bar{V}_{13} = \bar{I}_1 \times j0.15 + \bar{I}_{13} \times j0.15 = 0.54860 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_3^f = \bar{V}_3^0 - \Delta \bar{V}_3 = 1 \angle 0^\circ - 0.54860 = 0.4514 \text{ Pu}$$

$$\bar{V}_4^f = \bar{I}_f \bar{Z}_f = 0 \text{ Pu}, \quad \bar{V}_4^f = \bar{V}_4^0 - \Delta \bar{V}_4 = 1 \angle 0^\circ - 1 \angle 0^\circ = 0 \text{ Pu}$$

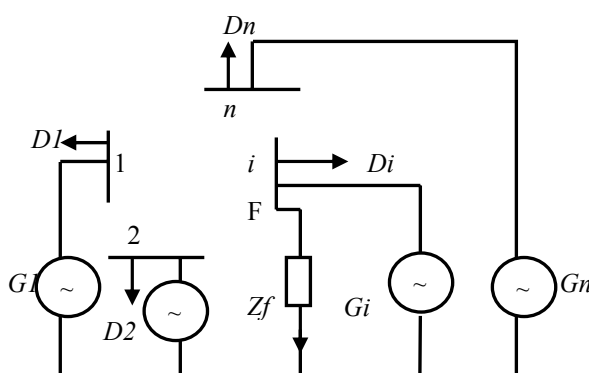
$$\bar{S}_{sc,4} = \bar{V}_4^0 \bar{I}_f^* = (1 \angle 0^\circ)(-j7.37463) \times (100 \text{ MVA}) = -j737.463 \text{ MVA}$$

۷-۱ الگوریتم محاسبات اتصال کوتاه متقارن

مطالعه اتصال کوتاه (متقارن و غیر متقارن) در شبکه‌های ساده با عناصر پسیو ساده می‌باشند اما برای سیستم‌های با ابعاد متوسط و بزرگ بایستی از روش‌های الگوریتمیک و کلی برای محاسبات اتصال کوتاه استفاده نمود که بر پایه محاسبات کامپیوتری استوار می‌باشند. این کار در ۴ مرحله انجام می‌شود. فرض می‌کنیم یک شبکه n شینه در حالت ماندگار (یا بار پایدار) بصورت زیر موجود باشد:

مرحله ۱- محاسبه ولتاژهای تمام شین‌ها و جریان‌های تمام خطوط قبل از عیب (Prefault) با استفاده از

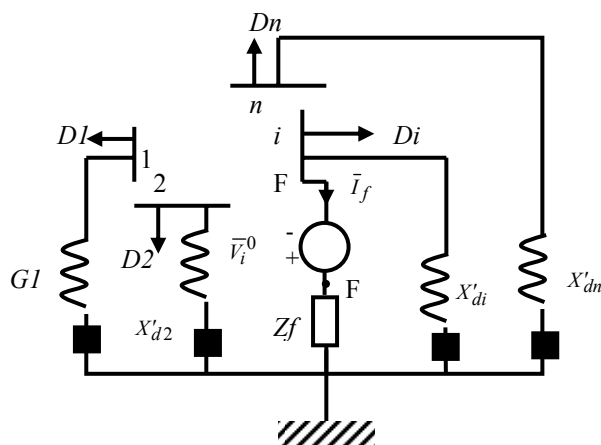
$$\bar{V}_{bus}^0 = [\bar{V}_1^0 \bar{V}_2^0 \dots \bar{V}_n^0]^T \quad \text{مطالعات پخش بار:}$$



فرض می‌شود شین i ام از طریق امپدانس عیب \bar{Z}_f اتصال کوتاه شود در اینصورت بردار ولتاژ حین عیب (پس از عیب Post fault) برابر است با:

بردار تغییرات ولتاژ شین‌ها ناشی از وقوع عیب: $\bar{V}_{bus}^f = \bar{V}_{bus}^0 + \Delta \bar{V}_{bus}^f$

ماتریس امپدانس شین‌ها: $\bar{Y}_{bus}^{-1} = \bar{Z}_{bus}$



مرحله ۲- ترسیم مدار معادل تونن پس‌یو شبکه قدرت که در آن ژنراتورها توسط راکتانس‌های گذرا زیرگذرا با مقدار emf اتصال کوتاه شده جایگزین می‌شوند.

مرحله ۳- اتصال مدار معادل تونن پس‌یو شبکه قدرت، از شین i با $(-\bar{V}_i^0)$ بصورت سری با \bar{Z}_f به زمین. در اینصورت ولتاژهای این شبکه توسط $\Delta \bar{V}_{bus}^f$ محاسبه می‌شود:

$$\Delta \bar{V}_{bus}^f = \bar{Z}_{bus} \cdot \bar{I}^f$$

$$\bar{I}^f = \text{bus Current injection network} = [\approx 0 \approx 0 \dots \bar{I}_i^f = -\bar{I}_f \dots \approx 0]^T$$

شبکه فقط بوسیله جریان $(-\bar{I}_f)$ در شین i تزریق شده است و از جریان بار شین‌ها نیز صرف‌نظر شده است،

$$\bar{Z}_{bus} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{11} & \dots & \bar{Z}_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ \bar{Z}_{n1} & \dots & \bar{Z}_{nn} \end{bmatrix} = \text{bus impedance matrix of the Passive thevenin network}$$

$$\Delta \bar{V}_i^f = \bar{Z}_{ii} \bar{I}_i^f = -\bar{Z}_{ii} \bar{I}_f \quad \text{پس:}$$

مرحله ۴- بنابراین ولتاژ شین i در حین عیب برابر است با:

$$\bar{V}_i^f = \bar{Z}_f \bar{I}_f \quad \text{این مقدار بایستی برابر باشد با: } \bar{V}_i^f = \bar{V}_i^0 + \Delta \bar{V}_i^f = \bar{V}_i^0 - \bar{Z}_{ii} \bar{I}_f$$

$$\bar{Z}_f \bar{I}_f = \bar{V}_i^0 - \bar{Z}_{ii} \bar{I}_f \rightarrow \bar{I}_f = \bar{V}_i^0 / (\bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_f) \quad \text{پس داریم:}$$

$$\bar{V}_i^f = \frac{\bar{Z}_f}{\bar{Z}_{ii} + \bar{Z}_f} \bar{V}_i^0$$

در اینصورت اختلاف ولتاژ در شین ز ام با استفاده از روابط (1) و (2) صفحه‌ی قبل برابر با:

$$\Delta \bar{V}_j^f = \bar{Z}_{ji} \bar{I}_i^f = -\bar{Z}_{ji} \bar{I}_f$$

$$\bar{V}_j^f = \bar{V}_j^0 + \Delta \bar{V}_j^f = \bar{V}_j^0 - \bar{Z}_{ji} \bar{I}_f, \quad j = 1, 2, \dots, n$$

حال مي‌توان جريانهاي عيب را در تمام خطوط انتقال شبکه بدست آورد:

$$\bar{I}_{ij} = \bar{Y}_{i,j} (\bar{V}_i^f - \bar{V}_j^f)$$

متفاوت از درايه‌ي i j ماتريس y_{bus} و $\bar{y}_{i,j} = \text{admittance of the } (i,j)\text{th line}$

مثال- شبکه مثال قبل را از طريق روش کلی و الگوريتمیک حل کنید.

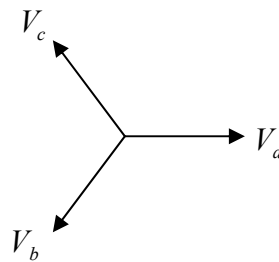
۸-۱ محاسبه مستقيم ماتريس امپدانس شين ها

ادامه فصل دوم

مولفه های متقارن

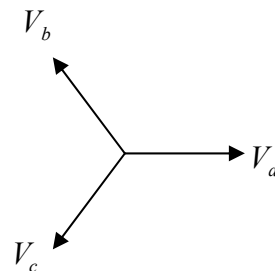
(Symmetrical Components)

abc (positive sequence)



$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \bar{V}_a \\ V_b &= a^2 V_a \\ V_c &= a V_a\end{aligned}$$

acb (negative sequence)



$$\begin{aligned}V_a &= V_a \\ V_b &= a V_a \\ V_c &= a^2 V_a\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}a &= e^{j120} & a &= e^{j240} = e^{-j120} = a^* \\ (a^2)^* &= a & a^3 &= 1 & 1 + a + a^2 &= 0\end{aligned}$$

مثال- مولفه های هموپلر و معکوس و مستقیم سر ولتاژ در حالت رژیم دایم زیر بدست آورید.

$$\begin{array}{lll}\bar{V}_1 = 0 & & V_1(t) = 0 \\ \bar{V}_2 = 220 \angle 0^\circ & \rightarrow & V_2(t) = 220\sqrt{2} \sin 314t \\ \bar{V}_3 = 0 & & V_3(t) = 0\end{array}$$

مولفه های فاز ۱ عبارتند از:

$$\bar{a} = e^{j120^\circ} = 1 \angle 120^\circ$$

$$\bar{a}\bar{V}_1 = \bar{a}^2\bar{V}_1 = 0$$

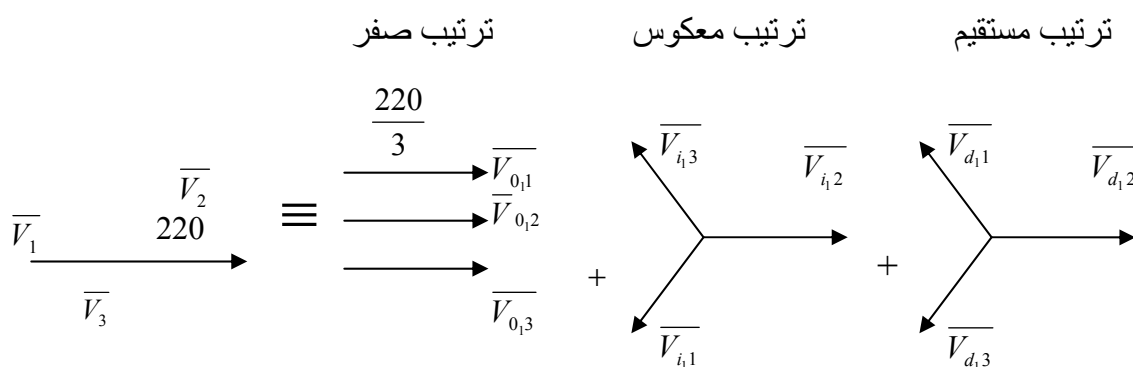
$$\bar{a}\bar{V}_2 = 220 \angle 120^\circ \quad \bar{a}^2\bar{V}_2 = 220 \angle 240^\circ$$

$$\bar{a}\bar{V}_3 = \bar{a}^2\bar{V}_3 = 0$$

$$\bar{V}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3) = \frac{220}{3} \angle 0^\circ$$

$$\bar{V}_{i,1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_1 + \bar{a}^2\bar{V}_2 + \bar{a}\bar{V}_3) = \frac{1}{3}(0 + 220 \angle 240^\circ + 0) = \frac{220}{3} \angle 240^\circ$$

$$\bar{V}_{d,1} = \frac{1}{3}(\bar{V}_1 + \bar{a}\bar{V}_2 + \bar{a}^2\bar{V}_3) = \frac{1}{3}(0 + 220 \angle 120^\circ + 0) = \frac{220}{3} \angle 120^\circ$$



مثال- در يك شبکه قدرت مولفه های جریانهای اتصال کوتاه به طرف محل اتصال عبارتند از (فاز ۱ بعنوان فاز مبنا):

$$\begin{cases} \bar{I}_0 = 1 \text{ pu} \\ \bar{I}_i = j \text{ pu} \\ \bar{I}_d = 0 \text{ pu} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{0,1} = 1 \text{ pu} \\ \bar{I}_{i,1} = j \text{ pu} \\ \bar{I}_{d,1} = 0 \text{ pu} \end{cases}$$

مطلوب است جریانهای هر يك از فازهای سیستم سه فاز $\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3$ ، اگر فاز ۱ بعنوان بردار مبنا باشد.

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1 \angle 120^\circ$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{i,1} \\ \bar{I}_{d,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ j \\ 0 \end{bmatrix} \text{ pu}$$

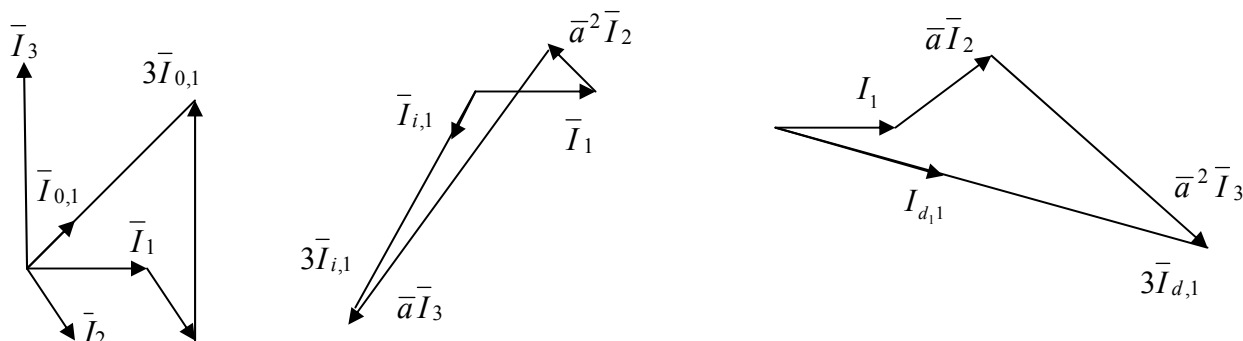
$$\bar{I}_1 = 1 + j \text{ pu} = \sqrt{2} \angle 45^\circ$$

$$\bar{I}_2 = 1 + j\bar{a} \text{ pu} = 1 + 1 \angle 210^\circ \text{ pu} = \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - j\frac{1}{2} \text{ pu}$$

$$\bar{I}_3 = 1 + j\bar{a}^2 \text{ pu} = 1 + 1 \angle 330^\circ \text{ pu} = \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2}\right) - j\frac{1}{2} \text{ pu}$$

از روش هندسي مي توان مولفه ها را نيز براحتي بدست آورد

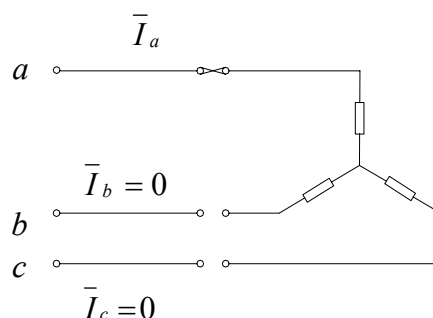
$$\bar{I}_0 = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \quad \bar{I}_i = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{a} \bar{I}_3) \quad \bar{I}_d = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{a}^2 \bar{I}_3)$$



و يا از روي مولفه ها نيز مي شود از طريق هندسي به خود بردارهاي اصلي رسيد:

اساسا ژنراتورها تشكيل شبکه سه فاز متعادل را خواهند داد، پس خود شبکه اساسا يك شبکه قدرت كاملا متقارن سه فاز است. امپدانس هر فاز در خطوط هوايي و ترانس ها و موتورها و در بارها اساسا تقسيم و توزيع متعادلي است. ذاتا يك شبکه قدرت يك شبکه متقارن سه فاز است. نا متعادلي وقتي پيش مي آيد كه در شبکه يك اتصال کوتاه نا متقارن وصل شود، مثلا يك فاز به زمين وصل شود و پتانسيل آن با پتانسيل زمين يكي مي شود. يك لحظه قبل از وقوع عيب مولفه هاي ولتاژ و جريان (مولفه مستقيم وجود دارد و مولفه هاي معكوس و هموپولر صفر هستند)

تمرين- بار سه فاز متقارني با اتصال ستاره و جريان ۳۰ آمپر از طريق يك خط ۴ سيمه سه فاز متعادل تغذيه مي شود. اگر فيوزهاي دو عدد از فازها (b,c) قطع شوند، با استفاده از روش مولفه هاي متقارن، جريان خط ها را قبل و بعد از حالت نامتقارني محاسبه نماييد.



الف- قبل از قطع فیوزها:

$$\bar{I}_a = 30 \angle 0^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_b = 30 \angle 240^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_c = 30 \angle 120^\circ \text{ A}$$

$$\bar{I}_{0,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(30 \angle 0 + 30 \angle 240 + 30 \angle 120) = 0 \text{ A} \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{0,b} = 0 \\ \bar{I}_{0,c} = 0 \end{cases}$$

$$\bar{I}_{i,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2 \bar{I}_b + \bar{a} \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(30 \angle 0 + (1 \angle 240)(30 \angle 240) + (1 \angle 120)(30 \angle 120)) = 0 \text{ A}$$

$$\rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{i,b} = 0 \\ \bar{I}_{i,c} = 0 \end{cases}$$

$$\bar{I}_{d,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a} \bar{I}_b + \bar{a}^2 \bar{I}_c) = 30 \angle 0 = \bar{I}_a \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{d,b} = \bar{a}^2 \bar{I}_{d,a} = 30 \angle 240 = \bar{I}_b \\ \bar{I}_{d,c} = \bar{a} \bar{I}_{d,a} = 30 \angle 120 = \bar{I}_c \end{cases}$$

ب- بعد از قطع فیوزها:

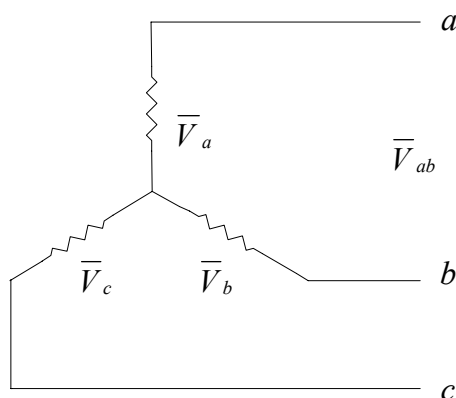
$$\bar{I}_a = 30 \angle 0^\circ \text{ A} \quad \bar{I}_b = 0 \text{ A} \quad \bar{I}_c = 0 \text{ A}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{I}_b + \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3} \bar{I}_a = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{0,a} = \bar{I}_{0,b} = \bar{I}_{0,c} = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{i,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a}^2 \bar{I}_b + \bar{a} \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3} \bar{I}_a = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{i,b} = \bar{a} \bar{I}_{i,a} = (1 \angle 120^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 120^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{i,c} = \bar{a}^2 \bar{I}_{i,a} = (1 \angle 240^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 240^\circ \text{ A} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{d,a} = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + \bar{a} \bar{I}_b + \bar{a}^2 \bar{I}_c) = \frac{1}{3}(\bar{I}_a + 0 + 0) = \frac{1}{3} \bar{I}_a = 10 \angle 0^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{d,b} = \bar{a}^2 \bar{I}_{d,a} = (1 \angle 240^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 240^\circ \text{ A} \\ \bar{I}_{d,c} = \bar{a} \bar{I}_{d,a} = (1 \angle 120^\circ)(10 \angle 0^\circ) = 10 \angle 120^\circ \text{ A} \end{cases}$$

تمرین- در يك سیستم سه فاز با اتصال ستاره فرض کنید ولتاژ فازها برابر \bar{V}_a ، \bar{V}_b ، \bar{V}_c بوده و همان سیستم با اتصال مثلث دارای ولتاژهای خط \bar{V}_{ab} ، \bar{V}_{bc} و \bar{V}_{ca} باشد. در اینصورت ارتباط میان مقادیر مولفه های متقارن ولتاژ را در این دو اتصال پیدا کنید.



نام گذاري مي كنيم

$$\begin{cases} \bar{V}_a = V_a \angle 0^\circ \\ \bar{V}_b = V_b \angle 240^\circ \quad (\overrightarrow{\bar{V}_a \bar{V}_b \bar{V}_c}) \\ \bar{V}_c = V_c \angle 120^\circ \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{V}_{ab} = \bar{V}_a - \bar{V}_b = \sqrt{3}V_a \angle 0 + 30^\circ \\ \bar{V}_{bc} = \bar{V}_b - \bar{V}_c = \sqrt{3}V_b \angle 240 + 30^\circ \quad (\overrightarrow{\bar{V}_{ab} \bar{V}_{bc} \bar{V}_{ca}}) \\ \bar{V}_{ca} = \bar{V}_c - \bar{V}_a = \sqrt{3}V_c \angle 120 + 30^\circ \end{cases}$$

ولتاژ ترتیب صفر تمام فازهاي اتصال مثلث صفر هستند. يعني در ترتیب صفر جرياني وارد مثلث نمي شود و جريان داخل مثلث و خارج آن صفر هستند.

استثنا: اما در ترانسفورماتور با اتصال مثلث و ستاره زمين شده، جريان خارج مثلث صفر هستند (از لحاظ الكتريكي) و جريان داخل مثلث ناشي از عبور جريان از طرف ستاره صفر نيستند (از لحاظ مغناطيسي). در حالت متعادل و نامتعادل داريم:

$$\bar{V}_{0,ab} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{ab} + \bar{V}_{bc} + \bar{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\bar{V}_a - \bar{V}_b) + (\bar{V}_b - \bar{V}_c) + (\bar{V}_c - \bar{V}_a)] = 0$$

$$\bar{V}_{i,ab} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{ab} + \bar{a}^2 \bar{V}_{bc} + \bar{a} \bar{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\bar{V}_a - \bar{V}_b) + \bar{a}^2(\bar{V}_b - \bar{V}_c) + \bar{a}(\bar{V}_c - \bar{V}_a)]$$

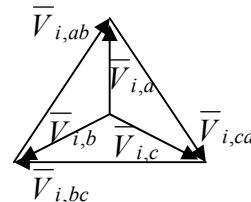
$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a}^2 \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c) - (\bar{a} \bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a}^2 \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c) - \bar{a}(\bar{V}_a + \bar{a}^2 \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}(1 - \bar{a})(\bar{V}_a + \bar{a}^2 \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c)$$

$$= (1 - \bar{a})\bar{V}_{i,a}$$

$$= (\sqrt{3} \angle -30^\circ) \bar{V}_{i,a}$$



$$\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad \bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad 1 - \bar{a} = \frac{3}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \angle -30^\circ$$

$$\bar{V}_{d,ab} = \frac{1}{3}(\bar{V}_{ab} + \bar{a} \bar{V}_{bc} + \bar{a}^2 \bar{V}_{ca}) = \frac{1}{3}[(\bar{V}_a - \bar{V}_b) + \bar{a}(\bar{V}_b - \bar{V}_c) + \bar{a}^2(\bar{V}_c - \bar{V}_a)]$$

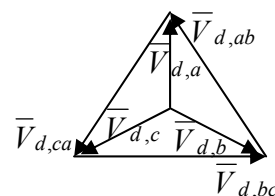
$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a} \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c) - (\bar{a}^2 \bar{V}_a + \bar{V}_b + \bar{a} \bar{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}[(\bar{V}_a + \bar{a} \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c) - \bar{a}^2(\bar{V}_a + \bar{a} \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c)]$$

$$= \frac{1}{3}(1 - \bar{a}^2)(\bar{V}_a + \bar{a} \bar{V}_b + \bar{a}^2 \bar{V}_c)$$

$$= (1 - \bar{a}^2)\bar{V}_{d,a}$$

$$= (\sqrt{3} \angle +30^\circ) \bar{V}_{d,a}$$



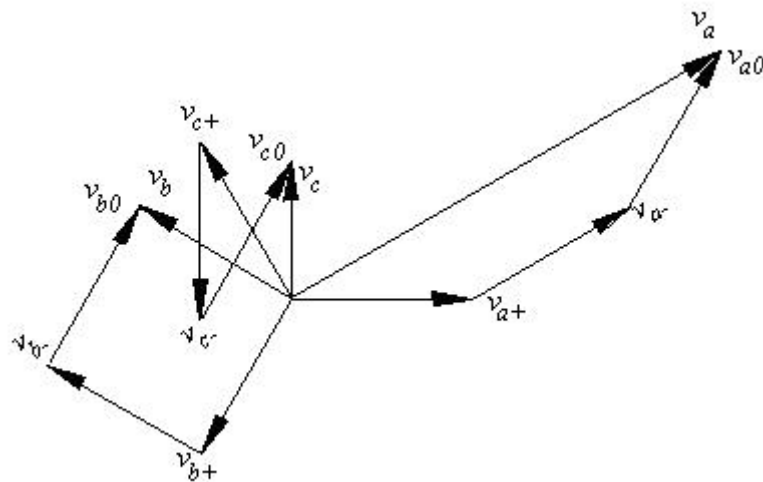
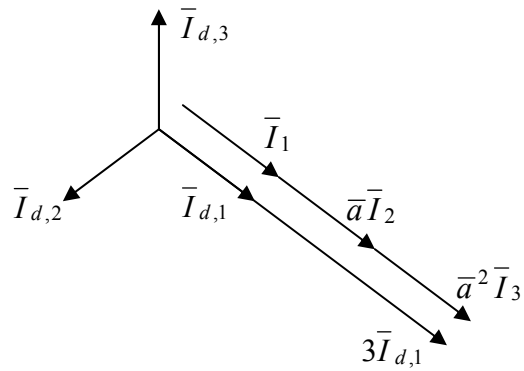
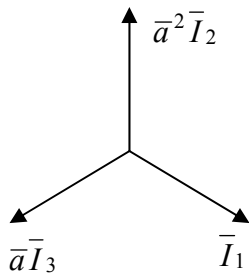
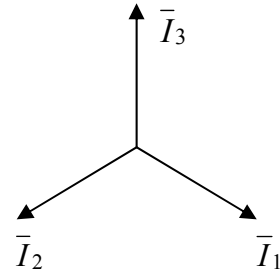
$$\bar{a}^2 = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad 1 - \bar{a}^2 = \frac{3}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \angle +30^\circ$$

سیستم سه فاز متقارن

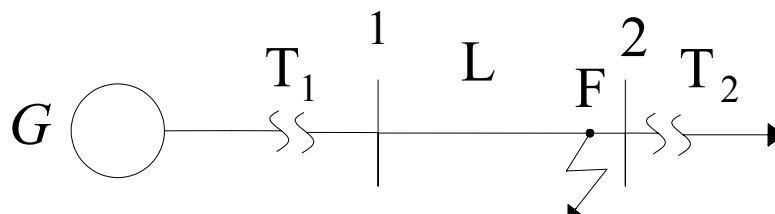
$$\bar{I}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) = 0$$

$$\bar{I}_{i,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{a} \bar{I}_3) = 0$$

$$\bar{I}_{d,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{a}^2 \bar{I}_3) = \bar{I}_1$$



مولفه هاي مستقيم در ژنراتورها محرك هستند و مولفه هاي معكوس و هموپولر صفر هستند. در دياگرام تـك خطی شبکه قدرت زیر داریم:

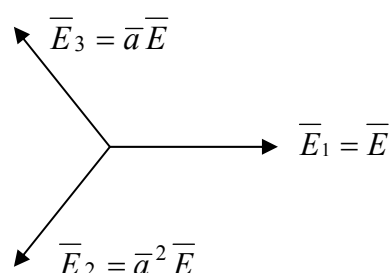


نیروهای محرك این ژنراتور يك سیستم سه فاز متقارن مستقیم است.

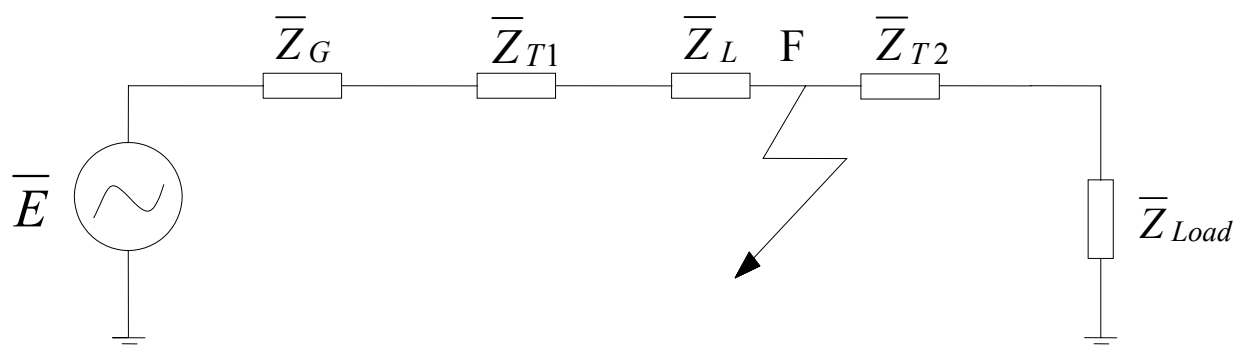
$$\bar{E}_1 = \bar{E}$$

$$\bar{E}_2 = \bar{a}^2 \bar{E}$$

$$\bar{E}_3 = \bar{a} \bar{E}$$



چون شبکه و بار متعادل و متقارن است، اگر در يك جايي از شبکه يك اتصال کوتاه پيش آيد، شبکه عيب تکفاز با زمین (فاز ۱ با زمین در نقطه P) با این اتصال کوتاه با زمین معادلات شبکه به چه صورت پيش مي آيد. قبل از عيب دياگرام تـك خطي براي حل مساله کافي است.



ولي در حالت اتصال کوتاه ديگر اين دياگرام تـك خطي را نمي شود رسم کرد، چون اين دياگرام براي حالت سالم مدار است و ولتاژها و جريان ها متعادل و متقارن خواهد بود. بايستي هم ژنراتور و هم المانهاي مدار را در سه سیستم (هموپولر، مستقيم و معكوس) نوشت و KVL را نيز نوشت.

در نقطه عیب ولتاژها و جریانهای نامتعادل داریم ولی در سر ژنراتور ولتاژها و جریانهای متعادل داریم و نامتعادلی در سر عیب و نامتعادلی در سر افت ولتاژهای خطها باعث می شود که ولتاژ در دو سر ژنراتور در همان حالت متعادل باقی بماند.

$$G \begin{cases} \bar{E}_1 = \bar{E} \\ \bar{E}_2 = \bar{a}^2 \bar{E} \\ \bar{E}_3 = \bar{a} \bar{E} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} \bar{E}_0 = 0 \\ \bar{E}_i = 0 \\ \bar{E}_d = \bar{E} \end{cases} \quad \text{در حالت متعادل و نامتعادل}$$

مقادیر L و C های بدست آمده در بررسی سیستم های قدرت ۱ در حالت متعادل است چون آنها برای شرط $\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3 = 0$ بدست آمده بودند (در سیستم مستقیم). در سیستم های دیگر لازم نیست L و C را حساب کرد. اگر \bar{Z}_G امپدانس ژنراتور باشد در آن صورت امپدانس های ترتیب های صفر، منفی و مثبت ژنراتور به قرار زیر می باشند.

$$\bar{Z}_{0,G}$$

$$\bar{Z}_{i,G}$$

$$\bar{Z}_{d,G}$$

در موتورها و در سیستم دینامیک $\bar{Z}_d \neq \bar{Z}_i$ اگر جای دو فاز با هم عوض شوند، جهت چرخش نیز عوض می شود. در ژنراتورها در سیستم استاتیکی $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ می باشند.

$$\bar{Z}_{0,L}$$

$$\bar{Z}_{i,L}$$

$$\bar{Z}_{d,L}$$

برای خطوط هوایی

$$\bar{Z}_{0,T}$$

$$\bar{Z}_{i,T}$$

$$\bar{Z}_{d,T}$$

برای ترانسفورماتورها

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{1,F} \\ \bar{V}_{2,F} \\ \bar{V}_{3,F} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} \bar{V}_{0,1} \\ \bar{V}_{i,1} \\ \bar{V}_{d,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{0,F} \\ \bar{V}_{i,F} \\ \bar{V}_{d,F} \end{bmatrix}$$

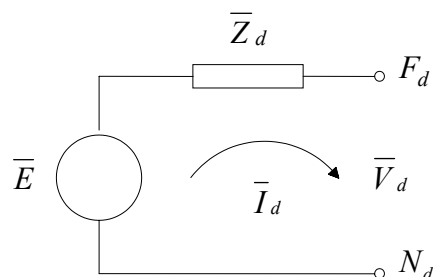
ولتاژها در محل اتصال (عیب) F

برای یکی از فازها داریم:

معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب مستقیم (مثبت)

$$\bar{E} = \bar{Z}_d \bar{I}_d + \bar{V}_d$$

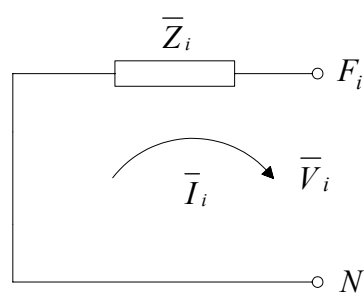
$$\bar{Z}_d = \bar{Z}_{d,G} + \bar{Z}_{d,T1} + \bar{Z}_{d,L}$$



معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب معکوس (منفی)

$$0 = \bar{Z}_i \bar{I}_i + \bar{V}_i$$

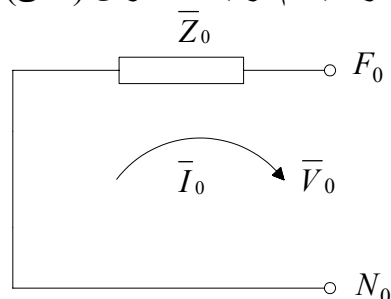
$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_{i,G} + \bar{Z}_{i,T1} + \bar{Z}_{i,L}$$



معادل تونن شبکه در سیستم ترتیب معکوس (منفی)

$$0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{0,G} + \bar{Z}_{0,T1} + \bar{Z}_{0,L}$$



با نمایش ماتریسی معادلات ترتیب های صفر، معکوس و مستقیم داریم:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{E} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_0 & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_i & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix}$$

\bar{I}_0 و \bar{I}_i نمی توانند صفر باشند چون بایستی در آن صورت \bar{V}_0 و \bar{V}_i صفر باشند. بنابراین در مواقع وقوع عیب از جمله اتصال کوتاه ها با ترکیب مدارهای معادل فوق در نقطه عیب مقادیر ولتاژها و جریان های ترتیب های مختلف و نیز مقادیر واقعی محاسبه می شوند.

اگر ژنراتور ولتاژ نامتعادل تولید کند، در شبکه قدرت \bar{E}_d و \bar{E}_i و \bar{E}_0 وجود داشته که در آن مولفه صفر و منفي مخالف صفر هستند و لذا تولید جریان در سیستم هاي معکوس و هموپولر خواهند کرد. پس اتصال کوتاه نامتقارن در محل اتصال کوتاه، تولید جریان مولفه معکوس و هموپولر خواهد کرد. برای اجزای استاتیک شبکه (ترانس-خط هوایی-بار غیر موتوری) $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ است در حالیکه برای اجزای دینامیک شبکه (ترانس-خط هوایی-بار غیر موتوری) $\bar{Z}_d \neq \bar{Z}_i$ است.

بررسی شبکه ترتیب صفر در ترانسفورماتورهای سه فاز

در ترانسفورماتورهای قدرت \bar{Z}_0 بستگی به نحوه اتصالات اولیه و ثانویه دارد. اگر نحوه اتصالات اولیه Δ باشد، \bar{Z}_0 ای را نمی شود از طرف Δ ترانسفورماتور عبور داد. اگر نقطه صفر ستاره به زمین وصل نشود $I_0 = 0$ و KCL نقض می شود. در قسمت Δ نیز بایستی $I_0 = 0$ باشد. چون سه جریان همفاز که به یک گره وصل می شوند بایستی بگونه ای باشد تا KCL نقض نشود.

اگر نقطه ستاره را با یک مقاومت \bar{Z}_n زمین کنیم از این \bar{Z}_n ، $3\bar{I}_0$ عبور می کند پس در مدار معادلی که امپدانس زمین \bar{Z}_n است و جریان $3\bar{I}_0$ از آن عبور میکند، باید امپدانس $3\bar{Z}_n$ قرار داده و جریان \bar{I}_0 از آن عبور دهیم. اگر در یک ترانس ستاره/ مثلث که در آن نقطه ستاره زمین نشده است خواهیم داشت

$$\bar{I}_0 = 0 \rightarrow \bar{Z}_0 = \infty$$

در صورتی که در یک ترانسفورماتور ستاره / مثلث که در آن نقطه ستاره زمین شده است خواهیم داشت

$$\bar{I}_0 \neq 0 \rightarrow \bar{Z}_0 \neq \infty$$

به عبارتی دیگر:

از دید ثانویه	از دید اولیه
مقداری مشخص $\bar{Z}_0 =$	ΔY (ستاره زمین شده) $\bar{Z}_0 = \infty$

برای خط هوایی و عناصر استاتیک خواهیم داشت:

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{0L} \cong 3\bar{Z}_{dl} \cong 3\bar{Z}_{il}$$

برای بار نیز \bar{Z}_0 بستگی به نحوه اتصال بار دارد. اگر بار به صورت ستاره زمین نشده باشد امپدانس هموپولر آن وجود ندارد ($\bar{Z}_0 = \infty$) ولی امپدانس توالی صفر باری که به صورت ستاره وصل شده می تواند مقداری داشته باشد.

ترانسفورماتور ستاره زمین نشده - مثلث

امپدانس طرف Δ : $\bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$ بدون نقطه زمین شده: $\bar{Z}_{0,Y} = \infty$

الف- بررسی از لحاظ الکتریکی

مجموع جریان های خارج اتصال مثلث به دلیل همفاز بودن، صفر هستند. چون این سه جریان با هم همفاز هستند، پس وجود چنین جریان هایی در هر سه حلقه بخاطر عدم وجود فازها امکان پذیر نیست.

$$\bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{0,3} = 0 \rightarrow 3\bar{I}_{0,1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{0,1} = \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,3} = 0$$

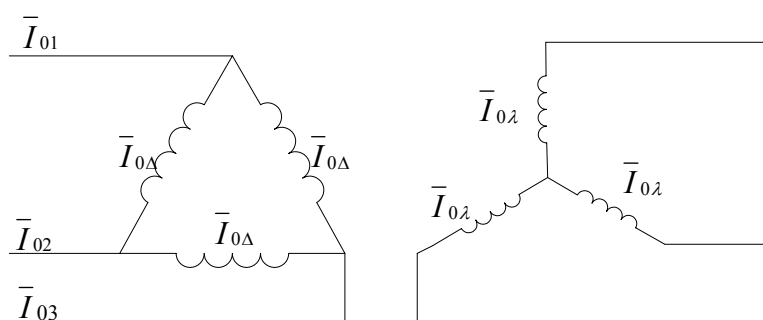
$$\bar{I}_{0,Y} = 0 \Rightarrow \bar{I}_{0,\Delta} = 0$$

پس مسیر عبور جریان وجود ندارد و امپدانس های دو طرف بی نهایت می باشند.

$$\bar{Z}_{0,Y} = \infty, \quad \bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$$

الف- بررسی از لحاظ مغناطیسی

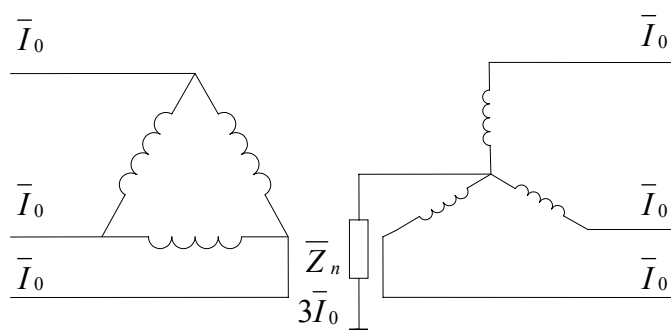
در این حالت نیز جریانی در داخل مثلث وجود ندارد



ترانسفورماتور ستاره زمین شده - مثلث

امپدانس طرف Δ : $\bar{Z}_{0,\Delta} = \infty$ بدون نقطه زمین شده: $\bar{Z}_{0,Y} \neq \infty$

در طرف با نقطه صفر زمین شده با امپدانس Z_n ، Z_0 وجود دارد در صورتی که در طرف مثلث این امپدانس برابر با بی نهایت است.



در حالت کلی داریم:

$$0 = \bar{Z}_0 \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

در صورتی که شبکه از طریق یکی از فازها به زمین متصل شود داریم:

$$0 = \bar{Z}_n (3\bar{I}_0) + \bar{Z} \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$0 = (3\bar{Z}_n + \bar{Z}) \bar{I}_0 + \bar{V}_0$$

$$\bar{Z}_0 = 3\bar{Z}_n + \bar{Z} + \dots$$

به جای سه نقطه در معادله بالا امپدانس های دیگر در مدار ترتیب صفر قرار می گیرد.

از لحاظ الکتریکی در خارج اتصال Δ داریم :

$$\bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{0,3} = 0 \rightarrow 3\bar{I}_{0,1} = 0 \rightarrow \bar{I}_{0,1} = \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,3} = 0$$

در طرف اتصال Y به دلیل برگشت جریان عیب از نقطه خنثی Y به طرف فازهای آن $\bar{I}_{0,Y} \neq 0$ است که این کار باعث القای مغناطیسی در طرف Δ می شود.

از لحاظ مغناطیسی، در داخل Δ جریان های توالی صفر اتصال مثلث با همدیگر، هم فاز بوده و لذا صفر نمی باشند $\bar{I}_{0,\Delta, \text{internal}} \neq 0$ اما جیان خارج مثلث صفر بوده $\bar{I}_{0,\Delta, \text{external}} = 0$ و بنابراین امپدانس آن بی نهایت خواهد بود.

دیاگرام شبکه ترتیب صفر در ترانسفورماتورهای سه فاز

در رسم شبکه های توالی صفر ترانسفورماتورها باید دقت بیشتری نمود زیرا شبکه های توالی صفر ترانسفورماتورها با اتصالات مختلف اولیه و ثانویه با یکدیگر تفاوت دارند. چنانچه از جریان مغناطیس کننده ترانسفورماتورها صرف نظر کنیم جریان اولیه و ثانویه با توجه به نسبت تبدیل ترانسفورماتورها بر حسب یکدیگر بدست می آیند و اگر یکی از آنها صفر باشد دیگری نیز صفر خواهد بود.

در شکل زیر انواع اتصالات ترانسفورماتورهای سه فاز و شبکه توالی صفر آنها نشان داده شده است.

پیکان های نشان داده شده نمایش وجود جریانهای توالی صفر در سیم پیچها میباشد. حال به شرح مختصر هر یک از این اتصالات می پردازیم:

الف) ترانسفورماتور Y-Y با یک اتصال زمین : اگر در یک طرف ترانسفورماتور نقطه صفر زمین نشده باشد عدم وجود جریان توالی صفر در آن طرف باعث می شود تا طرف دیگر نیز بدون جریان باشد بنابراین در شبکه توالی صفر این نوع اتصال مدار باز بین دو طرف ترانسفورماتور وجود خواهد داشت.

ب) ترانسفورماتور Y-Y با دو اتصال زمین : اگر نقاط صفر هر دو اتصال ستاره به زمین متصل باشند

در هر دو سیم پیچ جریانهای توالی صفر وجود داشته و لذا اولیه و ثانویه ترانسفورماتور در شبکه توالی صفر از طریق امپدانس توالی صفر بیکدیگر متصل می باشند. در این حالت شبکه توالی صفر دقیقاً مشابه شبکه های مثبت و منفی ترانسفورماتور است.

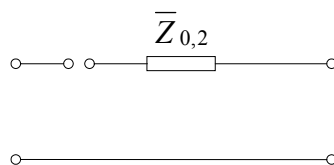
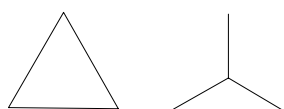
ج) ترانسفورماتور $Y-\Delta$ با اتصال زمین نقطه صفر ستاره: در این حالت چون مسیر برگشت در طرف اتصال ستاره وجود دارد جریانهایی توالی صفر در هر دو سیم پیچ وجود خواهند داشت. جریانهایی توالی صفر در داخل مثلث یک جریان گردش بوجود می آورند و مولفه های توالی صفر جریانهایی خطی این اتصال صفر خواهند بود. بنابراین امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور طرف ستاره را به شین مرجع متصل می کند و بین طرف مثلث و شین مرجع مدار باز خواهند ماند.

د) ترانسفورماتور $Y-\Delta$ بدون اتصال زمین: این اتصال حالت خاصی از قسمت ج) بوده که در آن امپدانس بین نقطه صفر ستاره و زمین بجای صفر بی نهایت می باشد. در اینصورت در هیچیک از سیم پیچها جریان توالی صفر وجود نخواهد داشت.

ه) ترانسفورماتور $\Delta-\Delta$: در این حالت چون مسیر برگشت برای جریانهایی توالی صفر وجود ندارد جریانهایی خطی ترانسفورماتور فاقد جریانهایی توالی صفر بوده و فقط ممکن است داخل اتصالات مثلث جریانهایی گردش توالی صفر وجود داشته باشد بنابراین شبکه توالی صفر این ترانسفورماتور در هر دو طرف دارای مدار باز خواهد بود. در یک سیستم قدرت با استفاده از شبکه توالی صفر عناصر و ترکیب آنها شبکه توالی صفر سیستم بدست می آید.

نوع اتصال

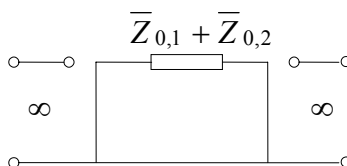
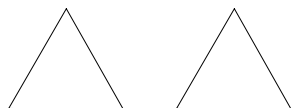
اولیه	ثانویه	نمایش فاز هموپولر (صفر)	توضیحات
			جریان ترتیب صفر می تواند آزادانه از اولیه به ثانویه انتقال یابد. $\bar{I}_0 \neq 0$
			مسیری برای عبور جریان از اولیه به ثانویه وجود ندارد. $\bar{I}_0 = 0$
			جریان مولفه صفر فقط داخل حلقه بسته مثلث و نه در خارج آن گردش خواهد کرد. $\bar{I}_{0,\Delta} = 0$, $\bar{I}_{0,Y} \neq 0$



هیچ جریان ترتیب صفر در

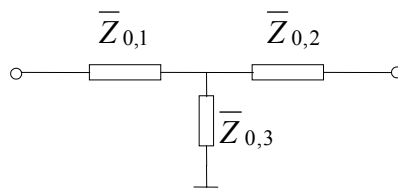
مدار ترتیب صفر عبور

نمی کند. $\bar{I}_0 = 0$



هیچ جریان ترتیب صفر

عبور نمی کند. $\bar{I}_0 = 0$

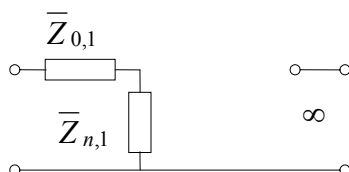
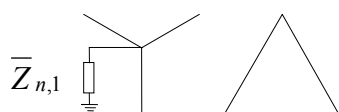
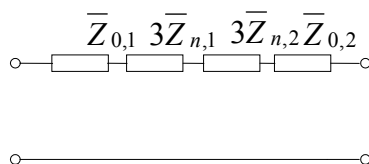
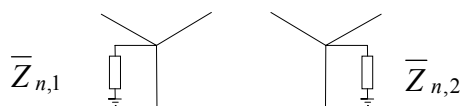
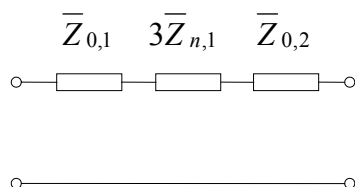
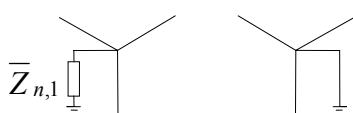
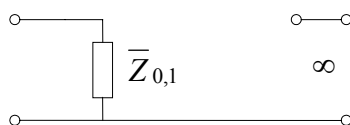
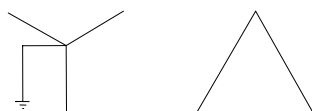
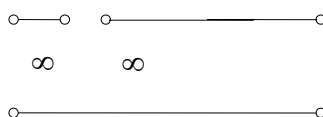
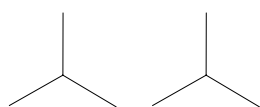


ترانسفورمر سیم پیچ ثالثیه

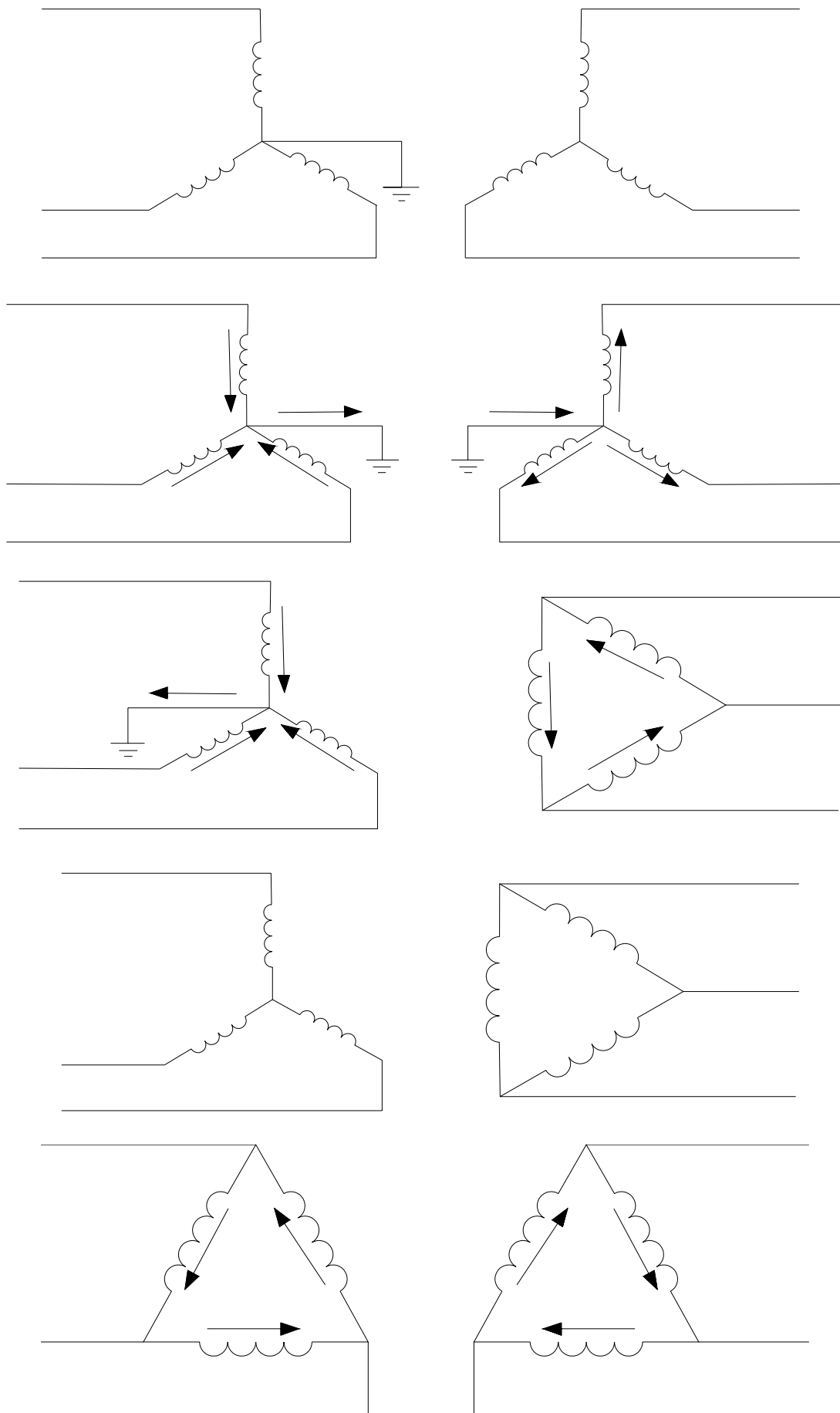
می تواند جریان ترتیب صفر

را عبور دهد. $\bar{I}_0 \neq 0$

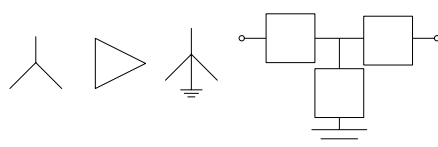
بایستی بر حسب نوع اتصال آنها را بررسی کنیم



شبکه های توالی صفر اتصال های ستاره و مثلث ترانسفورماتورها



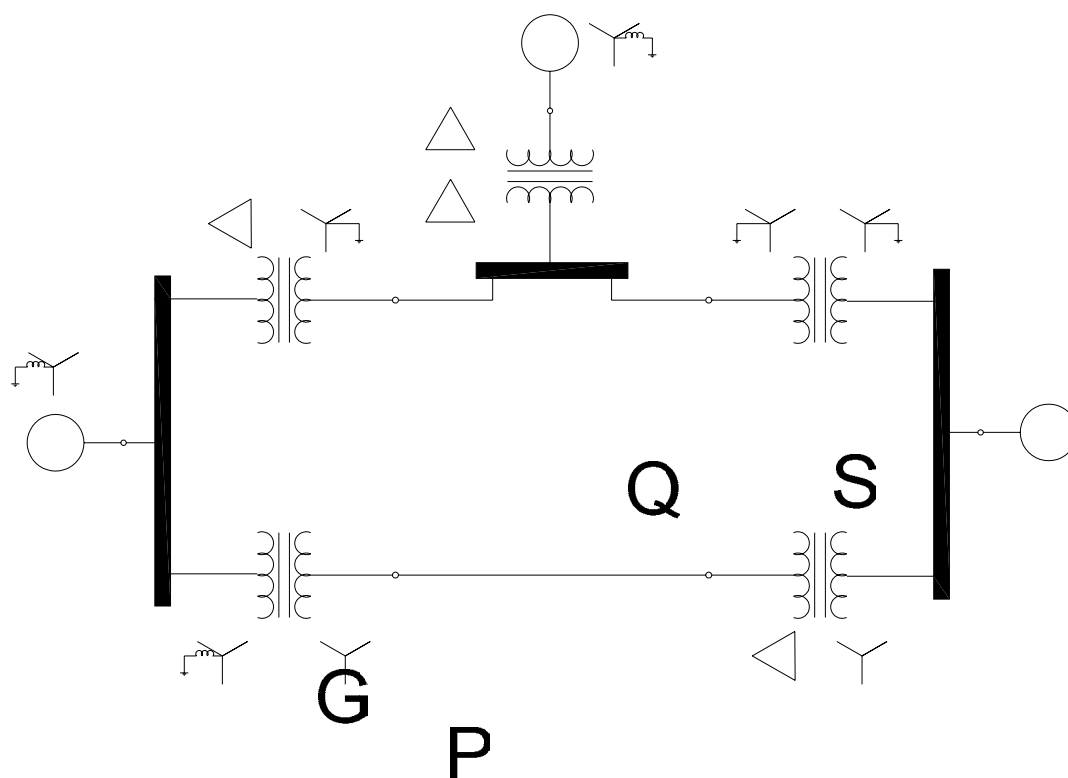
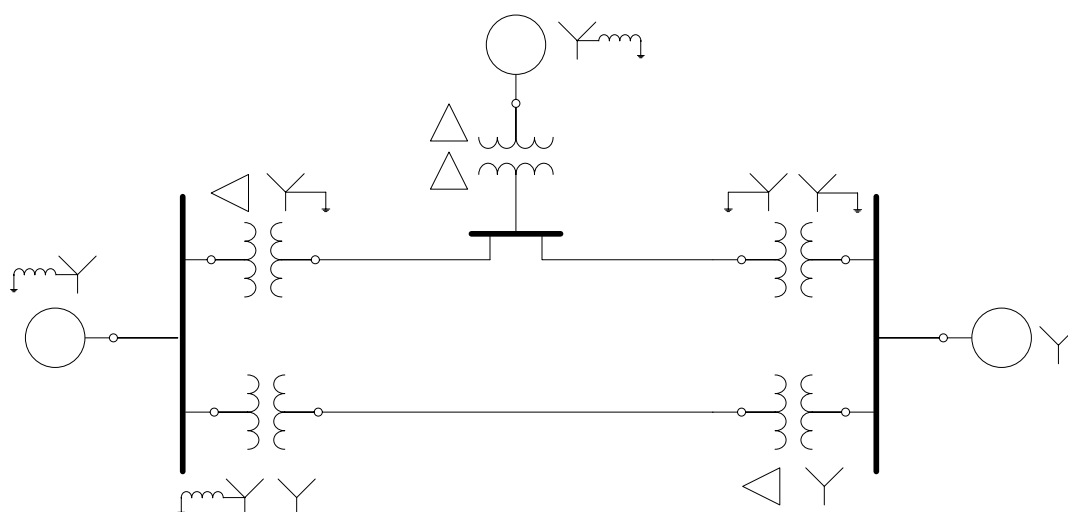
دیگرام اتصال شبکه های توالی صفر ترانسفورماتورها



شبکه توالی صفر ترانسفورماتور سه سیم پیچه

T

مثال- دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل زیر نشان داده شده است. شبکه توالی صفر این سیستم را رسم کنید.



G

K

ادامه فصل دوم

مولفه های متقارن

(Symmetrical Components)

معادلات قدرت در سیستم های سه فاز نامتعادل

برای حالت تک فاز سینوسی توان ظاهری از رابطه زیر حاصل می شود.

$$\bar{S}_{1phase} = \bar{V} \bar{I}^* = P + jQ$$

در صورتی که برای حالت سه فاز سینوسی توان ظاهری از رابطه زیر حاصل می شود.

$$\bar{S}_{3phase} = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* + \bar{V}_2 \bar{I}_2^* + \bar{V}_3 \bar{I}_3^* = \begin{bmatrix} \bar{V}_1 & \bar{V}_2 & \bar{V}_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}^*$$

در نمایش ماتریسی می توان نوشت:

$$\bar{S}_{3phase} = [\bar{S}_{3phase}]_{1 \times 1} = [\bar{V}^T]_{1 \times 3} [\bar{I}^*]_{3 \times 1} \quad \bar{V} = \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix} \quad \bar{I} = \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}$$

در سیستم سه فاز نامتعادل داریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{V} = \bar{T} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_d \end{bmatrix} \\ \bar{I} = \bar{T} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix} \end{array} \right. \quad (AB)^T = B^T \cdot A^T$$

$$\bar{S}_{3phase} = \bar{S}_{3phase} = \begin{bmatrix} \bar{V}_0 & \bar{V}_i & \bar{V}_d \end{bmatrix} \bar{T}^T \bar{T}^* \begin{bmatrix} \bar{I}_0^* \\ \bar{I}_i^* \\ \bar{I}_d^* \end{bmatrix} \quad (\bar{a})^* = \bar{a}^2$$

$$\bar{T}^T \bar{T}^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \end{bmatrix} = 3\mathbf{U}_{3 \times 3}$$

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$$

$$1 + 2\bar{a}^3 = 1 + 2 \times 1 = 3$$

$$1 + \bar{a}^2 + \bar{a}^4 = 1 + \bar{a}^2 + \bar{a} = 0$$

$$\bar{S}_{3phase} = \bar{V}_1 \bar{I}_1^* + \bar{V}_2 \bar{I}_2^* + \bar{V}_3 \bar{I}_3^*$$

$$\bar{S}_{3phase} = \begin{bmatrix} \bar{V}_0 & \bar{V}_i & \bar{V}_d \end{bmatrix} \times 3 \times \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0^* \\ \bar{I}_i^* \\ \bar{I}_d^* \end{bmatrix} = 3\bar{V}_0 \bar{I}_0^* + 3\bar{V}_i \bar{I}_i^* + 3\bar{V}_d \bar{I}_d^*$$

$$\bar{S}_{3phase} = \bar{S}_{0,3phase} + \bar{S}_{i,3phase} + \bar{S}_{d,3phase}$$

$$\begin{cases} \bar{S}_{0,3phase} = 3\bar{V}_0 \bar{I}_0^* = P_{0,3phase} + jQ_{0,3phase} \\ \bar{S}_{i,3phase} = 3\bar{V}_i \bar{I}_i^* = P_{i,3phase} + jQ_{i,3phase} \\ \bar{S}_{d,3phase} = 3\bar{V}_d \bar{I}_d^* = P_{d,3phase} + jQ_{d,3phase} \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{0,3phase} = \text{Real} \left[3\bar{V}_0 \bar{I}_0^* \right] & Q_{0,3phase} = \text{Imag} \left[3\bar{V}_0 \bar{I}_0^* \right] \\ P_{i,3phase} = \text{Real} \left[3\bar{V}_i \bar{I}_i^* \right] & Q_{i,3phase} = \text{Imag} \left[3\bar{V}_i \bar{I}_i^* \right] \\ P_{d,3phase} = \text{Real} \left[3\bar{V}_d \bar{I}_d^* \right] & Q_{d,3phase} = \text{Imag} \left[3\bar{V}_d \bar{I}_d^* \right] \end{cases}$$

$$\begin{cases} P_{3phase} = P_{0,3phase} + P_{i,3phase} + P_{d,3phase} \\ Q_{3phase} = Q_{0,3phase} + Q_{i,3phase} + Q_{d,3phase} \end{cases}$$

$$\text{ضریب توان در سیستم نامتعادل} = \frac{P_{0,3phase} + P_{i,3phase} + P_{d,3phase}}{\sqrt{(P_{0,3phase} + P_{i,3phase} + P_{d,3phase})^2 + (Q_{0,3phase} + Q_{i,3phase} + Q_{d,3phase})^2}}$$

ضریب توان در سیستم های متعادل قابل اندازه گیری است. این پارامتر در سیستم نامتعادل یک مفهوم ریاضی بوده و مفهوم فیزیکی ندارد و همچنین قابل اندازه گیری با $\cos \varphi$ مترنیز نمی باشد.

توان متغیر در سیستم های سه فاز نامتعادل

$$[\bar{S}_F]_{1 \times 1} = [\bar{V}^T]_{1 \times 3} \cdot [\bar{I}]_{3 \times 1}$$

نامتعادلی ولتاژ یا نامتعادلی جریان باعث می شود توان متغیر غیر صفر باشد. وجود توان متغیر نشانگر نامتعادلی سیستم قدرت خواهد بود. توان متغیر در سیستم سه فاز متعادل برابر صفر است.

$$\bar{S}_F = \bar{V}^T \cdot \bar{I} = [\bar{V}_0 \quad \bar{V}_i \quad \bar{V}_d] \bar{T}^T \cdot \bar{T} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix}$$

$$\bar{T}^T \cdot \bar{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{S}_F = [\bar{V}_0 \quad \bar{V}_i \quad \bar{V}_d] \begin{bmatrix} 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 \\ 0 & 3 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix}$$

$$\bar{S}_F = [\bar{V}_0 \quad \bar{V}_i \quad \bar{V}_d] \begin{bmatrix} 3\bar{I}_0 \\ 3\bar{I}_d \\ 3\bar{I}_i \end{bmatrix} = 3\bar{V}_0\bar{I}_0 + 3\bar{V}_i\bar{I}_d + 3\bar{V}_d\bar{I}_i$$

در سیستم متعادل، تمام ولتاژها و جریان ها ی سیستم هموپولر و معکوس، صفر هستند.

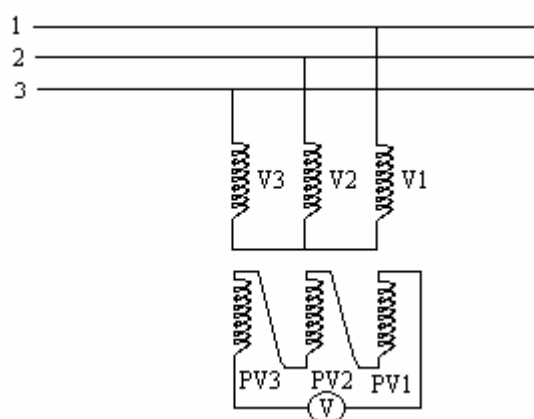
$$(\bar{S}_F)_{\text{Symmetrical System}} = [\bar{V}_0 \quad \bar{V}_i \quad \bar{V}_d] \begin{bmatrix} 3\bar{I}_0 \\ 3\bar{I}_d \\ 3\bar{I}_i \end{bmatrix} = 3\bar{V}_0\bar{I}_0 + 3\bar{V}_i\bar{I}_d + 3\bar{V}_d\bar{I}_i = 0$$

$$\bar{V}_0 = \bar{I}_0 = \bar{V}_i = \bar{I}_i = 0$$

اندازه گیری مولفه های هموپولر و معکوس و مستقیم

وقتی اتصال کوتاه در شبکه رخ می دهد، مولفه های هموپولر و معکوس در شبکه که در حالت عادی صفر بودند، غیر صفر خواهد بود. برای دستور قطع دادن به کلیدی در شبکه قدرت باید یک سیستم اندازه گیری داشته باشیم که مولفه های معکوس و هموپولر را اندازه گیری کند. در حالت عادی این پارامترها برابر صفر می باشد. اگر عیبی رخ دهد، این جریانه را از یک رله عبور داده تا دستور قطع به یک دژنکتور ارسال گردد؛ و یا می توان در یک سیستم استاتیک، جریان یا ولتاژ معکوس را به نسبتی کاهش داده و به گیت یک ترستور داد تا دژنکتور را در مدار باز کند. سیستم های اندازه گیرنده مولفه های هموپولر، معکوس و مستقیم را می خواهیم بدانیم.

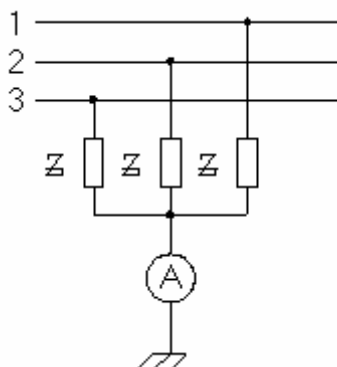
الف- اندازه گیری مولفه هموپولر ولتاژ بصورت زیر انجام می شود.



$$\bar{V} = \rho(\bar{V}_1 + \bar{V}_2 + \bar{V}_3) = \begin{cases} 0 & \text{(Symmetrical)} \\ 3\rho\bar{V}_0 & \text{(Unsymmetrical)} \end{cases}$$

$$\bar{V} \propto \bar{V}_0$$

ب- امپدانس بزرگی را در مدار داریم. جریان عبوری در حالت متعادل که جمع سه جریان عبوری از آمپر متر است، برابر صفر است.

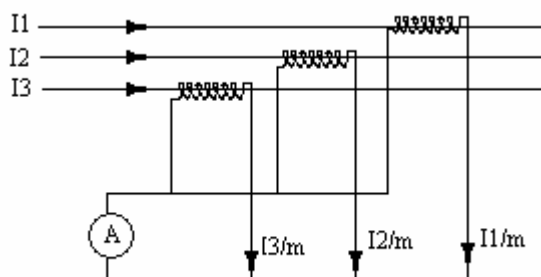


در حالت متعادل و نامتعادل داریم:

$$\bar{I}_A = \frac{\bar{V}_1}{\bar{Z}} + \frac{\bar{V}_2}{\bar{Z}} + \frac{\bar{V}_3}{\bar{Z}} = \begin{cases} 0 & \text{(Symmetrical)} \\ \frac{1}{\bar{Z}} \times 3\bar{V}_0 & \text{(Unsymmetrical)} \end{cases}$$

$$\bar{I}_A \propto \bar{V}_0$$

ج- سه ترانسفورماتور جریان در فازها قرار می دهیم



در حالت متعادل و نامتعادل داریم:

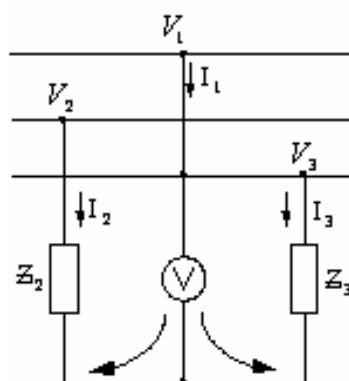
$$\bar{I}_A = \frac{1}{m} (\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) = \begin{cases} 0 & \text{(Symmetrical)} \\ \frac{1}{m} \times 3\bar{I}_0 & \text{(Unsymmetrical)} \end{cases}$$

$$\bar{I}_A \propto \bar{I}_0$$

د- در مدار زیر $\bar{Z}_1 = R$ امپدانس داخلی ولت متر است. \bar{Z}_2 و \bar{Z}_3 را باید آنچنان پیدا کرد تا:

۱- ولت متر ولتاژی متناسب با ولتاژ معکوس ایجاد کند.

۲- ولت متر ولتاژی متناسب با ولتاژ مستقیم ایجاد کند.



$$\text{Direct: } \begin{cases} \bar{Z}_2 = R + j\sqrt{3}R \\ \bar{Z}_3 = R - j\sqrt{3}R \end{cases}$$

$$\text{Inverse: } \begin{cases} \bar{Z}_2 = R - j\sqrt{3}R \\ \bar{Z}_3 = R + j\sqrt{3}R \end{cases}$$

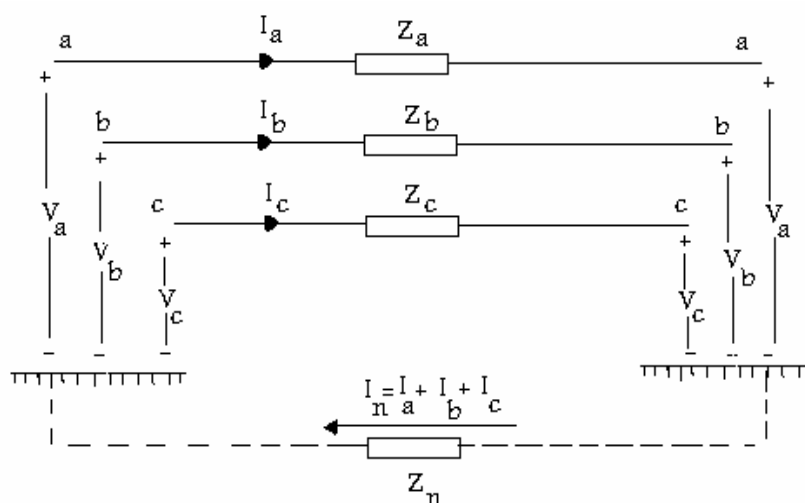
امپدانس های ترتیب صفر، مستقیم و معکوس در خط انتقال

اگر امپدانس های عنصری از سیستم، متقارن باشند رابطه افت ولتاژ هرتوالی به جریان همان توالی بستگی داشته و امپدانسی که در معادله افت ولتاژ و جریان ظاهر می شود امپدانس آن توالی نامیده می شود.

خوشبختانه امپدانس همه عناصر سیستم، نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خطوط انتقال متقارن می باشند. با توجه به استقلال روابط سه توالی از یکدیگر و متقارن بودن بردارهای هرتوالی، می توان برای هر عنصر سیستم مدار معادل یک فاز هریک از توالی هارادر محاسبات منظور نمود. با ترکیب مدارهای معادل یک فاز عناصر سیستم برای هر توالی، شبکه آن توالی بدست می آید. به این ترتیب به جای دیاگرام امپدانس سه شبکه امپدانسی ترتیب صفر، معکوس و مستقیم مورد نیاز خواهند بود. هریک از این شبکه ها شامل کمیت های همان توالی می باشد. مثلاً شبکه توالی مستقیم شامل ولتاژ و ولتاژ توالی مستقیم، جریان توالی مستقیم، امپدانس توالی مستقیم و... می باشد.

لازم به تذکر است که بردارهای نیروهای محرکه الکتریکی ماشینهای سنکرون دارای توالی مستقیم بوده و فقط در شبکه های توالی مستقیم ظاهر می شوند.

عناصر سیستمهای قدرت از امپدانس های متعادل (متقارن) تشکیل شده اند و فقط در شرایط وقوع خطاهای نامتقارن به امپدانس های نامتعادل برخورد می کنیم. شکل زیر قسمتی از سیستم با سه امپدانس $\bar{Z}_{1,L}$ ، $\bar{Z}_{2,L}$ و $\bar{Z}_{3,L}$ را نشان می دهد و امپدانس مسیر زمین $\bar{Z}_{n,L}$ می باشد.



سیستم قدرت با سه خط انتقال با امپدانس های نامتعادل

افت ولتاژ دوسر این امپدانس ها را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\bar{V}_{1',L} = \bar{Z}_{1,L} \bar{I}_{1,L} + \bar{Z}_{n,L} (\bar{I}_{1,L} + \bar{I}_{2,L} + \bar{I}_{3,L})$$

$$\bar{V}_{2',L} = \bar{Z}_{2,L} \bar{I}_{2,L} + \bar{Z}_{n,L} (\bar{I}_{1,L} + \bar{I}_{2,L} + \bar{I}_{3,L})$$

$$\bar{V}_{3',L} = \bar{Z}_{3,L} \bar{I}_{3,L} + \bar{Z}_{n,L} (\bar{I}_{1,L} + \bar{I}_{2,L} + \bar{I}_{3,L})$$

و یا به شکل ماتریسی داریم:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{11',L} \\ \bar{V}_{22',L} \\ \bar{V}_{33',L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1,L} + \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} \\ \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{2,L} + \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} \\ \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{3,L} + \bar{Z}_{n,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{1,L} \\ \bar{I}_{2,L} \\ \bar{I}_{3,L} \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{123,L} = \bar{Z}_{123,L} \bar{I}_{123,L}$$

با قرار دادن $\bar{V}_{123,L} = \bar{T} \bar{V}_{0id,L}$ و $\bar{I}_{123,L} = \bar{T} \bar{I}_{0id,L}$ در رابطه اخیر داریم:

$$\bar{T} \bar{V}_{0id,L} = \bar{Z}_{123,L} \bar{T} \bar{I}_{0id,L}$$

واز آنجا $\bar{V}_{0id,L}$ را بدست می آوریم:

$$\bar{V}_{0id,L} = \bar{T}^{-1} \bar{Z}_{123,L} \bar{T} \bar{I}_{0id,L} = \bar{Z}_{0id,L} \bar{I}_{0id,L}$$

$$\bar{Z}_{0id,L} = \bar{T}^{-1} \bar{Z}_{123,L} \bar{T}$$

معادله فوق، رابطه ماتریس امپدانس مولفه های متقارن $\bar{Z}_{0id,L}$ را برحسب ماتریس امپدانس سیستم اصلی $\bar{Z}_{123,L}$ نشان می دهد. با استفاده از این معادله $\bar{Z}_{0id,L}$ را بدست می آوریم:

$$\bar{Z}_{0id,L} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1,L} + \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} \\ \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{2,L} + \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} \\ \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{3,L} + \bar{Z}_{n,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix}$$

$$\bar{Z}_{0id,L} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1,L} + \bar{Z}_{2,L} + \bar{Z}_{3,L} + 9\bar{Z}_{n,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{3,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}\bar{Z}_{3,L} \\ \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}\bar{Z}_{3,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{Z}_{2,L} + \bar{Z}_{3,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{3,L} \\ \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{3,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{a}^2\bar{Z}_{2,L} + \bar{a}\bar{Z}_{3,L} & \bar{Z}_{1,L} + \bar{Z}_{2,L} + \bar{Z}_{3,L} \end{bmatrix}$$

اگر امپدانس ها متقارن باشند، داریم:

$$\bar{Z}_{1,L} = \bar{Z}_{2,L} = \bar{Z}_{3,L} = \bar{Z}_L$$

$$\bar{Z}_{0id,L} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_L + 3\bar{Z}_{n,L} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_L & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_L \end{bmatrix}$$

و لذا می توان نوشت:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{0,L} \\ \bar{V}_{i,L} \\ \bar{V}_{d,L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_L + 3\bar{Z}_{n,L} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_L & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,L} \\ \bar{I}_{i,L} \\ \bar{I}_{d,L} \end{bmatrix}$$

و از آنجا:

$$\bar{V}_{0,L} = (\bar{Z}_L + 3\bar{Z}_{n,L})\bar{I}_{0,L} = \bar{Z}_{0,L}\bar{I}_{0,L}$$

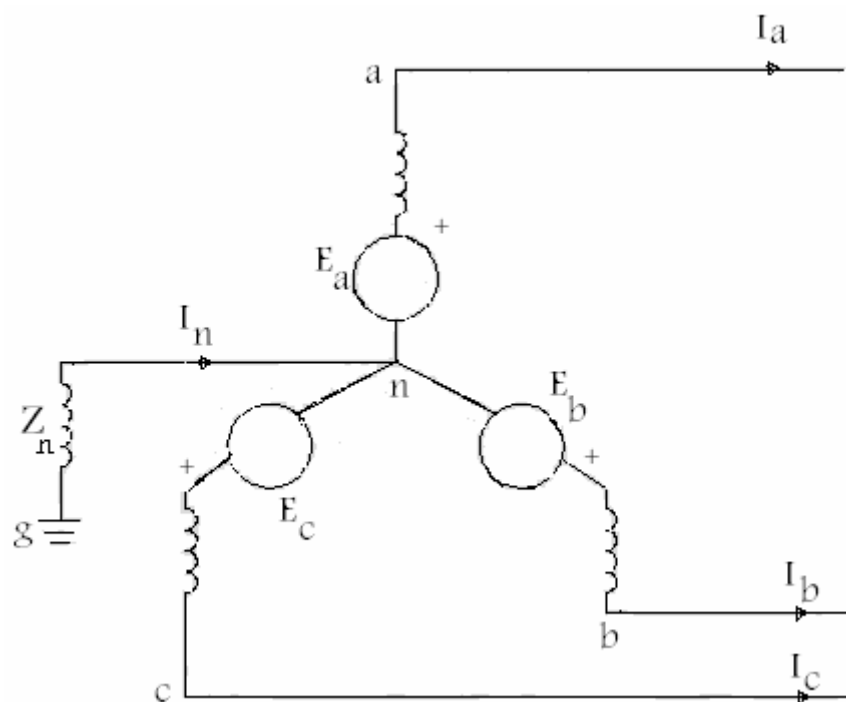
$$\bar{V}_{i,L} = \bar{Z}_L\bar{I}_{i,L} = \bar{Z}_{i,L}\bar{I}_i$$

$$\bar{V}_{d,L} = \bar{Z}_L\bar{I}_{d,L} = \bar{Z}_{d,L}\bar{I}_{d,L}$$

امپدانس های $\bar{Z}_{0,L}$ ، $\bar{Z}_{i,L}$ و $\bar{Z}_{d,L}$ به ترتیب به امپدانس های توالی صفر، معکوس (منفی) و مستقیم (مثبت) خط انتقال موسومند. همان طوری که ملاحظه می شود که سه رابطه اخیر از یکدیگر مستقل بوده و ولتاژ هرتوالی فقط به جریان توالی مربوطه بستگی دارد.

امپدانس های ترتیب صفر، مستقیم و معکوس در ژنراتور سنکرون

شکل زیر یک ژنراتور سنکرون را که نقطه صفر آن توسط یک راکتور زمین شده است نشان می دهد. $\bar{E}_{1,G}$ ، $\bar{E}_{2,G}$ و $\bar{E}_{3,G}$ نیروهای محرکه الکتریکی ژنراتور سنکرون و $\bar{I}_{1,G}$ ، $\bar{I}_{2,G}$ و $\bar{I}_{3,G}$ جریان های فازی می باشند.



مدار معادل ژنراتور سنکرون سه فاز

اگر از برجستگی قطب ها صرف نظر شود، در شرایط بار داری ماشین که جریان های $\bar{I}_{1,G}$ ، $\bar{I}_{2,G}$ و $\bar{I}_{3,G}$ متقارن می باشند و رابطه نیروی محرکه الکتریکی با ولتاژ و جریان فازها به ترتیب زیر بیان می شود:

$$\bar{E}_{1,G} = \bar{V}_{1,G} + \bar{Z}_{1,G}\bar{I}_{1,G}$$

$$\bar{E}_{2,G} = \bar{V}_{2,G} + \bar{Z}_{2,G}\bar{I}_{2,G}$$

$$\bar{E}_{3,G} = \bar{V}_{3,G} + \bar{Z}_{3,G}\bar{I}_{3,G}$$

در اینجا $\bar{Z}_{s,G}$ امپدانس سنکرون ماشین است. سیم پیچ های استاتور در ماشین کاملاً متعادل بوده و لذا نیروهای محرکه الکتریکی همواره یک سیستم برداری متقارن را می سازند، یعنی:

$$\bar{E}_{123,G} = \begin{bmatrix} \bar{E}_{1,G} \\ \bar{E}_{2,G} \\ \bar{E}_{3,G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{E}_{1,G} \\ \bar{a}^2 \bar{E}_{1,G} \\ \bar{a} \bar{E}_{1,G} \end{bmatrix} = \bar{E}_{1,G} \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{a}^2 \\ \bar{a} \end{bmatrix}$$

بنابراین معادله ولتاژها را می توان به این صورت نوشت:

$$\bar{E}_{1,G} \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{a}^2 \\ \bar{a} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{1,G} \\ \bar{V}_{2,G} \\ \bar{V}_{3,G} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{Z}_{s,G} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{s,G} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{s,G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{1,G} \\ \bar{I}_{2,G} \\ \bar{I}_{3,G} \end{bmatrix}$$

$$\bar{E}_{123,G} = \bar{V}_{123,G} + \bar{Z}_{123,G} \bar{I}_{123,G}$$

چون جملات غیرقطری در ماتریس $\bar{Z}_{123,G}$ برابر صفر هستند، لذا محاسبات بر مبنای یک فاز انجام می شود. حال اگر خطای نامتقارنی در ترمینال های ژنراتور اتفاق بیفتد، جریان های نامتقارن $\bar{I}_{1,G}$ ، $\bar{I}_{2,G}$ و $\bar{I}_{3,G}$ در آن جاری می شوند و اگر خطا به طریقی به زمین مربوط باشد. جریان $\bar{I}_{n,G} = \bar{I}_{1,G} + \bar{I}_{2,G} + \bar{I}_{3,G}$ از $\bar{Z}_{n,G}$ عبور خواهد کرد. در اینصورت در ماتریس امپدانس ژنراتور جملات غیرقطری صفر نبوده و این ماتریس بصورت زیر نوشته می شود:

$$\bar{Z}_{123,G} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1,G} & \bar{Z}_{2,G} & \bar{Z}_{3,G} \\ \bar{Z}_{3,G} & \bar{Z}_{1,G} & \bar{Z}_{2,G} \\ \bar{Z}_{2,G} & \bar{Z}_{3,G} & \bar{Z}_{1,G} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \bar{Z}_{11,G} = \bar{Z}_{22,G} = \bar{Z}_{33,G} = \bar{Z}_{1,G} \\ \bar{Z}_{12,G} = \bar{Z}_{23,G} = \bar{Z}_{31,G} = \bar{Z}_{2,G} \\ \bar{Z}_{13,G} = \bar{Z}_{21,G} = \bar{Z}_{32,G} = \bar{Z}_{3,G} \end{cases}$$

یعنی کوپلاژ مغناطیسی فاز ۱ نسبت به فازهای ۲ و ۳ مشابه کوپلاژ مغناطیسی فاز ۲ نسبت به فازهای ۱ و ۳ و کوپلاژ مغناطیسی فاز ۳ نسبت به فازهای ۱ و ۲ می باشد.

با قراردادن $\bar{I}_{123,G} = \bar{T} \bar{I}_{0id,G}$ و $\bar{V}_{123,G} = \bar{T} \bar{V}_{0id,G}$ در رابطه اخیر داریم:

$$\bar{T} \bar{E}_{0id,G} = \bar{T} \bar{V}_{0id,G} + \bar{Z}_{123,G} \bar{T} \bar{I}_{0id,G}$$

یا می توان نوشت:

$$\bar{E}_{0id,G} = \bar{V}_{0id,G} + \bar{Z}_{0id,G} \bar{I}_{0id,G}$$

که در آن:

$$\bar{E}_{0id,G} = \bar{T}^{-1} \bar{E}_{123,G} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \bar{a}^2 \\ \bar{a} \end{bmatrix} \bar{E}_{1,G} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{E}_{1,G} \end{bmatrix}$$

و ماتریس امپدانس توالی ژنراتور $\bar{Z}_{0id,G}$ عبارتست از:

$$\bar{Z}_{0id,G} = \bar{T}^{-1} \bar{Z}_{123,G} \bar{T} = \begin{bmatrix} \bar{Z}_{1,G} + \bar{Z}_{2,G} + \bar{Z}_{3,G} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{1,G} + \bar{a} \bar{Z}_{2,G} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{3,G} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{1,G} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{2,G} + \bar{a} \bar{Z}_{3,G} \end{bmatrix}$$

در اینجا امپدانس های توالی ژنراتور را به ترتیب زیر تعریف می کنیم:

$$\bar{Z}_{0,G} = \bar{Z}_{1,G} + \bar{Z}_{2,G} + \bar{Z}_{3,G} \quad \text{امپدانس توالی صفر ژنراتور}$$

$$\bar{Z}_{i,G} = \bar{Z}_{1,G} + \bar{a} \bar{Z}_{2,G} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{3,G} \quad \text{امپدانس توالی معکوس (منفی) ژنراتور}$$

$$\bar{Z}_{d,G} = \bar{Z}_{1,G} + \bar{a}^2 \bar{Z}_{2,G} + \bar{a} \bar{Z}_{3,G} \quad \text{امپدانس توالی مستقیم (مثبت) ژنراتور}$$

بنابراین معادله ولتاژها بصورت فرم ماتریسی زیر نوشته می شود:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{0,G} \\ \bar{V}_{i,G} \\ \bar{V}_{d,G} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \bar{E}_{1,G} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \bar{Z}_{0,G} & 0 & 0 \\ 0 & \bar{Z}_{i,G} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{Z}_{d,G} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,G} \\ \bar{I}_{i,G} \\ \bar{I}_{d,G} \end{bmatrix}$$

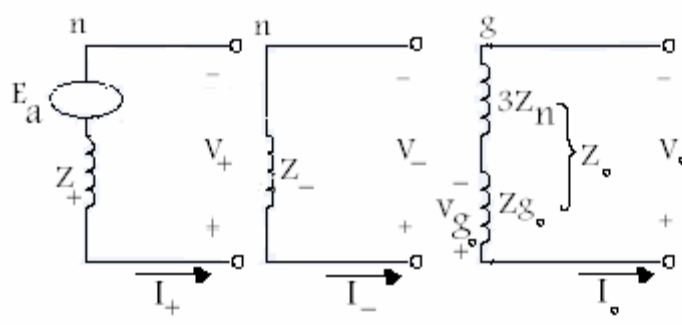
و یا:

$$0 = \bar{Z}_{0,G} \bar{I}_{0,G} + \bar{V}_{0,G}$$

$$0 = \bar{Z}_{i,G} \bar{I}_{i,G} + \bar{V}_{i,G}$$

$$\bar{E}_{1,G} = \bar{Z}_{d,G} \bar{I}_{d,G} + \bar{V}_{d,G}$$

همان طوری که ملاحظه می شود چون ماتریس $\bar{Z}_{0id,G}$ یک ماتریس قطری است، روابط ولتاژها و جریانها در سه شبکه توالی صفر، معکوس و مستقیم از یکدیگر مستقل می باشند ضمناً ظاهر شده است. باتوجه به سه رابطه اخیر می توان شبکه های توالی همچنان که انتظار می رفت نیروی محرکه الکتریکی ژنراتور فقط در شبکه توالی مثبت ژنراتور را رسم نمود. شکل زیر شبکه های توالی صفر، معکوس و مستقیم ژنراتور را برای فاز ۱ نشان می دهد.



شبکه های ترتیب های صفر، معکوس و مستقیم ژنراتور سنکرون

باید دقت نمود که V_+ و V_o و V_{go} ولتاژهای توالی فاز a ژنراتور نسبت به نقطه صفر آن (n) می باشند. در عمل این ولتاژها را نسبت به زمین (نقطه g) در نظر می گیرند. در شبکه های توالی مثبت و منفی جریان عبوری از Z_n صفر بوده و لذا نقطه n با زمین هم پتانسیل خواهد بود. بنابراین برای این دو شبکه از دیدگاه ولتاژها نقاط n و g یکسان هستند. در شبکه توالی صفر، جریان $3I_o$ از Z_n عبور می کند و لذا پتانسیل نقطه صفر (n) به اندازه $3Z_n I_o$ کمتر از پتانسیل زمین (نقطه g) است. با اضافه کردن امپدانس $3Z_n$ بین نقاط n و g امپدانس کل توالی صفر ژنراتور Z_o بدست می آید:

$$Z_o = Z_{go} + 3Z_n \quad (37-12)$$

حال رابطه ولتاژ و جریان را در شبکه های توالی ژنراتور بصورت زیر می نویسیم:

$$0 = Z_o I_o + V_o \quad (38-12)$$

$$0 = Z_- I_- + V_- \quad (39-12)$$

$$E_a = Z_+ I_+ + V_+ \quad (40-12)$$

در این روابط شین مرجع، زمین می باشد.

اگر ژنراتور تحت شرایط متقارن کار کند، توالی ولتاژها و جریان های سه فاز آن مثبت بوده و میدان دوار استاتور نسبت به رتور ساکن می باشد. بنابراین بر اثر عبور جریان توالی مثبت از ژنراتور امپدانسهای توالی مثبت ماشین، بستگی به جریان اتصال کوتاه مورد نیاز، عبارتند از:

$$Z_+ = jX_d \quad \text{حالت ماندگار}$$

$$Z_+ = jX_d' \quad \text{حالت گذرا}$$

$$Z_+ = jX_d'' \quad \text{حالت زیرگذرا}$$

روش محاسبه و اندازه گیری امپدانس های توالی منفی و صفر در کتب ماشینهای الکتریکی آمده است و از بحث این کتاب خارج است. جدول (۱۱-۱) مقادیر عمومی راکتانسهای توالی منفی و صفر ماشینهای الکتریکی را نشان می دهد. با کمی دقت در جدول مذکور ملاحظه می شود که راکتانس توالی منفی ماشینها (X_-) تقریباً با راکتانس توالی مثبت آنها (X_d) برابر است.

$$Z_i \approx jX_d$$

۱۲-۷ امپدانسهای توالی در خطوط انتقال و ترانسفورماتورها:

روابط (۱۲-۲۴) تا (۱۲-۲۶) نشان می دهند که اگر بین فازهای یک عنصر غیرفعال کوپلاژ مغناطیسی وجود نداشته باشد رابطه بین جریان و ولتاژ هر یک از توالی ها مستقل از توالی های دیگر است. در فصل سوم هنگامی که اندوکتانس و کپاسیتانس خطوط انتقال را با توجه به کوپلاژ مغناطیسی فازها بدست آوردیم، فقط از خاصیت متقارن بودن جریانهها استفاده کردیم و ترتیب خاصی برای توالی فازها مورد نظر نبوده است. بنابراین نتایج بدست آمده برای هر دو امپدانس توالی مثبت و منفی صدق می نماید.

امپدانس توالی در خطوط انتقال:

بعبارت دیگر امپدانس توالی منفی خط انتقال نیز همانند امپدانس توالی مثبت آن با امپدانس خط انتقال برابر است.

$$Z_i = Z_d = Z_{line}; X_{line} = LW$$

هنگامی که از خط انتقال فقط جریان توالی صفر عبور کند، جریان فازها یکسان بوده و جریان برگشت از طریق سیمهای زمین، خود زمین و یا هر دو برقرار می گردد. از آنجائیکه جریان توالی صفر در هر سه فاز خط انتقال یکسان می باشد، میدان مغناطیسی ایجاد شده بر اثر آن کاملاً با میدانهای مغناطیسی ایجاد شده بر اثر جریانهای توالی مثبت و یا منفی متفاوت است. در نتیجه راکتانس القایی توالی صفر یک خط انتقال هوایی باراکتانس توالی مثبت آن متفاوت بوده و حدود ۲ الی ۳/۵ برابر آن بوده است.

$$Z_o = 2 - 3.5 Z_d \text{ خط انتقال}$$

امپدانس توالی در ترانسفورماتورها:

امپدانس توالی مثبت ترانسفورماتور همان امپدانس پراکندگی آن می باشد، و چون ترانسفور - ماتور نیز مانند خط انتقال یک عنصر ساکن (غیر دوار) است، اگر ترتیب فازها از abc به acb تغییر یابد امپدانس پراکندگی آن تغییری نمی کند. در نتیجه امپدانسهای توالی مثبت و منفی ترانسفورماتور مشابه اند، یعنی:

$$Z_+ = Z_- = Z_L \quad (۴۱-۱۲)$$

اگر جریانهای توالی صفر از هر دو سیم پیچ ترانسفورماتور عبور کنند، امپدانس توالی صفر ترانسفورماتور را خواهیم داشت. گرچه بر اساس روابط (۱۲-۲۴) تا (۱۲-۲۶) برای یک عنصر غیر فعال سری امپدانس توالی صفر با امپدانسهای توالی مثبت و منفی آن کمی متفاوت است، لیکن در محاسبات سیستم ها معمولاً امپدانسهای توالی مثبت، منفی و صفر ترانسفور - ماتورها را یکسان فرض می کنند $Z_o \approx Z_+ = Z_-$ امپدانس توالی در خطوط انتقال هوایی و کابلها:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln D_m^6 / D_s \quad (۱) \text{ چون خط هوایی یک سیستم استاتیکی است.}$$

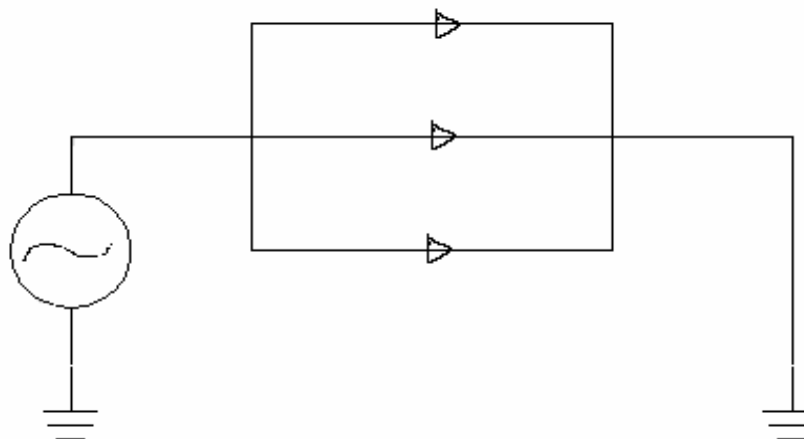
$$X_d = X_i = LW \quad (0.35-0.45) \Omega / km \quad (۲) \text{ پس } X_d = X_i \text{ است.}$$

$$X_o \cong 3X_d \quad (1.05-1.35) \Omega / km$$

(۳) برای اندازه گیری X_o ابتدا وانتها را بهم وصل کرده و بوسیله یک منبع تکفاز جریان از آن عبور می دهیم که جریانهای همفاز از آن عبور می کند.

در خطوط هوایی $X \gg R$

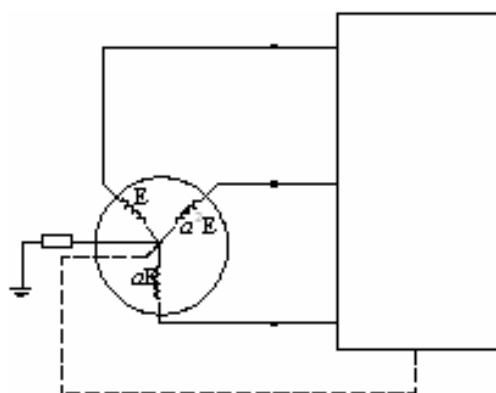
در کابلها ی زیر زمینی R و X در حدود هم هستند ولی در مقایسه با شبکه قدرت سهم کوچکی را تشکیل می دهند و از R صرف نظر می کنیم.



محاسبه امپدانس مستقیم، معکوس و هموپولر ژنراتور سنکرون

نیروهای محرکه تولید شده در سیم پیچهای یک ژنراتور سه فاز عبارتند از $E, a^2 E, aE$.

این ژنراتور مطابق شکل زیر یک شبکه سه فاز را تغذیه میکند. هر یک از سیم پیچهای ژنراتور دارای L, R بوده و $M_{np} i_p$ فلوی مغناطیسی القا شده به وسیله جریان i_p در فاز n است.



چون سیم پیچهای هر سه فاز متقارن می باشند فرض می کنیم:

$$M_{12} = M_{23} = M_{31} = M$$

$$M_{21} = M_{32} = M_{13} = M'$$

مطلوب است :

الف-معادلات ولتاژ V_1, V_2, V_3 در سرهای خروجی این ژنراتور.

ب-امپدانس مستقیم معکوس هموپولر این ژنراتور بر حسب M, M', L .

ادامه فصل دوم

مولفه های متقارن

(Symmetrical Components)

ترانسفورماتور دو پیچکه

چون این المان در سیستم های سه فاز يك المان استاتیك است، لذا توالی مستقیم و معکوس برای آن فرقی نکرده و یکسان است پس داریم:

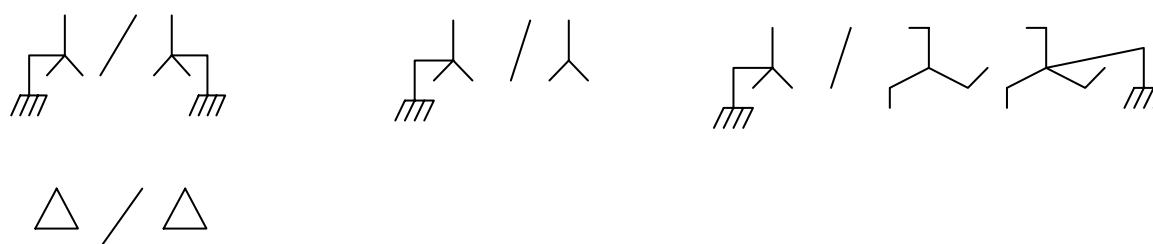
$$X_i = X_d = X_{cc} = \text{راکتانس اتصال کوتاه}$$

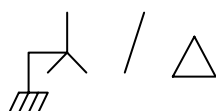
بسته به نوع ترانسفورماتور مقدار این راکتانس (V_i^2 / S_b) در رنج ۱۷-۴٪ تغییر می کند. برای ترانسفورماتورهای معمولی در حدود ۱۰٪، برای ترانسفورماتورهای بزرگ در حدود ۱۷٪ و برای ترانسفورماتور های کوچک در حدود ۴٪ می باشد. اگر بخواهیم در رنج MVA این راکتانس را بررسی کنیم می توان تقسیم بندی زیر را داشت.

برای ترانسفورماتور های چند MVA حدود ۴٪، برای ترانسفورماتور های بزرگ مثل ۱۰۰MVA حدود ۷-۱۳٪ و برای ترانسفورماتور های بزرگتر در شرایط خاص ۱۷٪ به بالا می باشد.

راکتانس هموپلر بستگی به نوع اتصالات سیم پیچی های اولیه و ثانویه و نوع کوپلاژ مغناطیسی (مدار مغناطیسی) ترانسفورماتور خواهد داشت.

انواع ترانسفورماتور ها

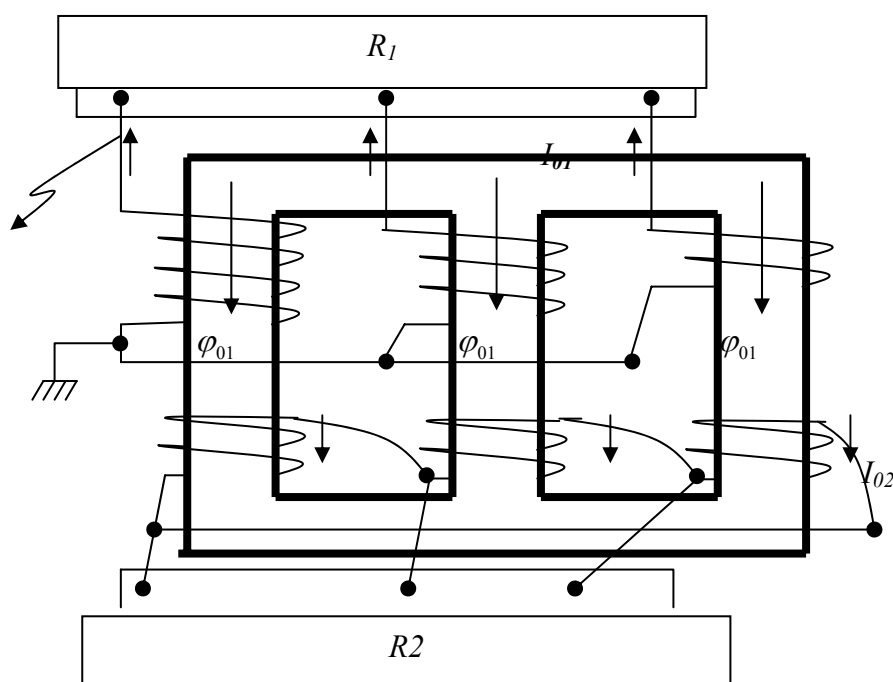
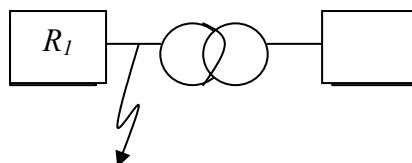




اتصال مثلث/ ستاره زمین شده:

برای اتصالات مثلث/ ستاره زمین شده، Z_0 موقعی وجود دارد که نا متعادلی مثل اتصال کوتاه باشیم.

حال باید دید مقدار Z_0 چقدر است



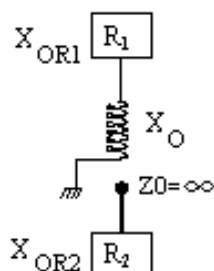
در اتصال کوتاه تکفاز، سیستم به توالی های هموپلر، معکوس و مستقیم تجزیه می شود. با عبور جریان I_{01} فلوهای که در مدار مغناطیسی ایجاد خواهد شد، در سیم پیچی های ثانویه جریانی عبور خواهد داد که با عبور فلوی مربوطه می بایستی مخالفت کند. φ_{02} ، جریان I_{02} را از ثانویه ها عبور خواهد داد.

فلوی ضعیف جهت مغناطیس کردن هسته ترانسفورماتور $\varphi_{01} - \varphi_{02}$

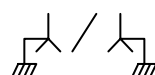
$$\frac{I_{01}}{I_{02}} = \frac{N_2}{N_1}$$

جریان I_{02} فقط در داخل مثلث گردش کرده و سیم پیچی ثانویه را گرم خواهد کرد. این جریان گردشی بوده و به بیرون هیچ راهی پیدا نمی کند. بنابراین الگم در طرف اتصال کوتاه تکفازی روی داده باشد، مولد هموپلر به طرف ثانویه یا شبکه R_2 سرایت نخواهد کرد. این نوع ترانسفورماتور ها نقش مهمی که دارند جریان هموپلر را ایزوله می کنند. همچنین هارمونیک ۳ رابه تله می اندازند. چرا که هارمونیک ۳ در سیستمهای سه

فاز، سینوسی بوده و با هم همفاز هستند (شبیه هموپلر). در دیاگرام تک خطی این نوع ترانسها، طرف مثلث برای سیستم هموپلر مدار باز خواهد بود. راکتانس از طرف اولیه برابر با $X_0 = X_{cc}$ است.

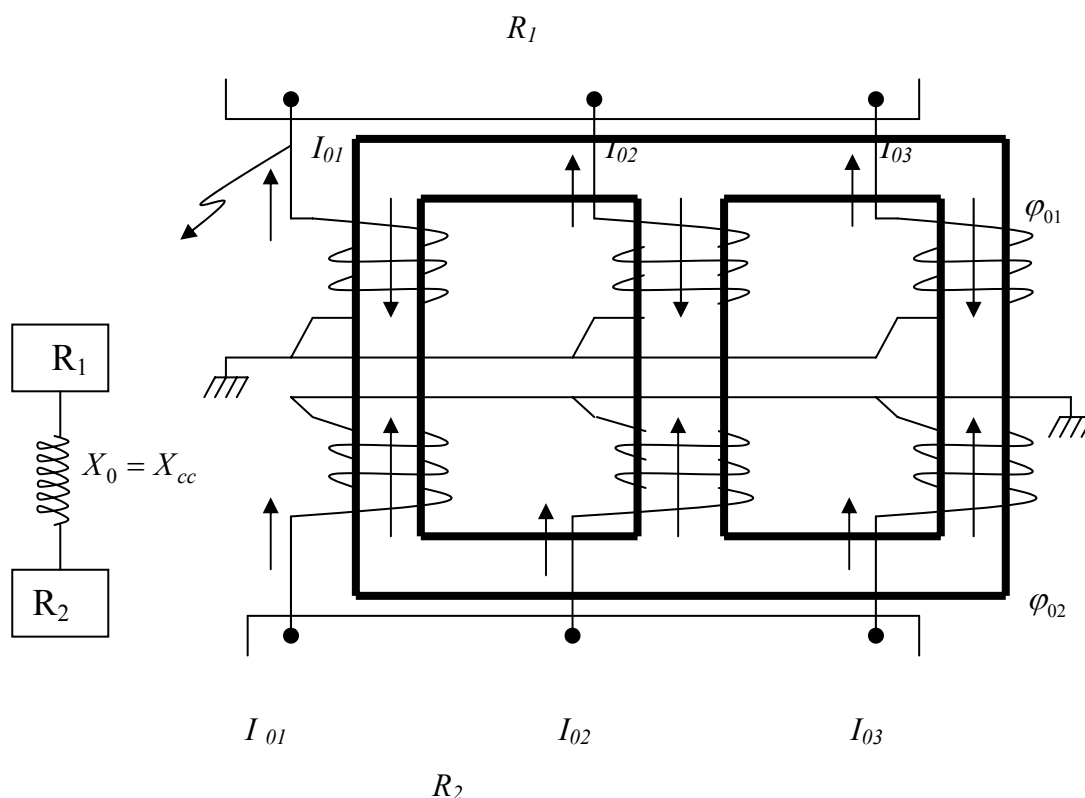


به عبارت دیگر جریانه‌ها در طرف اتصال ستاره با هم برابر بوده $(\bar{I}_{01\lambda} = \bar{I}_{02\lambda} = \bar{I}_{03\lambda} = \bar{I}_0 / 3)$ و بصورت هم فاز، هم جهت و مساوی هم می باشند. در صورتی که نقطه صفر اتصال ستاره زمین شده باشد $\bar{I}_0 \neq 0$ و در صورتی که نقطه صفر زمین نشده باشد $\bar{I}_0 = 0$. با عبور جریان از طرف اتصال ستاره جریانه‌های متناظر فازها از سیم پیچهای اتصال مثلث عبور کرده و بخاطر هم فاز، هم جهت و مساوی بودن $(\bar{I}_{01\Delta} = \bar{I}_{02\Delta} = \bar{I}_{03\Delta})$ فقط در داخل مثلث جریان داشته و در خارج آن وجود نخواهند داشت.

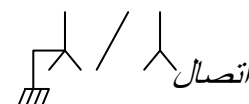


اتصال ستاره زمین شده / ستاره زمین شده:

در سیستم پریونیت خواهیم داشت: $\bar{I}_{1\lambda} = \bar{I}_{1\Delta}$



اتصال Δ / Δ $Z_o = \infty$ ثانویه و $Z_o = \infty$ اولیه



اگر عاملی در ثانویه وجود داشته باشد که φ_{01} را خنثی کند φ_{01} رو به اشباع می رود و هسته گرم می شود در این صورت هیچ جریان \bar{I}_0 در شبکه R_2 نداریم و فقط جریان ناشی ترانسفورماتور موجود است. در این صورت \bar{I}_0 مربوط به شبکه R_1 مقدار بزرگی نبوده و $X_0 = \infty$ می باشد. به عبارت دیگر مسیر φ_{01} از طریق هوا بسته شده است. در حالت ۴ ستونه، رلوکتانس هر مسیر به صورت زیر می باشد (رلوکتانس هوایی) مقاومت مغناطیسی از طریق مسیر شار از طریق هوا: \Re_f مقاومت مغناطیسی هر ستون \Re_n

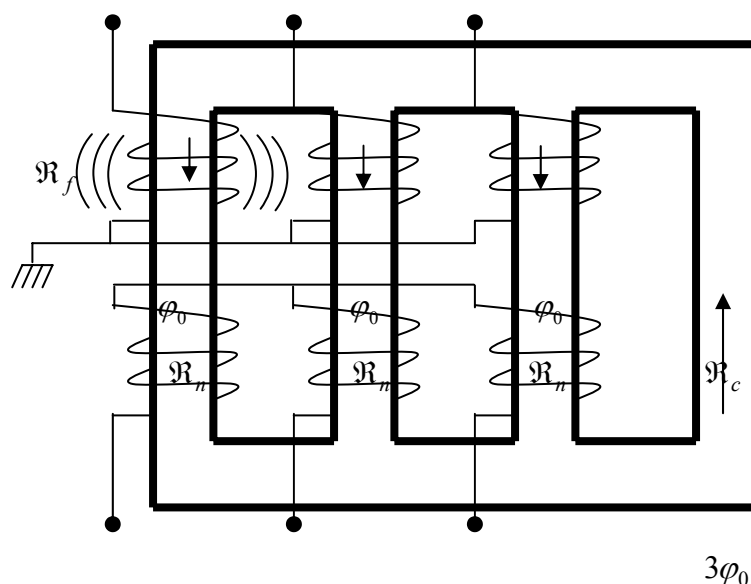
برای اتصال هسته سه ستونه داریم:

$$X_o = L_o \omega = \frac{K \omega}{\Re_n + \Re_f} \approx \frac{K \omega}{\Re_f}$$

$$\varphi_0 = \frac{K I_0}{\Re} \rightarrow \varphi_0 = L_o I_0 \rightarrow \frac{\varphi_0}{I_0} = L_o \rightarrow L_o \omega = \frac{K \omega}{\Re}$$

در این حالت راکتانس نسبت به حالت قبل بیشتر است.

$$X_o \approx (10-15) X_{cc}$$



برای اتصال هسته چهار ستونه داریم:

$$\varphi_0 = \frac{KI_0}{\mathfrak{R}_t}$$

$$\mathfrak{R}_t = \mathfrak{R}_n + 3\mathfrak{R}_{common}$$

$$\varphi_0 = \frac{KI_0}{\mathfrak{R}_n + 3\mathfrak{R}_c}$$

\mathfrak{R}_c و \mathfrak{R}_n راکتانس بستگی به پرمابلیته آهن دارد.

$\mathfrak{R}_n + 3\mathfrak{R}_c$ مقدار کوچکی بوده و $\mathfrak{R}_n + \mathfrak{R}_f$ ناشی از مقدار بزرگی می باشد.

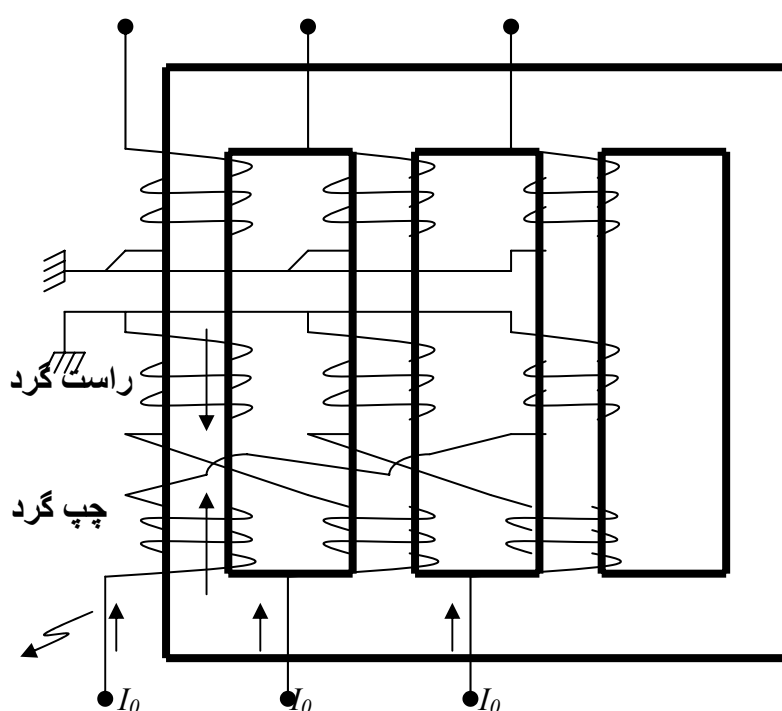
$$L_0\omega = \frac{\varphi_0}{I_0}\omega = \frac{K\omega}{R_n + 3R_c} \rightarrow L_0\omega = \infty$$

$$\frac{K\omega}{R_n + 3R_c} = X_0 \gg X_0 = \frac{K\omega}{R_f + R_n}$$

در حالت ۴ ستونه I_{0l} کوچکتری برای اشباع هسته لازم است. چون فلو خیلی آزاد مسیر خود را می بندد يك جریان چند دهم آمپری کافی است تا هسته را اشباع کند ولي در ۳ ستونه از طریق هوا مسیر خود را می بندد و جریان بیشتری را نسبت به حالت ۴ ستونه می کشد .

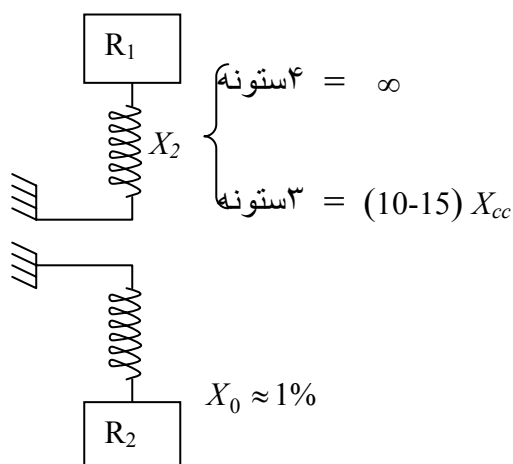
اتصال

اگر اتصال کوتاه در طرف زیگزاگ باشد جریان همو پلر را هر قدر بتوانیم می توانیم عبور دهیم چون فلو ها اثر همدیگر را خنثی می کنند وفلوی ضعیفی باقی خواهد ماند. $X_0=1\%$ در طرف ثانویه زیگزاگ خیلی کم بوده و مربوط به فلو های نشستی می باشد. هیچ اثری در طرف اولیه از این اتصال کوتاه نخواهیم داشت



اگر اتصال کوتاه در طرف اول (ستاره) باشد سه جریان هموپلر و سه فلو در اولیه خواهیم داشت. اما این پیچک ها نمی توانند با این فلو ها به مقابله برخیزند. چون در هر نصف سیم پیچ که مقابله شده، در نصف سیم پیچ بعدی و در فاز دیگر مخالف آن تولید خواهد شد، مثل این که هیچ فلویی تولید نشده است. پس از دید اولیه مشخصات

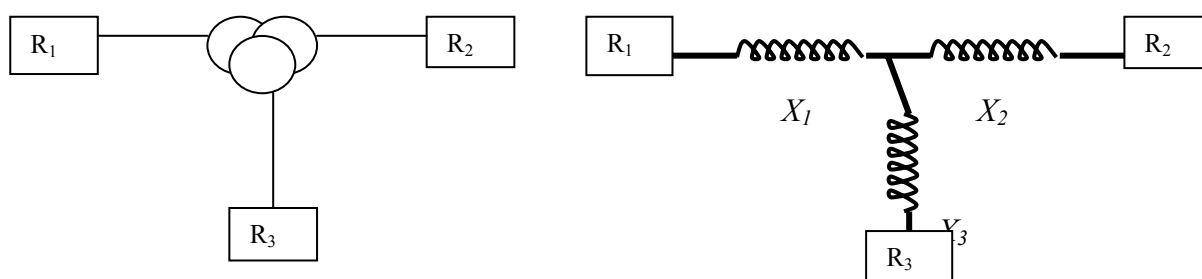
را داشته و بستگی به نوع ساختمان ترانس که ۳ ستونه یا ۴ ستونه باشد دارد.



کوپلاژ				شمای معادل
ثانویه		اولیه		$X_{cc} = (4 - 17)\%$
نوع سیم پیچی	نقطه خنثی	نوع سیم پیچی	نقطه خنثی	
	متصل به زمین		متصل به زمین	
	متصل به زمین		ایزوله	
	متصل به زمین		ایزوله	 $X_2 = \infty$ ستونه ۵ یا ۴ $X_2 = (10 - 15)X_{cc}$ ستونه ۳
	متصل به زمین		ایزوله	

				$X_2 = \infty$ یا ۵ ستونه $X_2 = (10-15)X_{cc}$ ۳ ستونه
	متصل به زمین		متصل به زمین	X_2 1%
	متصل به زمین		ایزوله	X_2
	متصل به زمین		ایزوله	X_2

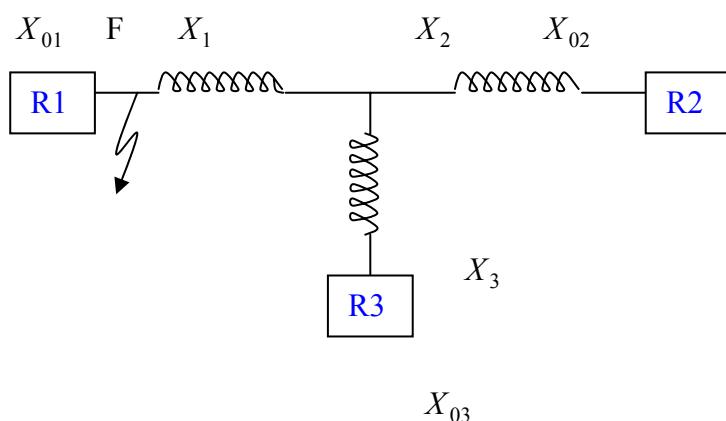
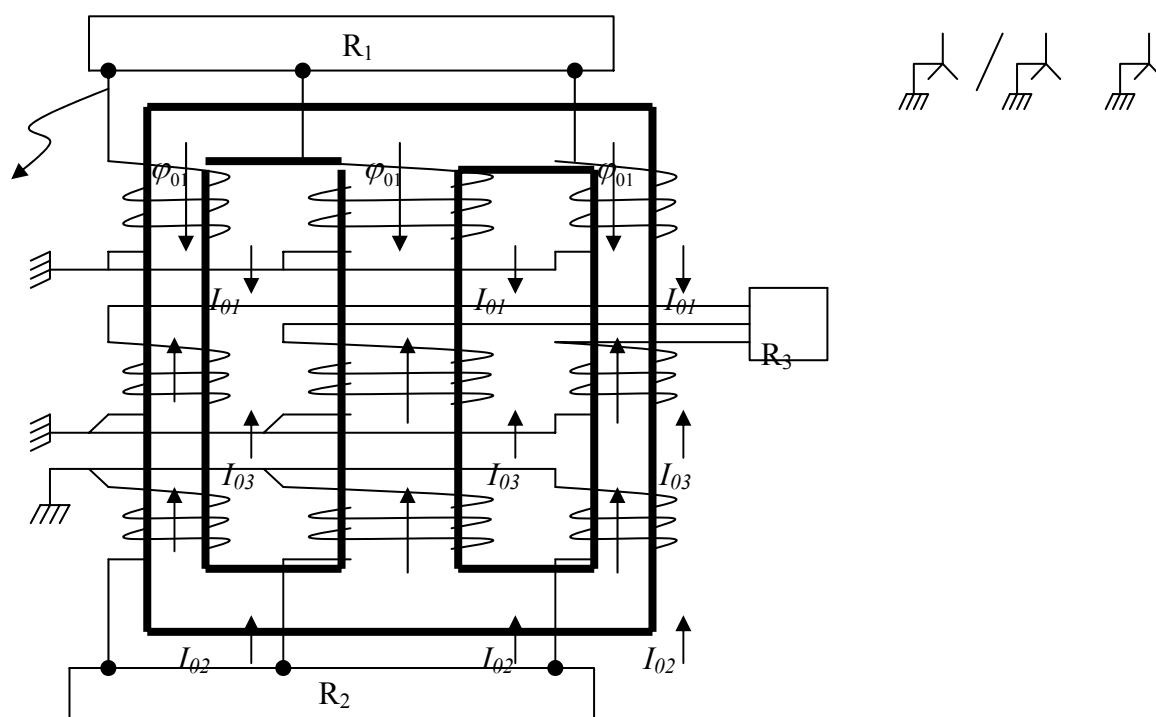
ترانسفورماتور سه پیچکه



ترانسفورماتور سه پیچکه را بصورت سه راکتانس نشان می دهیم که به صورت ستاره به هم وصل شده اند. این راکتانس ها را از طریق اندازه گیری و به کمک آزمایش اتصال کوتاه در ترانس به دست می آیند. اگر ثالثیه مدار باز شده، ثانویه اتصال کوتاه و اولیه به سیستم تغذیه وصل شود X_{12} به دست می آید. به همین ترتیب X_{13} , X_{23} به دست خواهیم آمد. طبق شکل داریم:

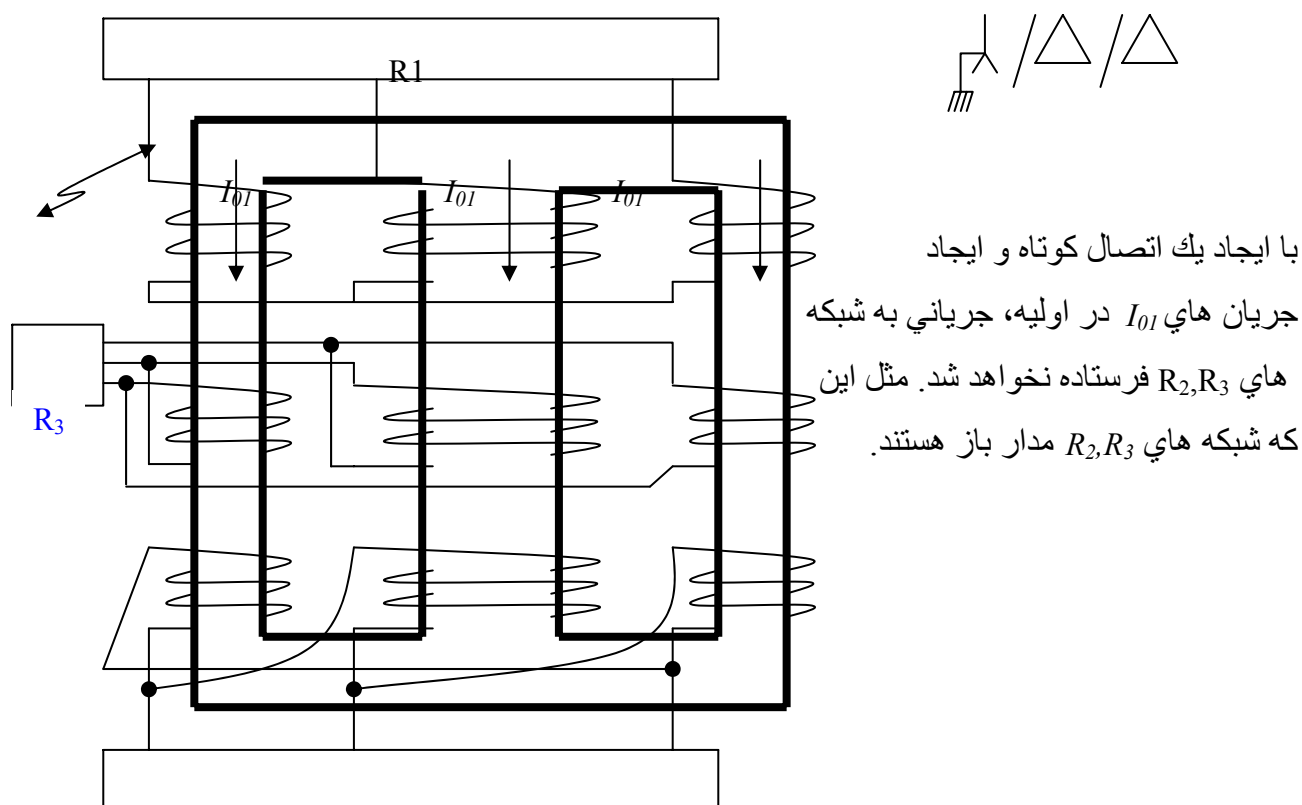
$$\begin{cases} X_1 + X_2 = X_{12} \\ X_1 + X_3 = X_{13} \\ X_2 + X_3 = X_{23} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} X_1 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{13} - X_{23}) \\ X_2 = \frac{1}{2}(X_{12} + X_{23} - X_{13}) \\ X_3 = \frac{1}{2}(X_{13} + X_{23} - X_{12}) \end{cases}$$

چون ترانسفورماتور يك سيستم استاتيک است پس امپدانس مستقيم و معكوس آن يکي است ولي در اندازه گيري راکتانس هموپلر بايستي نوع اتصالات را بررسي کرده و مدار معادل هموپلر را رسم کنيم.

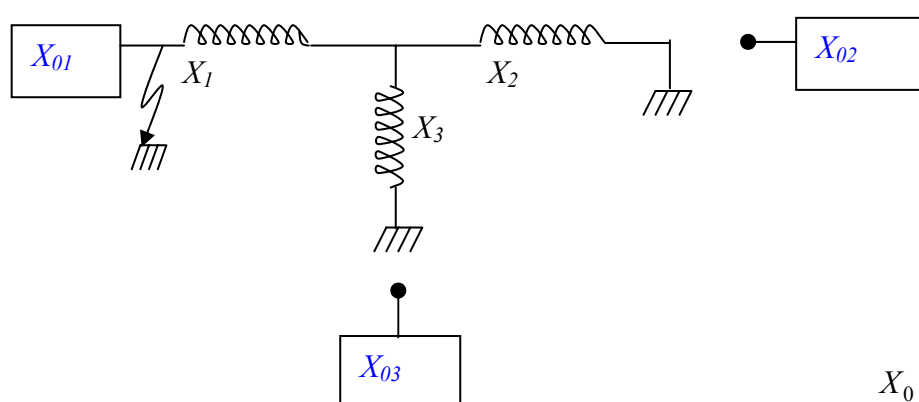


در اوليه ترانسفورماتور و در يك فاز اتصال کوتاهي پيش مي آيد و جرياني کشيده شده که داراي سه مولفه مي باشد. جريان هموپلر I_{01} را در نظر مي گيريم. بايستي جريان سيم پيچي I_{02} هاي ديگر با فلوي ناشي از I_{01} مقابله کنند و جريان هاي گذرنده از سيم پيچي هاي ثانويه و ثالثيه فلويي ايجاد مي کنند که با فلوي اوليه به مقابله برخيزد.

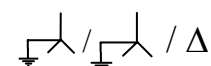
$$X_{0fn} = X_{01} \parallel [X_1 + (X_2 + X_{02}) \parallel (X_3 + X_{03})]$$



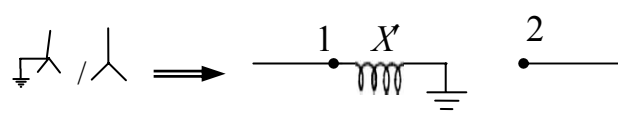
اگر اتصال کوتاه در ثانویه و در طرف مثلث باشد بینهایت موازی با X_{02} خواهد بود



$$X_{0fn} = X_{01} \parallel [X_1 + (X_2 \parallel X_3)]$$

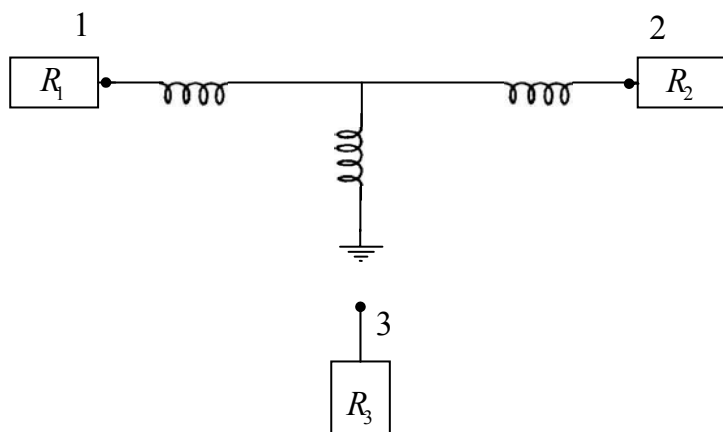


راکتانس در اینجا علاوه بر نوع اتصالات به مدار مغناطیسی ترانسفورماتور نیز بستگی دارد در ترانسفورماتور دو پیچکه داریم:

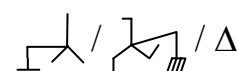


$X' = \infty$ فلوی آزاد ۴ یا ۵ پیچکه

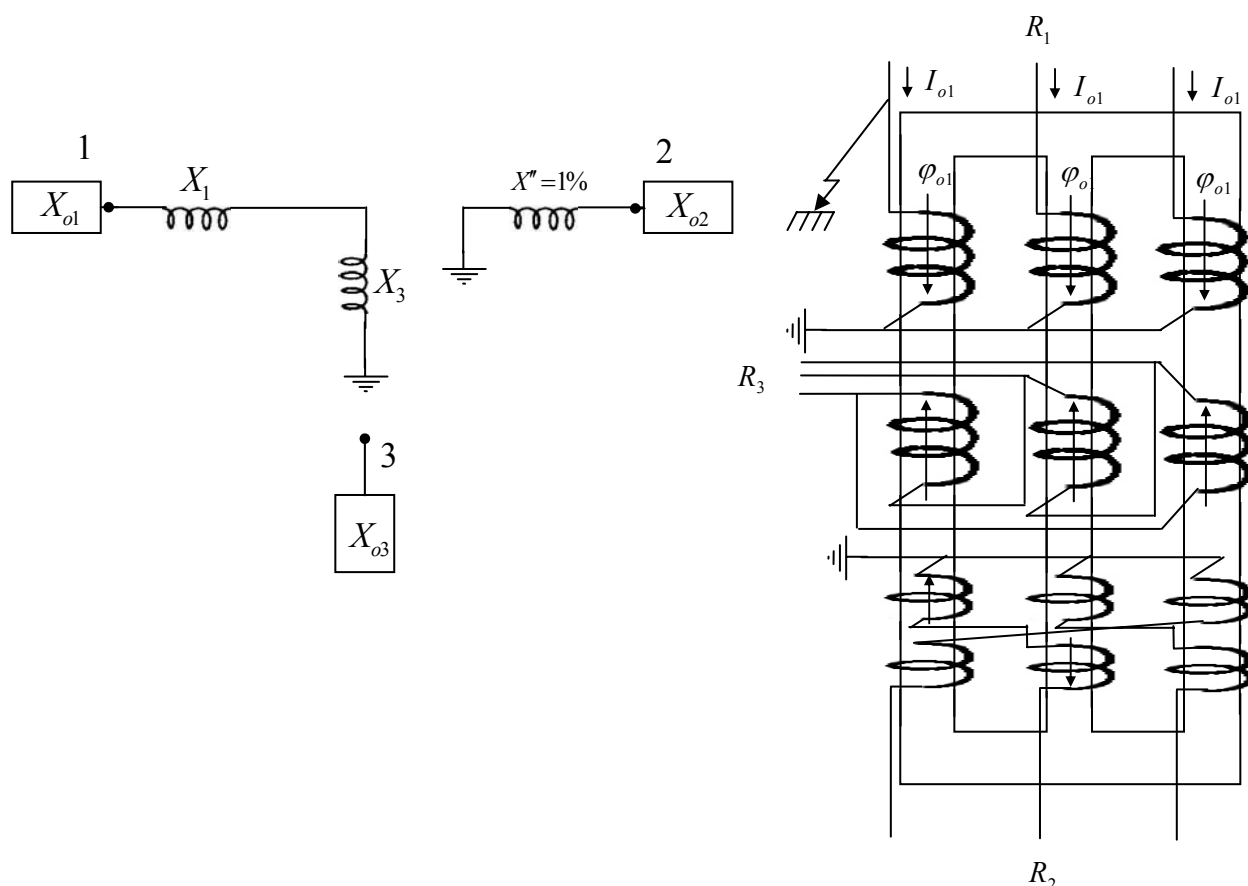
$X' = (10-15) X_{cc}$ فلوی فشرده ۳ پیچک



بین اولیه و ثانویه X_l و X'




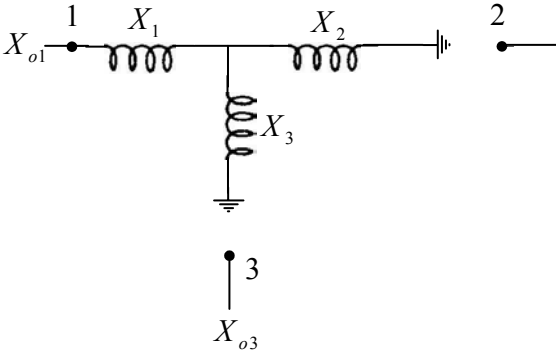
اگر اتصال کوتاه در اولیه رخ دهد سه جریان همپولر I_{O1} را خواهیم داشت. در ثالثیه سه جریان گردشی در داخل Δ ایجاد شده و سبب گرم شدن Δ می شود ولی در R_3 جریانی نداریم. اگر در یک پیچک زیگزآگ فلویی به بالا ایجاد کند، در پیچک دومی که درخلاف جهت پیچک اولی پیچیده شده و با آن سری است فلویی در جهت پایین ایجاد خواهد کرد و نخواهد توانست به مقابله با I_{O1} برخیزد لذا تنها فلوهای مقابله کننده با I_{O1} همان فلوهای ایجاد شده در داخل Δ در ثالثیه است.



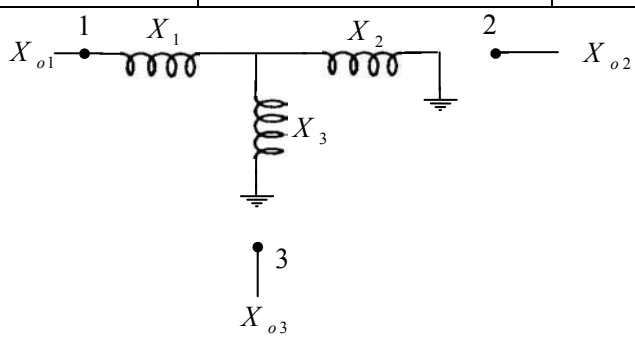




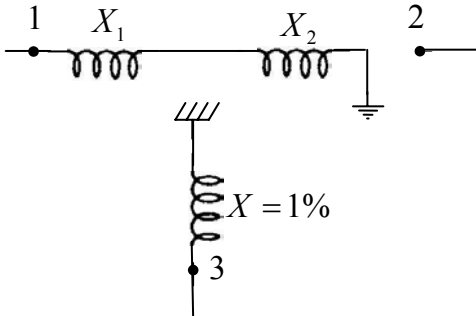
اگر اتصال کوتاه تکفازی در طرف Δ داشته باشیم جریانهای در پیچکهای اولیه و فلوهای در همان جهت ایجاد می شود. ولی در نصف پیچک دوم فلوی مخالف با آن تولید شده و حذف می شود و اگر اتصال کوتاه باشد راکتانس کوچکی خواهیم داشت که هر جریانی هموپولر در ثانویه Δ می توان از آن کشید. به خاطر وجود فلوهای نشتی و فراری فلویی در حدود ۱٪ در نظر میگیرند. اگر اتصال کوتاه در طرف Δ باشد $X_{0fn} = \infty \parallel X_{03}$ است.

۱	اولیه	ثانویه	ثالثیه
نوع کوپلاژ سیم پیچی ها			
مقدار راکتانس هموپولر از دید	$X_{01} \parallel [X_1 + (X_2 + X_{02}) \parallel (X_3 + X_{03})] = A$	A	A
 شمای معادل تکفاز			

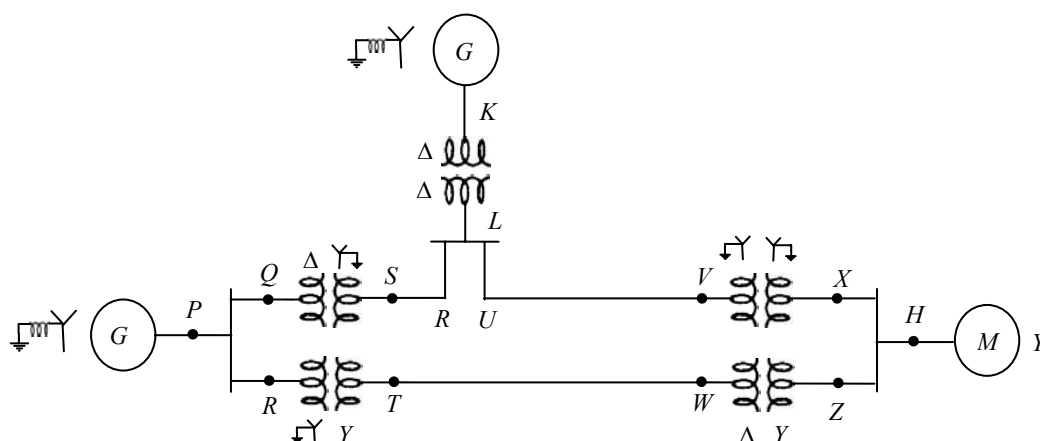
۲	اولیه	ثانویه	ثالثیه
نوع کوپلاژ سیم پیچی ها			
مقدار راکتانس هموپولر از دید	$X' = \infty$ $X' = 10X_{cc}$	∞	∞
 شمای معادل تکفاز			

ثالثیه	ثانویه	اولیه	نوع کوپلاژ سیم پیچی ها
Δ	Δ		نوع کوپلاژ سیم پیچی ها
∞	∞	$X_{o1} \parallel (X_1 + X_2 \parallel X_3)$	مقدار راکتانس هموپولر از دید
 <p>شمای معادل تکفاز</p>			

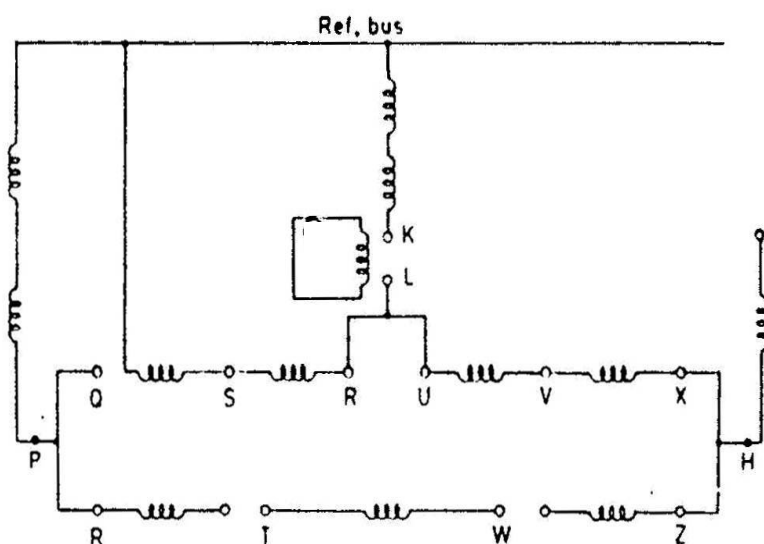
ثالثیه	ثانویه	اولیه	نوع کوپلاژ سیم پیچی ها
	Δ		نوع کوپلاژ سیم پیچی ها
∞	∞	$X_{o1} \parallel (X_1 + (X_3 + X_{o3}) \parallel X_2)$	مقدار راکتانس هموپولر از دید
 <p>شمای معادل تکفاز</p>			

ثالثیه	ثانویه	اولیه	نوع کوپلاژ سیم پیچی ها
	Δ		
1%	∞	$X_{01} \parallel (X_1 + X_2)$	مقدار راکتانس هموپولر از دید
 <p>شمای معادل تکفاز</p>			

مثال- در دیاگرام تک خطی سیستم قدرت زیر شبکه توالی صفر سیستم را رسم نمایید



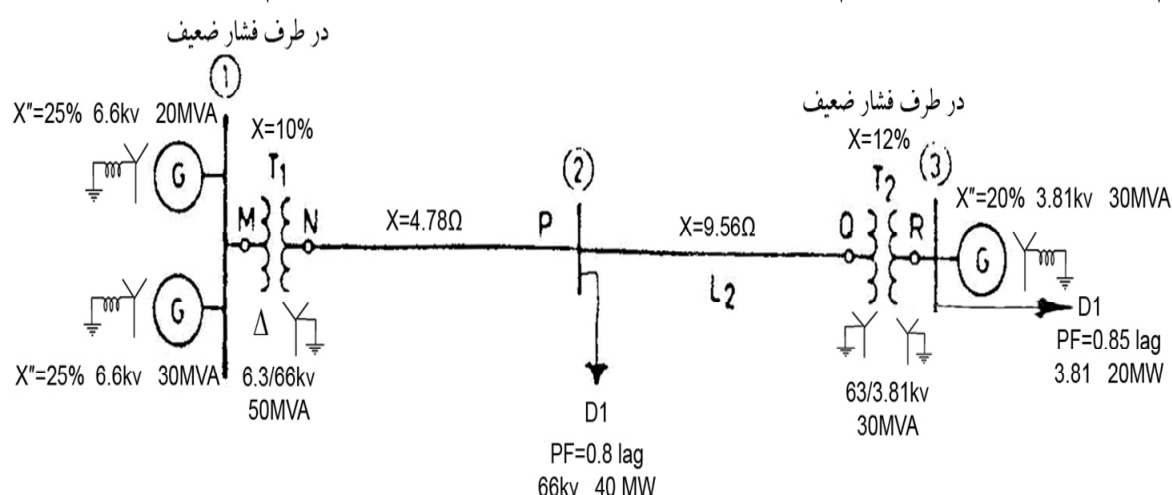
حل: با توجه به اتصال ترانسفورماتورها شبکه توالی صفر سیستم مطابق شکل زیر رسم می شود:



شبکه توالی صفر
مربوط به سیستم قدرت بالا

مثال: سیستم قدرت سه شینه در زیر نشان داده شده است. شبکه های توالی مثبت، منفی و صفر این سیستم را رسم کنید و مقادیر راکتانس ها را بر حسب pu روی آن مشخص نمایید. رسم این شبکه ها برای مطالعه اتصال کوتاه صورت می گیرد، لذا از جریان بارها صرف نظر کنید. راکتانس توالی منفی ژنراتورها با توالی مثبت آنها برابر است. راکتانس توالی صفر هر یک از ژنراتورها ۵٪ و راکتانس زمین آنها ۲٪ می باشند. امپدانس توالی صفر خطوط انتقال را ۲/۵ برابر امپدانس توالی مثبت آنها در نظر بگیرید.

<ترسیم دوباره شکل ها - تغییر نام بار سمت راست به D2 - تاثیر بارها در دیاگرام توالی ها>



دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت

حل:

ولتاژهای مبنای شین ها:

شین ۱ : 6.6kV

شین ۲ : $6.6 \times \frac{66}{6.3} = 69.16 \text{ kV}$

شین ۳ : $69.14 \times \frac{3.81}{63} = 4.18 \text{ kV}$

رابطه تبدیل امپدانس از یک سیستم قدیمی به یک سیستم جدید به صورت زیر است.

$$\bar{Z}_{pu,new} = \bar{Z}_{pu,old} \left(\frac{S_{base,new}}{S_{base,old}} \right) \times \left(\frac{V_{base,new}}{V_{base,old}} \right)^2$$

$$G_1 : X'' = j0.25 \times \frac{50}{20} = j0.625 \text{ pu}$$

$$G_2 : X'' = j0.25 \times \frac{50}{30} = j0.4167 \text{ pu}$$

$$G_3 : X'' = j0.2 \times \frac{50}{30} \times \left(\frac{3.81}{4.18} \right)^2 = j0.277 \text{ pu}$$

$$T_1 : X = j0.1 \times \left(\frac{6.3}{6.6}\right)^2 = j0.0911 pu$$

$$T_2 : X = j0.12 \times \frac{50}{30} \times \left(\frac{3.81}{4.18}\right)^2 = j0.166 pu$$

$$\bar{Z}_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} = \frac{69.14 K^2}{50 m} = 95.6 \Omega$$

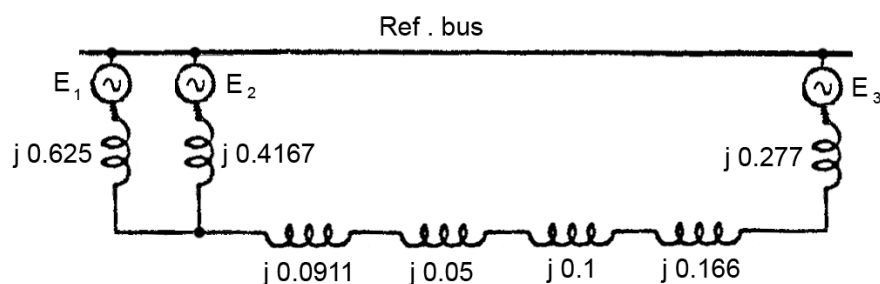
$$L_1 : X = j \frac{4.78}{95.6} = j0.05 pu$$

$$L_2 : X = j \frac{9.56}{95.6} = j0.1 pu$$

$$D_1 : \left\{ \begin{array}{l} S_1 = \frac{P_1}{\cos \phi_1} = \frac{40}{0.8} = 50 MVA \\ |Z_1| = \frac{V_1^2}{S_1} = \frac{66 K^2}{50} = 87.12 \Omega \\ \bar{Z}_{base} = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{69.14 K^2}{50 m} = 95.6 \Omega \\ |Z_1| = \frac{87.12}{95.6} = 0.911 pu \\ \bar{Z}_1 = |Z_1| \angle y_1 = 0.911 \angle \cos^{-1} 0.8 = 0.729 + j0.547 pu \end{array} \right.$$

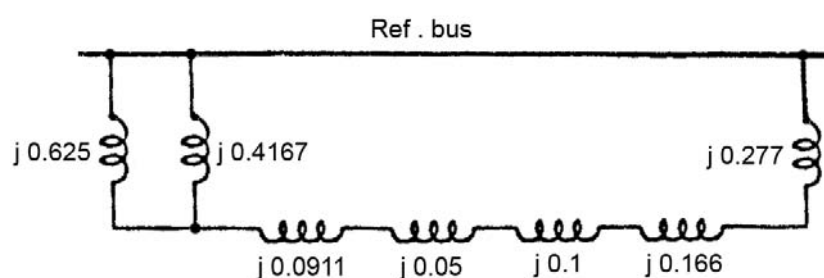
$$D_2 : \left\{ \begin{array}{l} S_2 = \frac{P_2}{\cos y_2} = \frac{20 m}{0.85} = 23.53 MVA \\ |Z_2| = \frac{V_2^2}{S_2} = \frac{3.81 K^2}{23.53} = 0.617 \Omega \\ \bar{Z}_{base} = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{4.18 K^2}{50 m} = 0.349 \Omega \\ |Z_2| = \frac{0.617}{0.349} = 1.766 pu \\ \bar{Z}_2 = 1.799 \angle \cos^{-1} 0.85 = 1.5 + j0.93 pu \end{array} \right.$$

با فرض اینکه محاسبات اتصال کوتاه مورد نظر است از جریانهای بار (تأثیر بارها) صرفنظر می شود.
 قدرت مبنا ۵۰ مگاوات آمپر است. شبکه توالی مثبت، همان دیاگرام امپدانس است که در شکل زیر رسم است.



شبکه توالی مثبت سیستم قدرت

امپدانس توالی منفی ترانسفورماتورها و خطوط انتقال با امپدانس توالی مثبت آنها برابر هستند. همچنین امپدانس توالی منفی ژنراتورها با امپدانس توالی مثبت آنها یکسان است. با توجه به اینکه نیروهای محرکه الکتریکی ژنراتورها در شبکه توالی منفی ظاهر نمی شوند، شبکه توالی منفی سیستم مذکور را مطابق شکل زیر رسم می کنیم.



شبکه توالی منفی سیستم قدرت

برای رسم شبکه توالی صفر، ابتدا راکتانس های توالی صفر و راکتانس های زمین ژنراتورها را در قدرت مبناي ۵۰ مگاوات آمپر بدست می آوریم.

راکتانس توالی صفر ژنراتورها ۵٪

راکتانس زمین ژنراتورها ۲٪

$$G_1 : X_{g0} = 0.05 \times \frac{50}{20} = 0.125 pu$$

$$\therefore X_n = 0.02 \times \frac{50}{20} = 0.05 pu$$

$$\therefore 3X_n = 0.15 pu$$

$$G_2 : X_{go} = 0.05 \times \frac{50}{30} = 0.0838 pu$$

$$: X_n = 0.02 \times \frac{50}{30} = 0.0333 pu$$

$$3X_n = 0.1 pu$$

G_3

$$: X_{go} = 0.05 \times \left(\frac{50}{30}\right) \times \left(\frac{3.81}{4.18}\right)^2 = 0.0692 pu$$

$$: X_n = 0.02 \times \frac{50}{30} \times \left(\frac{3.81}{4.18}\right)^2 = 0.0277 pu$$

$$: 3X_n = 0.0831 pu$$

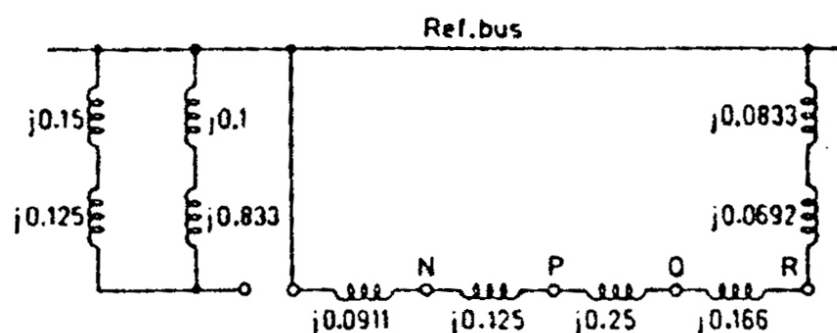
همچنین راکتانس توالی صفر خطوط انتقال را محاسبه می کنیم:

امپدانس توالی صفر خطوط ۲/۵ برابر توالی امپدانس مثبت است.

$$L_1 = X_o = 2.5 \times 0.05 = 0.125 pu$$

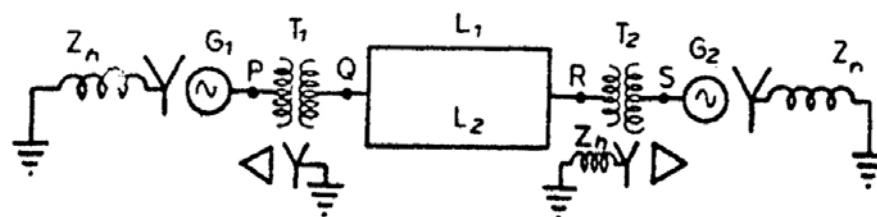
$$L_2 = X_o = 2.5 \times 0.1 = 0.25 pu$$

با توجه به این مقادیر و نحوه اتصال ترانسفورماتورها، شبکه توالی صفر این سیستم در شکل زیر نشان داده شده است:



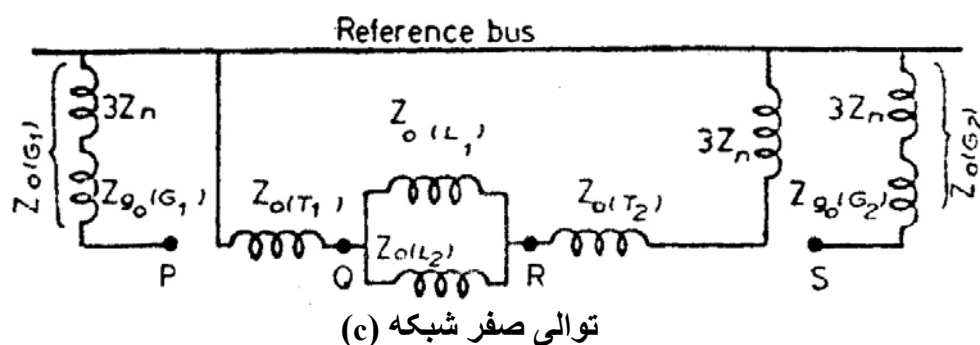
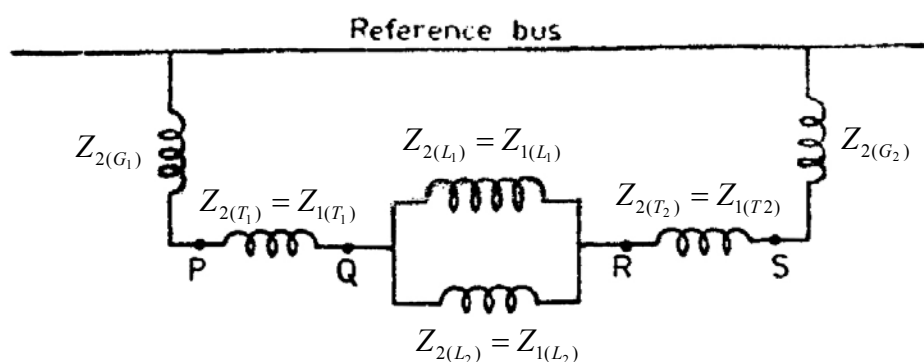
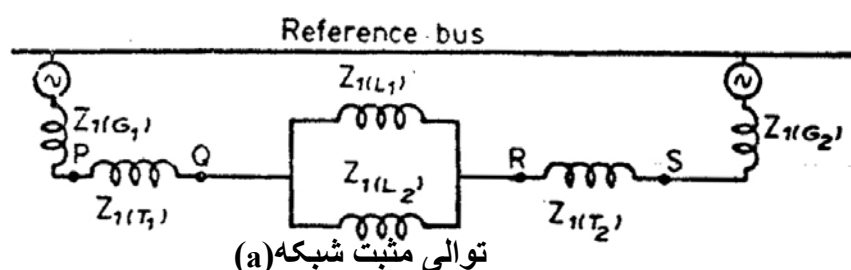
شبکه توالی سیستم قدرت

مثال: شکل زیر یک سیستم ساده قدرت متشکل از دو ژنراتور G_1 و G_2 که از طریق ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 و دو خط موازی L_1 و L_2 به هم متصل است را نشان میدهد.



دیاگرام مداری یک سیستم قدرت

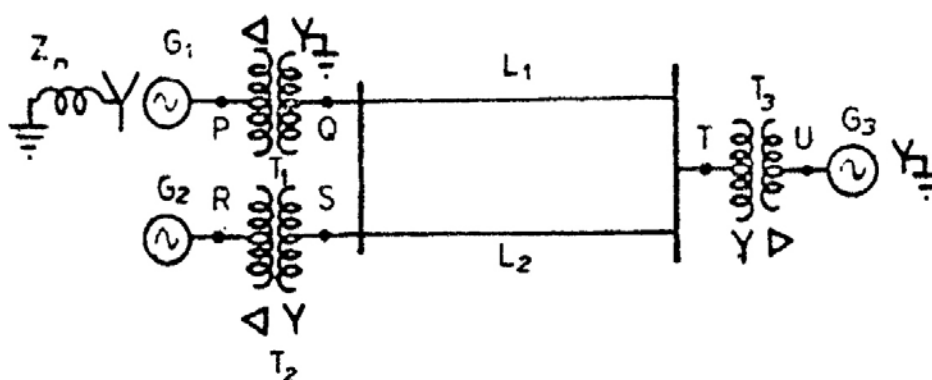
طرف فشار قوی T_2 از طریق یک راکتور محدود کننده با امپدانس Z_n به زمین متصل شده است. برای شبکه های توالی مثبت و منفی نقاط خنثای این ژنراتورها همان شین مرجع می باشد.



بنابراین شبکه های توالی صفر، مثبت و منفی در شکل‌های بالا نشان داده شده است. امپدانس توالی مؤلفه های سیستم قدرت در شبکه های متناظر با آنها نشان داده شده است. از آنجایی که مؤلفه ساکن و پایا (ایستا) موضوع بحث می باشد امپدانس های توالی مثبت و منفی شان با هم برابرند.

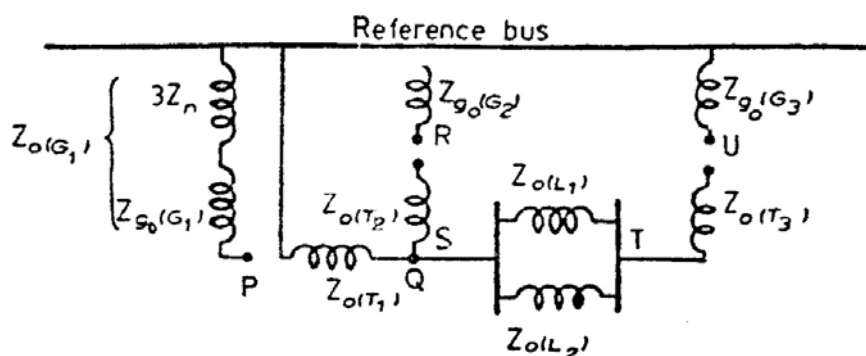
برای مثال همانطور که پیشاپیش توضیح داده شده است امپدانس های توالی مثبت و منفی یک ترانسفورماتور برابر امپدانس نشستی آن می باشد. در مورد شبکه توالی صفر باید گفت که هیچ جریان توالی صفری از ژنراتورهای G_1 و G_2 جاری نمی شود. اگر یک خطای نامتقارن بین دو نقطه Q و R شبکه بوجود آید توجیه این مسئله این است که سیم پیچی های اولیه هر دو ترانسفورماتور از نوع Δ می باشد. بنابراین جریان توالی صفر فقط می تواند در سیم پیچ Δ جریان پیدا کند و در جریان خط ظاهر نخواهد شد.

مثال: برای بررسی بیشتر نحوه استخراج توالی صفر مثال دیگری در زیر آمده است.



دیاگرام ساده یک سیستم قدرت

باید ذکر شود که امپدانس نشان داده شده در دیاگرام توالی متناظر با چه (KVA) و (KV) مرجعی است. شبکه توالی صفر سیستم در شکل زیر تشریح گردیده است.



شبکه توالی صفر سیستم قدرت ساده شده

فصل دوم

مولفه های متقارن

Symmetrical Components

۱-۲ تجزیه سیستم n فازه نامتعادل با مولفه های متقارن

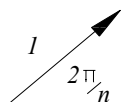
برای شناختن یک بردار در فضا بهتر است آنرا بر روی سه محور تصویر کرد و مولفه های آنرا بدست آورد. شبکه ممکن است در یک نقطه نامتعادل باشد یعنی در یک نقطه اتصال کوتاهی رخ داده و شبکه نامتعادل گردد. در این حال جریان عبوری از فاز معیوب، از دو طرف باید حساب شده و قدرت کلیدهای قطع نیزبایستی محاسبه شوند تا در کمترین مدت زمان این قسمت از شبکه را از خط خارج کنند در غیر اینصورت ژنراتور سنکرون بحالت غیر سنکرون رسیده و بطور تصادفی به حالت قطع و خاموشی خواهد رفت. برای حساب کردن قدرت قطع کلیدهای قدرت باید محاسبات سیستم سه فاز را در حالت نامتعادلی انجام دهیم. راه عامیانه و سنتی، حل شبکه از طریق محاسبات گره و مش ($kclgkvl$) است. اما به علت وسعت شبکه و همینطور قرار گرفتن در وضعیت نامتعادلی محاسبات مشکل خواهد بود. یک سیستم n فاز نامتعادل، قابل تجزیه به n سیستم n فازه متعادل است. برای این منظور از روش مولفه های متقارن که در سال ۱۹۱۸ میلادی توسط فورتسکیو (Fortesque) معرفی شد استفاده خواهد شد. در این روش، یک سیستم n فازه نامتعادل به n سیستم n فازه متعادل و بر مبنای بردار اپراتور ترتیب که در زیر بیان شده، تجزیه خواهد شد.

\bar{a}_n = Sequence Operator for n Phase System

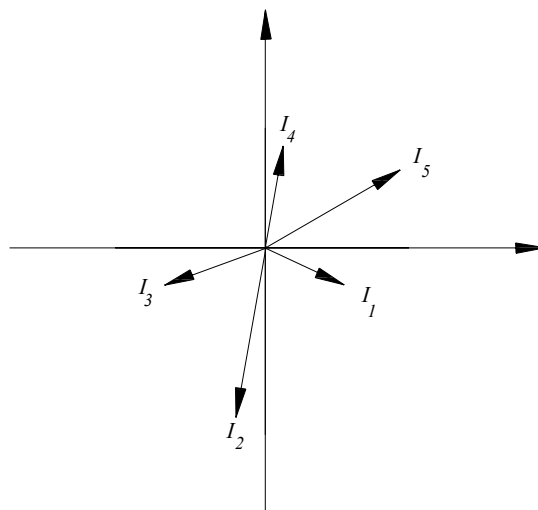
$$\bar{a}_n = e^{j\frac{2\pi}{n}}$$

$$\bar{a}_n = 1 \angle 2\pi/n$$

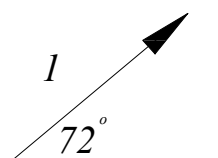
$$\bar{a}_n^n = 1 \angle 0 \quad \bar{a}_n^0 = 1 \angle 0$$



بعنوان مثال فرض میکنیم که در یک سیستم ۵ فازه نامتعادل جریانهها به صورت زیر است:



این سیستم ۵ فازه نامتعادل را می شود به ۵ سیستم ۵ فازه متعادل تبدیل کرد. بردار $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/5}$ در زیر نشان داده شده است.



۷- سیستم ۵ فازه ترتیب صفر یا ترتیب ۵ (با فرض بردار فاز ۱ $\bar{I}_{V,1}$)

فاز ۲ = بردار یک یا فاز ۱ را ۵ بار در جهت مثلثاتی به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/5} = e^{j72^\circ}$ ضرب می کنیم

فاز ۳ = فاز ۲ را ۵ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

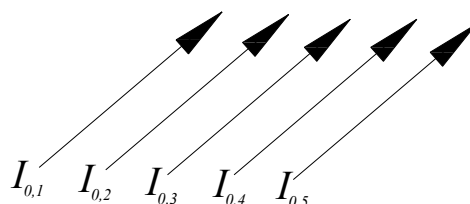
فاز ۴ = فاز ۳ را ۵ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

فاز ۵ = فاز ۴ را ۵ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

$$\bar{I}_{0,i} = \bar{a}_5^0 \bar{I}_{0,i-1} = \bar{I}_{0,i-1}$$

$$\bar{I}_{V,i} = \bar{a}_5^i \bar{I}_{V,i-1} = \bar{I}_{V,i-1} \quad i = 2, 3, \dots, 5$$

$$\bar{a}_5^0 = \bar{a}_5^5 = 1 \angle 0$$



IV- سیستم ۵ فازه ترتیب ۴ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{IV,1}$)

فاز ۲ = فاز ۱ را ۴ بار در جهت مثلثاتی به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7} = j72^\circ$ ضرب می کنیم

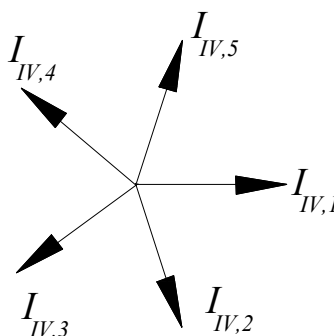
فاز ۳ = فاز ۲ را ۴ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

فاز ۴ = فاز ۳ را ۴ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

فاز ۵ = فاز ۴ را ۴ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

$$\bar{I}_{IV,i} = \bar{a}_5^4 \bar{I}_{IV,i-1} = \bar{a}_5^{-1} \bar{I}_{IV,i-1} \quad i = 2, 3, \dots, 5$$

$$\bar{a}_5^4 = \bar{a}_5^{-1} \cdot \bar{a}_5^5 = \bar{a}_5^{-1} \cdot (1 \angle 0) = \bar{a}_5^{-1}$$



III- سیستم ۵ فازه ترتیب ۳ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{III,1}$)

فاز ۲ = فاز ۱ را ۳ بار در جهت مثلثاتی به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7} = j72^\circ$ ضرب می کنیم

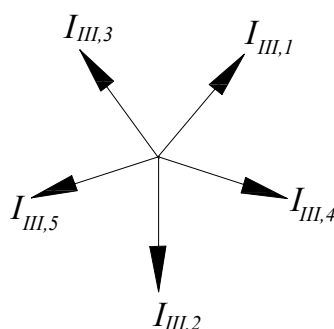
فاز ۳ = فاز ۲ را ۳ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

فاز ۴ = فاز ۳ را ۳ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

فاز ۵ = فاز ۴ را ۳ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

$$\bar{I}_{III,i} = \bar{a}_5^3 \bar{I}_{III,i-1} = \bar{a}_5^{-2} \bar{I}_{III,i-1} \quad i = 2, 3, \dots, 5$$

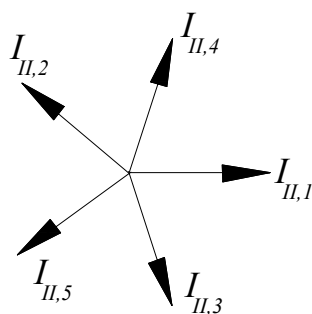
$$\bar{a}_5^3 = \bar{a}_5^{-2} \cdot \bar{a}_5^5 = \bar{a}_5^{-2} \cdot (1 \angle 0) = \bar{a}_5^{-2}$$



II - سیستم ۵ فازه ترتیب ۲ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{II,1}$)

فاز ۲ = فاز ۱ را ۲ بار در جهت مثلثاتی به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7} = j72^\circ$ ضرب می کنیم
 فاز ۳ = فاز ۲ را ۲ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.
 فاز ۴ = فاز ۳ را ۲ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.
 فاز ۵ = فاز ۴ را ۲ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

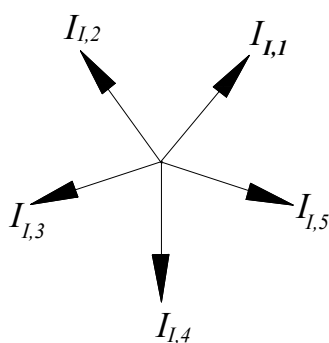
$$\bar{I}_{II,i} = \bar{a}_5^2 \bar{I}_{II,i-1} = \bar{a}_5^{-3} \bar{I}_{II,i-1} \quad i = 2, 3, \dots, 5$$



I - سیستم ۵ فازه ترتیب ۱ (با فرض فاز ۱ $\bar{I}_{I,1}$)

فاز ۲ = فاز ۱ را ۱ بار در جهت مثلثاتی به $\bar{a}_5 = e^{j2\pi/7} = j72^\circ$ ضرب می کنیم
 فاز ۳ = فاز ۲ را ۲ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.
 فاز ۴ = فاز ۳ را ۱ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.
 فاز ۵ = فاز ۴ را ۱ بار در جهت مثلثاتی به \bar{a}_5 ضرب می کنیم.

$$\bar{I}_{1,i} = \bar{a}_5^1 \bar{I}_{1,i-1} = \bar{a}_5 \bar{I}_{1,i-1} \quad i = 2, 3, \dots, 5$$



مجموع توالی فازهای ۱، باید بردار فاز ۱ را نتیجه دهد. به همین صورت مجموع توالی هر فاز بردار همان فاز را نتیجه می دهد.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{V,1} + \bar{I}_{IV,1} + \bar{I}_{III,1} + \bar{I}_{II,1} + \bar{I}_{I,1}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{V,2} + \bar{I}_{IV,2} + \bar{I}_{III,2} + \bar{I}_{II,2} + \bar{I}_{I,2}$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{V,3} + \bar{I}_{IV,3} + \bar{I}_{III,3} + \bar{I}_{II,3} + \bar{I}_{I,3}$$

$$\bar{I}_4 = \bar{I}_{V,4} + \bar{I}_{IV,4} + \bar{I}_{III,4} + \bar{I}_{II,4} + \bar{I}_{I,4}$$

$$\bar{I}_5 = \bar{I}_{V,5} + \bar{I}_{IV,5} + \bar{I}_{III,5} + \bar{I}_{II,5} + \bar{I}_{I,5}$$

بعبارت دیگر مجموع فازهای یک بردار مثلاً ۴ از ۵ سیستم بدست آمده در سیستم متعادل باید بردار \bar{I}_4 در سیستم نامتعادل را بدهد.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{0/V,1} + \bar{I}_{I,1} + \bar{I}_{II,1} + \bar{I}_{III,1} + \bar{I}_{IV,1}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{0/V,1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{I,1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{II,1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{III,1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{IV,1}$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{0/V,1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{I,1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{II,1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{III,1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{IV,1}$$

$$\bar{I}_4 = \bar{I}_{0/V,1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{I,1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{II,1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{III,1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{IV,1}$$

$$\bar{I}_5 = \bar{I}_{0/V,1} + \bar{a}_5^4 \bar{I}_{I,1} + \bar{a}_5^3 \bar{I}_{II,1} + \bar{a}_5^2 \bar{I}_{III,1} + \bar{a}_5^1 \bar{I}_{IV,1}$$

در این صورت می توان بردار جریانهای واقعی سیستم نامتعادل را بر حسب بردار جریان مولفه متقارن فاز ۱ بصورت زیر نوشت:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \\ \bar{I}_4 \\ \bar{I}_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^4 \\ 1 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^3 \\ 1 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^1 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^2 \\ 1 & \bar{a}_5^4 & \bar{a}_5^3 & \bar{a}_5^2 & \bar{a}_5^1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_{0/V,1} \\ \bar{I}_{I,1} \\ \bar{I}_{II,1} \\ \bar{I}_{III,1} \\ \bar{I}_{IV,1} \end{bmatrix}$$

در حالت کلی رابطه جبری برای این مسئله را بصورت زیر می توان نوشت (برای سادگی در نمایش $\bar{a}_n^i = \bar{a}^i$):

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{I}_{n-1} \\ \bar{I}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 & \dots & \bar{a}^{n-2} & \bar{a}^{n-1} \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a}^4 & \dots & \bar{a}^{n-4} & \bar{a}^{n-2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \bar{a}^{n-2} & \bar{a}^{n-4} & \dots & \bar{a}^4 & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^{n-1} & \bar{a}^{n-2} & \dots & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{I,1} \\ \vdots \\ \vdots \\ \bar{I}_{n-2,1} \\ \bar{I}_{n-1,1} \end{bmatrix}$$

$$\bar{I}_{1,\dots,n} = \bar{T}_n \cdot \bar{I}_{0,I,\dots,n-1}$$

$$\bar{I}_{0,I,\dots,n-1} = \bar{I}_{(0,I,\dots,n-1),I}$$

بردار جریان های مولفه های متقارن فاز ۱

$$\bar{I}_{1,2,\dots,n}$$

بردار جریانهای واقعی سیستم n فاز

$$\bar{T}_n$$

ماتریس تبدیل مولفه های متقارن سیستم n فاز

۲-۲ تجزیه سیستم ۳ فاز نامتعادل با مولفه های متقارن

در یک سیستم سه فاز نیز پیدا کردن مولفه های متقارن $\bar{I}_0, \bar{I}_I, \bar{I}_{II}$ مورد نظر می باشند که منظور مولفه های متقارن فاز ۱ بصورت $\bar{I}_{0,I}, \bar{I}_{I,I}, \bar{I}_{II,I}$ میباشد. برای حل مسئله کافی است معکوس ماتریس نوشته شده، \bar{T}_3 را یافته و با ضرب در ماتریس جریانهای سیستم نامتعادل $(\bar{I}_3, \bar{I}_2, \bar{I}_1)$ ، جریانهای سیستم متعادل بدست می آید. به این معنی که از معکوس ماتریس \bar{T}_3 ، یعنی \bar{T}_3^{-1} ، می توان مولفه های متقارن را بدست آورده و از سیستم نامتعادل به مولفه ها و از مولفه ها به سیستم نامتعادل رسید. برای یک سیستم سه فاز داریم:

$$\bar{I}_{1,2,3} = \bar{T}_3 \bar{I}_{0,I,II}$$

$$\bar{I}_{0,I,II} = \bar{T}_3^{-1} \bar{I}_{1,2,3}$$

اگر فاز \bar{I}_I بعنوان مبنا باشد:

$$\bar{I}_1 = |\bar{I}_1| \angle I_1 = I_1 \angle I_1$$

$$\bar{a} = \bar{a}_3 = e^{j\frac{2\pi}{3}} = e^{j120} = 1 \angle 2\pi/3$$

$$\bar{a}_3^3 = 1 \angle 0 \quad \bar{a}_3^0 = 1 \angle 0$$

$$\bar{a}^2 + \bar{a} + 1 = 0$$

$$\bar{a}^* = \bar{a}^2$$

$$(\bar{a}^2)^* = \bar{a}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{I,1} \\ \bar{I}_{II,1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_I \\ \bar{I}_{II} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_- \\ \bar{I}_+ \end{bmatrix}$$

سیستم سه فازه مستقیم + سیستم سه فازه معکوس + سیستم سه فازه همپولر = سیستم سه فازه نا متعادل

توالی صفر

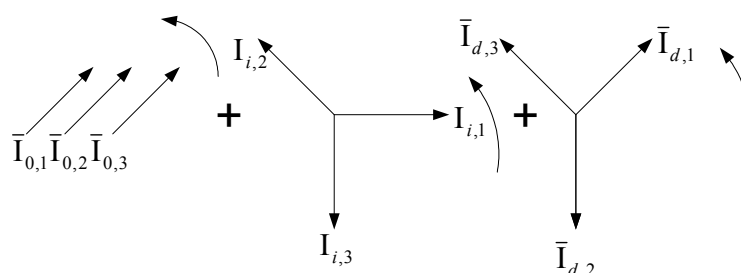
توالی -

توالی +

ترتیب ۰، ۰، ۱

ترتیب ۱، ۱، ۱

ترتیب ۲، ۱، ۱



ترتیب ۲ $\bar{I}_{II,1}$: متشکل از سه بردار مساوی از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاویه ای ۱۲۰ درجه بهم بوده که

توالی فاز مولفه ها با سیستم یکسان است (۱، ۲، ۳ یا abc).

ترتیب ۱، $\bar{I}_{I,1}$: متشکل از سه بردار مساوی از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاویه ای ۱۲۰ درجه بهم بوده که

توالی فاز مولفه ها معکوس سیستم است (۱، ۳، ۲ یا acb).

ترتیب ۰، $\bar{I}_{0,1}$: متشکل از سه بردار مساوی از نظر قدر مطلق و با اختلاف زاویه ای صفر درجه بهم است.

این مجموعه بردارها با سرعت زاویه ای $f = 50 \text{ HZ}$ ، $\omega = 2\pi f$ در حال چرخش هستند.

برای مجموعه بردارهای ولتاژها با ترتیب a,b,c نیز بصورت مشابه می توان نوشت.

$$\bar{V}_a = \bar{V}_{0,a} + \bar{V}_{-,a} + \bar{V}_{+,a} = \bar{V}_{0,a} + \bar{V}_{i,a} + \bar{V}_{d,a}$$

$$\bar{V}_b = \bar{V}_{0,b} + \bar{V}_{-,b} + \bar{V}_{+,b} = \bar{V}_{0,b} + \bar{V}_{i,b} + \bar{V}_{d,b}$$

$$\bar{V}_c = \bar{V}_{0,c} + \bar{V}_{-,c} + \bar{V}_{+,c} = \bar{V}_{0,c} + \bar{V}_{i,c} + \bar{V}_{d,c}$$

برای مجموعه بردارهای ولتاژها با ترتیب 1,2,3 می توان نوشت.

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_{0,1} + \bar{V}_{-,1} + \bar{V}_{+,1} = \bar{V}_{0,1} + \bar{V}_{i,1} + \bar{V}_{d,1}$$

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_{0,2} + \bar{V}_{-,2} + \bar{V}_{+,2} = \bar{V}_{0,2} + \bar{V}_{i,2} + \bar{V}_{d,2} = \bar{V}_{0,1} + \bar{a}\bar{V}_{i,1} + \bar{a}^2\bar{V}_{d,1}$$

$$\bar{V}_3 = \bar{V}_{0,3} + \bar{V}_{-,3} + \bar{V}_{+,3} = \bar{V}_{0,3} + \bar{V}_{i,3} + \bar{V}_{d,3} = \bar{V}_{0,1} + \bar{a}^2\bar{V}_{i,1} + \bar{a}\bar{V}_{d,1}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_d \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_1 \\ \bar{V}_2 \\ \bar{V}_3 \end{bmatrix}$$

اگر فاز \bar{I}_1 به عنوان مبنا باشد داریم.

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{i,1} + \bar{I}_{d,1} = \bar{I}_{0,1} + \bar{I}_{i,1} + \bar{I}_{d,1}$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_{0,2} + \bar{I}_{i,2} + \bar{I}_{d,2} = \bar{I}_{0,1} + \bar{a}\bar{I}_{i,1} + \bar{a}^2\bar{I}_{d,1}$$

$$\bar{I}_3 = \bar{I}_{0,3} + \bar{I}_{i,3} + \bar{I}_{d,3} = \bar{I}_{0,1} + \bar{a}^2\bar{I}_{i,1} + \bar{a}\bar{I}_{d,1}$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_0 \\ \bar{I}_i \\ \bar{I}_d \end{bmatrix} = \bar{T}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ \bar{I}_2 \\ \bar{I}_3 \end{bmatrix}$$

بدست آوردن \bar{T}^{-1} :

$$\bar{T}^t = \bar{T} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \end{bmatrix}$$

$$|\bar{T}| = \det[\bar{T}] = 1(\bar{a}^2 - \bar{a}) + 1(\bar{a}^2 - \bar{a}) + 1(\bar{a}^2 - \bar{a}) = 3(\bar{a}^2 - \bar{a})$$

از روی \bar{T}^t ماتریس کمکی \bar{T}_{adj} را می نویسیم.

$$\bar{T}_{adj} = \begin{bmatrix} \bar{a}^2 - \bar{a} & \bar{a}^2 - \bar{a} & \bar{a}^2 - \bar{a} \\ \bar{a}^2 - \bar{a} & \bar{a} - 1 & 1 - \bar{a}^2 \\ \bar{a}^2 - \bar{a} & 1 - \bar{a} & \bar{a} - 1 \end{bmatrix}$$

با توجه به رابطه زیر خواهیم داشت:

$$\frac{\bar{a} - 1}{\bar{a}^2 - \bar{a}} = \frac{1}{\bar{a}} = \frac{\bar{a}^2}{\bar{a}^3} = \frac{\bar{a}^2}{1} = \bar{a}^2$$

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \bar{a}^2 & \bar{a} \\ 1 & \bar{a} & \bar{a}^2 \end{bmatrix}$$

$$\bar{a} = e^{j120}$$

$$\bar{a} = -1/2 + j\sqrt{3}/2 \quad \bar{a}^2 = -1/2 - j\sqrt{3}/2 \quad \bar{a}^0 = \bar{a}^3 = 1 \quad 1 + \bar{a}^2 + \bar{a} = 0$$

برای یافتن مولفه های فازهای دیگر هر کدام از مولفه ها در بردار \bar{a} یا \bar{a}^2 ضرب می شوند.

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3) \\ \bar{I}_{i,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{a} \bar{I}_3) \\ \bar{I}_{d,1} = \frac{1}{3}(\bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{a}^2 \bar{I}_3) \end{cases} \quad \text{فاز ۱}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,2} = \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{i,2} = \bar{a} \bar{I}_{i,1} \\ \bar{I}_{d,2} = \bar{a}^2 \bar{I}_{d,1} \end{cases} \quad \text{فاز ۲}$$

$$\begin{cases} \bar{I}_{0,3} = \bar{I}_{0,1} \\ \bar{I}_{i,3} = \bar{a}^2 \bar{I}_{i,1} \\ \bar{I}_{d,3} = \bar{a} \bar{I}_{d,1} \end{cases} \quad \text{فاز ۳}$$

در سیستم سه فاز متقارن داریم:

$$\bar{I}_1 = I_1 \angle 0 - \alpha$$

$$\bar{I}_2 = I_2 \angle -120^\circ - \alpha = I_2 \angle 240^\circ - \alpha = \bar{I}_1 \bar{a}^2$$

$$\bar{I}_3 = I_3 \angle -240^\circ - \alpha = I_3 \angle 120^\circ - \alpha = \bar{I}_1 \bar{a}$$

$$\begin{matrix} 0 & 0 \\ - & i \\ + & d \end{matrix}$$

نکته: حتماً دقت نمایید که رعایت نوشتن ترتیب $-i$ در برابر مولفه های متقارن اهمیت دارد. زیرا محل

نوشتن این مولفه ها تعیین کننده عناصر ماتریس تبدیل \bar{T}^{-1} و \bar{T} است. در صورتیکه در برخی مراجع محل

$$\begin{matrix} 0 & 0 \\ + & d \\ - & i \end{matrix}$$

نوشتن مولفه ها بصورت $+d$ باشد در آنصورت ماتریسهای تبدیل بدست آمده \bar{T}^{-1} و \bar{T} معکوس

ماتریسهای ارائه شده در این درس خواهند بود.

مثال: مولفه های ترتیب صفر، ۱ و ۲ (هموپولر، معکوس و مستقیم) جریان سه فاز را در رژیم دائم سینوسی زیر را پیدا کنید.

$$i_1(t) = 5\sqrt{2} \sin(314t) = \sqrt{2} \operatorname{Im}\{\bar{I}_1 e^{j\omega t}\}$$

$$i_2(t) = 0 = \sqrt{2} \operatorname{Im}\{\bar{I}_2 e^{j\omega t}\}$$

$$i_3(t) = 10\sqrt{2} \cos(314t) = 10\sqrt{2} \sin(314t - 90) = \sqrt{2} \operatorname{Im}\{\bar{I}_3 e^{j\omega t}\}$$

در روابط سینوسی و بر حسب مقادیر موثر خواهیم داشت:

$$\bar{I}_1 = 5\angle 0^\circ \quad \bar{I}_2 = 0 \quad \bar{I}_3 = 10\angle -90^\circ$$

مقادیر موثر مقادیر موثر مقادیر موثر

در روابط کسینوسی و بر حسب مقادیر موثر خواهیم داشت:

$$\bar{I}_1 = 5\angle 90^\circ \quad \bar{I}_2 = 0 \quad \bar{I}_3 = 10\angle 0^\circ$$

مولفه های فاز I به صورت زیر هستند:

$$\bar{I}_{0,1} = 1/3(\bar{I}_1 + \bar{I}_2 + \bar{I}_3)$$

$$\bar{I}_{i,1} = 1/3(\bar{I}_1 + \bar{a}^2 \bar{I}_2 + \bar{a} \bar{I}_3)$$

$$\bar{I}_{d,1} = 1/3(\bar{I}_1 + \bar{a} \bar{I}_2 + \bar{a}^2 \bar{I}_3)$$

$$\bar{a} = e^{j\frac{2\pi}{3}} = 1\angle 120^\circ$$

$$\bar{a}^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = 1\angle 240^\circ$$

$$\bar{a} \bar{I}_2 = 0 \quad \bar{a}^2 \bar{I}_2 = 0$$

$$\bar{a} \bar{I}_3 = 10\angle 30^\circ \quad \bar{a}^2 \bar{I}_3 = 10\angle 150^\circ$$

$$\bar{I}_{0,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle -90^\circ) = 3.72\angle -63.43$$

$$\bar{I}_{i,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle 30^\circ) = 4.84\angle 20.1$$

$$\bar{I}_{d,1} = 1/3(5 + 0 + 10\angle 150^\circ) = 2.06\angle 126.2$$

,

$$\bar{I}_{0,2} = 3.72\angle -63.43$$

$$\bar{I}_{i,2} = 4.84\angle 140.1$$

$$\bar{I}_{d,2} = 2.06\angle 366.2 \approx 6.2$$

,

$$\bar{I}_{0,3} = 3.72\angle -63.43$$

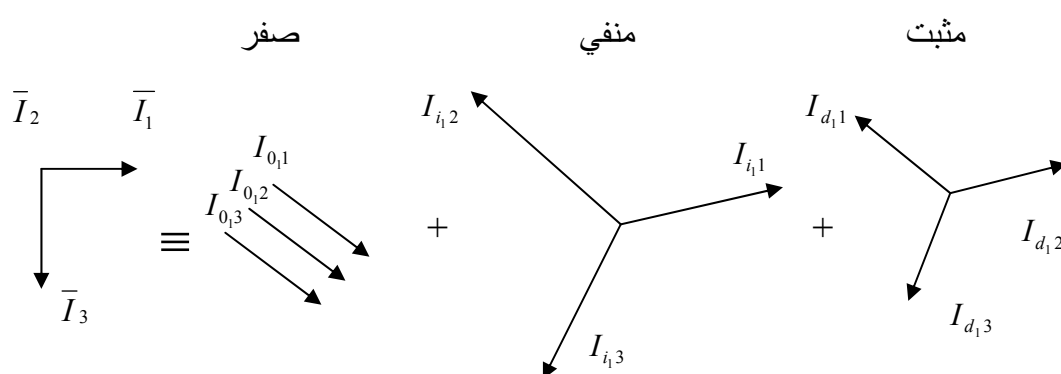
$$\bar{I}_{i,3} = 4.84\angle 260.1$$

$$\bar{I}_{d,3} = 2.06\angle 246.2$$

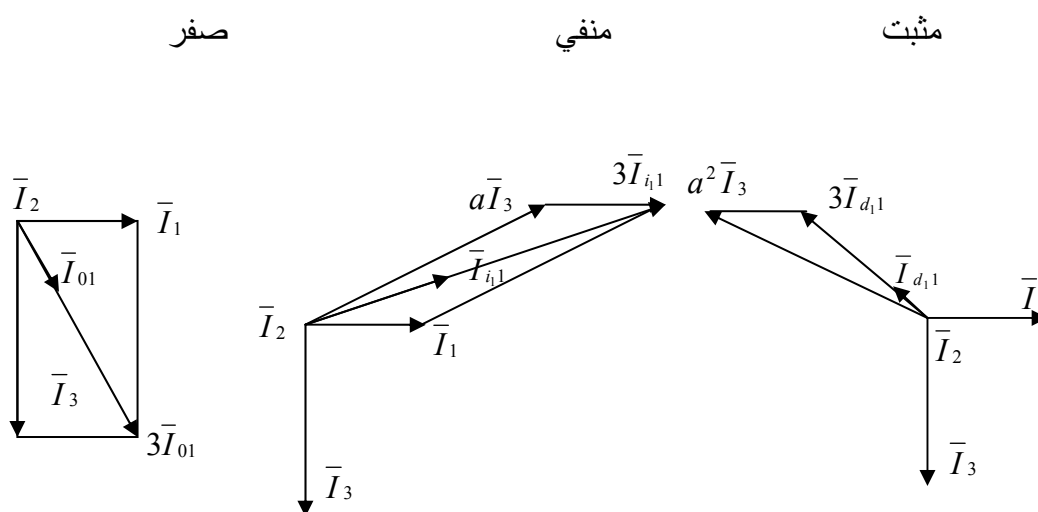
ملاحظه می شود که نتیجه قبلی حاصل شده است:

فاز ۱	فاز ۲	فاز ۳
$I_{0,1}$	$I_{0,2} = I_{0,1}$	$I_{0,3} = I_{0,1}$
$I_{i,1} \rightarrow$	$I_{i,2} = aI_{i,1}$	$\rightarrow I_{i,3} = a^2 I_{i,1}$
$I_{d,1}$	$I_{d,2} = a^2 I_{d,1}$	$I_{d,3} = aI_{d,1}$

بوده و در شبکه توالی صفر نسبت به شین مرجع مدار باز خواهیم داشت. شبکه توالی صفر چنین اتصالی در شکل زیر نشان داده شده است.



تحقیق درستی بردار های مولفه های متقارن از روش ترسیمی



فصل سوم

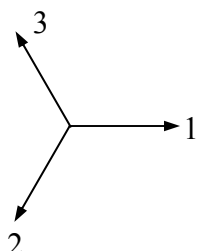
اتصال کوتاه های نامتقارن

Unsymmetrical Faults Analysis

۱-۳ عوامل اتصالی در شبکه

در حالات زیر شبکه قدرت در حالت نامتعادل کار می کند:

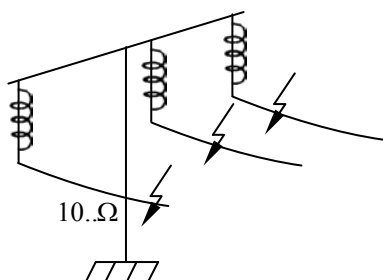
- ۱- به خاطر نیروهای محرک نامتعادل ژنراتورها (که اغلب بدین صورت نبوده و ژنراتورها دارای ولتاژ تولیدی متعادل و متقارن می باشند)



- ۲- به خاطر عیوب موجود در شبکه قدرت

- ۳- تغذیه یک بار نامتقارن (تکفاز یا دوفاز) توسط سیستم سه فاز

- ۴- اتصال کوتاه ها: علل این اتصال کوتاهها میتواند پیرای عایقهای موجود در شبکه که به خاطر استفاده زیاد و علل مکانیکی، عایق یک کابل خراب شده باشد. علت دیگر شاخ و برگهای درختان در یک منطقه کوهستانی، سقوط ناگهانی یک شیء روی شبکه، عوامل جوی مانند صاعقه. اگر مقدار بار نشست شده روی کابلها از یک حدی بیشتر باشد ممکن است جرقه گیر نتواند تمام بار را به زمین انتقال دهد.



اگر مقاومت مسیر دکل 10Ω بوده و بار زیادی روی کابلها نشسته و جریان 50 KA باشد، اختلاف پتانسیل دکل با زمین 500 KV خواهد بود (برای خط مثلا 132 KV) با توجه به اینکه فواصل کابلها برای 500 KV طراحی نشده، بین کابلها اتصال کوتاه می شود.

۵- از رژیم گذرا: به عنوان مثال در هنگام قطع یک کلید یا در هنگام قطع یک سکسیونر اتصال کوتاه روی می دهد چون فرآیند قطع باعث ایجاد اختلاف ولتاژ زیاد با فاصله زیاد می باشد. اغلب موارد اتصال کوتاهها، تکفاز بوده یا شروع آنها با تکفاز است و رفته رفته به سایر فازها نیز سرایت می کند. حدود ۷۰٪ اتصالی ها از تکفاز شروع شده و کم کم به دیگر فازها نیز سرایت می کند.

۲-۳ عواقب اتصالی در شبکه:

چون با جریان و ولتاژ بالا در اتصال کوتاه سر و کار داریم اگر مدت زیادی این اتصال کوتاه در شبکه باشد ممکن است عواقب ناگواری در سیستم داشته باشد لذا باید بر طرف شود و به محض اینکه عامل حفاظتی شبکه احساس کرد که جریان زیادی وجود دارد به کلیدها (دیژنکتورها) فرمان قطع می دهد. برای سفارش کلید قطع باید جریانی که این کلیدها تحت ولتاژ نامی قطع می کنند دانسته و محاسبه شود. قدرت قطع کلید را جریان قطع کلید مشخص می کند.

$$\text{قدرت قطع} = \text{جریان قطع} \times \text{جریان ولتاژ نامی}$$

پس باید بدترین اتصال را در بدترین نقطه به دست آورد. محاسبات اتصال کوتاه نامتقارن از نظر مؤلفه های متقارن بررسی می شود.

اگر جریان 50KA در حدود 0.2 ثانیه برقرار باشد. کابل گرمایی RI^2t تولید می کند که متناسب با مجذور جریان است. این گرما خیلی بالاست، ممکن است عایق کابل آسیب دیده و باعث اتصالی های دیگر شبکه مانند زیر بشود.

۱- سوزاندن عایقها

۲- خراب کردن عایقهای ترانس

۳- نیروهای الکتروپویایی بر روی دو کابل مجاور هم می تواند موجب خم شدن باسها یا شینها پست ها شود (بین سیم پیچهای اولیه و ثانویه ترانس نیز وجود دارد).

۴- سوزاندن سر پلمپ کابلها

۵- اثر نامساعد روی خطوط مخابراتی

۶- گرفتن پایداری از شبکه

وقوع جریان عیب قوی باعث ایجاد افت ولتاژ قوی شده و در نهایت ماشینهای سنکرون از حالت سنکرونی خارج می شوند. برای به حداقل رساندن این عواقب باید جریان اتصال کوتاه در اسرع وقت از بین برود و کلید قطع این عمل را باید انجام دهد، بنابراین:

- ۱- کلید قطع باید برای بدترین اتصال در بدترین نقطه و در حداقل زمان عمل کند. (تجهیزات شبکه)
- ۲- این اتصال ها را باید خوب تشخیص داد و به محض تشخیص به وسیله سیستمهای حفاظتی در کمتر از ۷ یا ۸ سیکل دستور قطع دهد. (عیوب را به نحو احسن باید تشخیص داد. سیستمهای اندازه گیری در شبکه قرار داد که وقتی شبکه به طور نرمال کار می کند چیزی نشان نمیدهند اما به محض اینکه جریان نامتعادلی در شبکه داشتیم و وقتی دستگاههای اندازه گیری مولفه های هموپلر و معکوس را احساس کردند. فرمان قطع صادر میشود).

طبق مدار معادل ترتیب صفر شبکه جریان اتصال کوتاه نسبت معکوس با امپدانس هموپلر شبکه دارد. پس برای کم کردن جریان اتصال کوتاه باید امپدانس هموپلر را با گذاشتن ترانس یا بوبین پترسون زیاد کرد. وقتی که نقطه زمین را صفر قرار دهیم اگر نقطه صفر ترانس های ثانویه یا اولیه صفر نباشند ولتاژها در دیگر فازها $\sqrt{3}$ برابر افزایش می یابد. زمین کردن نقطه صفر در ولتاژ بالا بوسیله بوبین پترسون و در ولتاژهای پایین بوسیله مقاومت صورت گرفته که در کار شبکه در حالت نرمال هیچ تأثیری ندارد.

۳-۳ انتخاب کلیدهای قدرت (Circuit Breakers)

جریان نامی یک کلید، جریانی است که کلید باید قابلیت قطع آن را داشته باشد. این جریان کمتر از جریان موقت اتصال کوتاه بوده و به سرعت قطع کلید بستگی دارد. سرعت قطع کلیدها معمولاً به صورت تعداد سیکل مانند ۲، ۳، ۵ و ۸ اندازه گیری می شود (یعنی تعداد سیکل پس از وقوع اتصال کوتاه تا خاموش شدن کامل قوس در کلید). مقدار نامی قدرت قطع یک کلید (یا ظرفیت اتصال کوتاه یا قدرت قطع):

$$SCC = \sqrt{3} \text{ (KV ولتاژ نامی) } [KA \text{ جریان قطع نامی}] \text{ [MVA]}$$

بیشترین مقدار SCC در اتصال کوتاه متقارن سه فاز به دست می آید. در اتصال کوتاه تکفاز به زمین در نزدیکی ژنراتورها S_{22} حاصله بیشتر از ظرفیت اتصال کوتاه سر فاز متقارن است و قدرت قطع کلید باید بر حسب آن تعیین شود. در حالت کلی ظرفیت اتصال کوتاه روی حالت تکفاز به زمین در هر نقطه محاسبه می شود و S_{22} بزرگتر بعنوان ملاک تعیین قدرت قطع کلید در نظر گرفته می شود. باید یک نقطه صفر از شبکه را بوسیله بوبین پترسون حتماً به زمین وصل کرد.

۳-۴ محاسبات اتصال کوتاه

به عیب های اتصال کوتاه عیب های نوع موازي (Shunt Type Faults) گفته می شود و شامل انواع زیر می باشد:

- ۱- عیب اتصال کوتاه تکفاز به زمین (LG)
- ۲- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم بدون زمین (LL)
- ۳- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم با زمین (LLG)
- ۴- عیب اتصال کوتاه سه فاز به هم بدون زمین (LLL) – عیب اتصال کوتاه متقارن
- ۵- عیب اتصال کوتاه سه فاز به هم و با زمین (LLLG) – عیب اتصال کوتاه متقارن
- ۶- عیب اتصال کوتاه دو فاز به هم بدون زمین و فاز سوم به زمین (LL-LG)

عملاً اتصال کوتاه مستقیم به زمین نبوده و همراه با یک مقاومت (\bar{Z}_f) است. اگر کلید قطع را برای حالت بدون مقاومت ($\bar{Z}_f = 0$) طراحی کنیم خیال ما راحت است چون در این حالت جریان بیشتر از حالتی است که با مقاومت وصل شده باشد. اتصال دو فاز یا سه فاز نسبت به هم نیز همین مسئله را داراست باید جریانها را در فازها حساب کرد و کلید قطعی که در طرف این خط قرار داده شده برای بدترین حالت محاسبه شود.

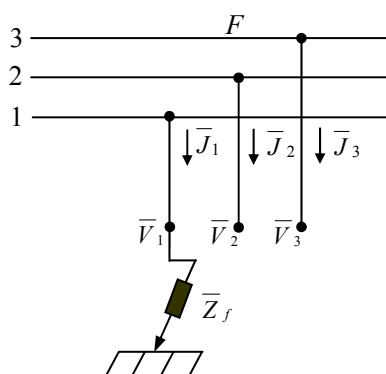
۳-۵ فرضهای مهم

- ۱- اتصال کوتاه به طور غیرمستقیم، همراه با مقاومت و امپدانس در محل اتصال بررسی می شود ($\bar{Z}_f \neq 0$).
- ۲- از جریان نامی قبل از اتصال در شبکه (در آن فاز) در مقابل جریان اتصال کوتاه موجود در فاز، صرفنظر می کنیم چرا که حدود سه تا چهار درصد جریان اتصال کوتاه است. همچنین در همه جایی شبکه در حالت بی باری ولتاژ $1 pu$ است.
- اگر در محل ژنراتورها فازهای متعادل و متقارن و مستقیم داشته باشیم در تمامی نقاط حتی در محل اتصال کوتاه هم نیروهای متعادل مستقیم یک پریونیت خواهد بود.

۳-۶ اتصال کوتاه تکفاز با زمین

می خواهیم اتصال کوتاه فاز به زمین را بررسی کنیم ولتاژ در محل اتصال قبل از اتصال کوتاه و قبل از اتصال کوتاه نیروهای محرک مولد است و ۱۰۰٪ ولتاژ (حدود سه تا چهار درصد خطا) یعنی یک پریونیت در تمامی نقاط شبکه خواهیم داشت. بیشتر از سه تا چهار درصد تقریب را در سفارش کلید در نظر می گیریم و شبکه را با فرضها و پیش بینی های ده ساله در نظر بگیریم (در حالت دقیق ولتاژ نقطه عیب را قبل از وقوع عیب در نظر می گیریم).

- ۱- کار با المانی است که در آن اتصال کوتاه رخ داده که در سیستم سه فاز بررسی می کنیم.
 - ۲- در محل اتصالی سه هادی فرضی را بیرون می کشیم. برای اتصال کوتاه تکفاز با زمین یک فاز را به زمین وصل می کنیم برای هر کدام جریان $\bar{J}_1, \bar{J}_2, \bar{J}_3$ در نظر می گیریم.
- قبل از اتصال کوتاه $\bar{J}_1^0 = \bar{J}_2^0 = \bar{J}_3^0 = 0$ و ولتاژ نامی $\bar{V}_1^0, \bar{V}_2^0, \bar{V}_3^0$ برابر یک پریونیت می باشد.
- بعد از اتصال کوتاه با زمین وضعیت جریانها $\bar{J}_2^f = \bar{J}_3^f = 0$ و $\bar{J}_1 = ?$ و وضعیت ولتاژها $\bar{V}_2, \bar{V}_3 = ?$ و $\bar{V}_1 = \bar{Z}_f \bar{J}$ می باشد.



لازم به ذکر است \bar{J} به جای \bar{I} بکار برده شده تا با جریانهای حالت متعادل اشتباه نشود.

هدف پیدا کردن بردارهای ولتاژها و جریانها در هنگام عیب بصورت $\begin{bmatrix} \bar{J}_1^f \\ \bar{J}_2^f \\ \bar{J}_3^f \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{V}_1^f \\ \bar{V}_2^f \\ \bar{V}_3^f \end{bmatrix}$ می باشند. که معلومات

آن $\bar{J}_2^f = 0, \bar{J}_3^f = 0, \bar{V}_1^f = \bar{Z}_f \bar{J}_1^f$ است. اگر مولفه ها را به دست آوریم می توانیم خود مجهولات را نیز به

دست آوریم و محاسبات را بر حسب مولفه ها انجام دهیم. $\begin{bmatrix} \bar{J}_0 \\ \bar{J}_i \\ \bar{J}_d \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \bar{V}_0 \\ \bar{V}_i \\ \bar{V}_d \end{bmatrix}$ مجهولات مسئله میباشد. برای يك فاز

بدست آورده و برای سه فاز تعمیم خواهیم داد.

$$\left\{ \begin{array}{l} J_0 + a.J_i + a^2.J_d = 0 \\ J_0 + a^2.J_i + a.J_d = 0 \\ V_0 + V_i + V_d = 0 \text{ or } Z_f J_1 \end{array} \right. \Rightarrow \begin{array}{l} a.J_i + a^2.J_d = a^2.J_i + a.J_d \\ (a - a^2).J_i = (a - a^2).J_d \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} J_i = J_d \\ J_0 = J_i \end{array}$$

یعنی مولفه های جریان باهم برابر می باشند $J_0 = J_d = J_i$

$$\begin{bmatrix} J_o \\ J_i \\ J_d \end{bmatrix} = 1/3 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Rightarrow J_i = J_o = J_d = (1/3) \cdot J_1$$

قبل از اتصال کوتاه نیروی های محرکه به صورت زیر بودند $V_d = E, V_i = V_o = 0$
 مجهول ها $V_o, V_i, V_d, J_o, J_i, J_d$ می باشند و معادله ها درست می باشند با جمع کردن سه معادله پایینی
 V_1, V_2, V_3 به دست می آیند.

$$J_d = E / [(Z_o + Z_d + Z_i) + 3Z_f] = J_i = J_o \Rightarrow V_d = E - Z_d \cdot E / [(Z_d + Z_i + Z_o) + 3Z_f]$$

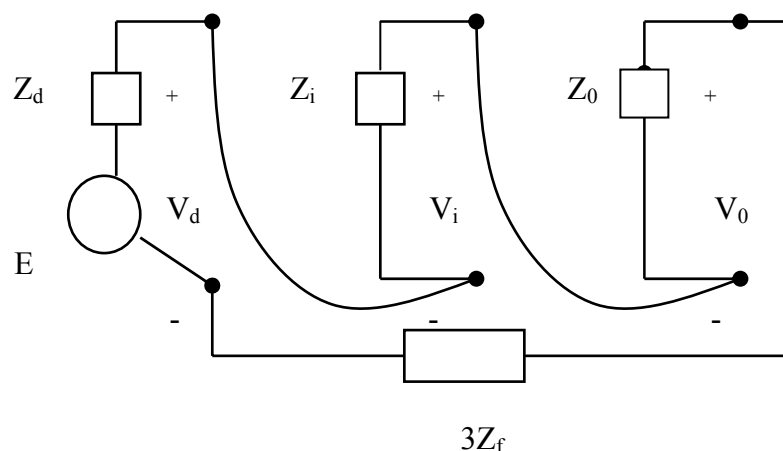
$$J_1 = J_o + J_d + J_i = 3E / [(Z_o + Z_d + Z_i) + 3Z_f] \quad V_i = -E \cdot Z_i / [(Z_o + Z_i + Z_d) + 3Z_f]$$

$$V_d = (Z_i + Z_o)E / [(Z_d + Z_o + Z_i) + 3Z_f] \quad V_o = -E \cdot Z_o / [(Z_o + Z_d + Z_i) + 3Z_f]$$

$$V_1 = Z_f \cdot J_1$$

$$V_2 = V_o + a \cdot V_i + a^2 \cdot V_d$$

$$V_3 = V_o + a^2 \cdot V_i + V_d$$



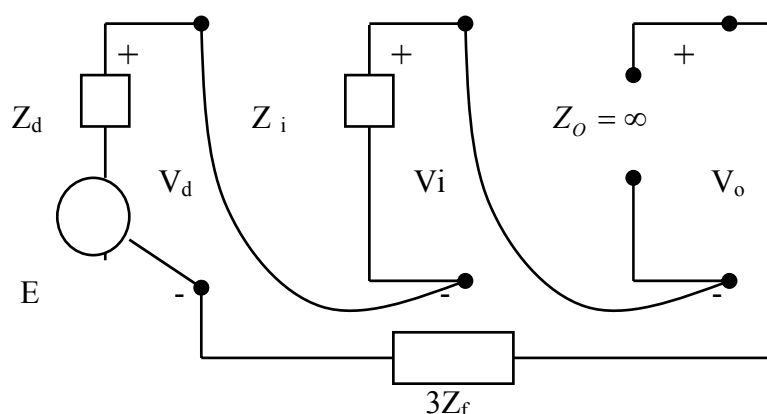
الف: $Z_o \neq \infty$

در سیستم اتصال کوتاه تکفاز بزمین $Z_o \neq \infty$ میباشد (وقتی که نقطه صفر از شبکه زمین شده باشد) و سه سیستم هموپلر و مستقیم و معکوس را با هم سری وصل می کنیم. برای اینکه $Z_o \neq \infty$ باشد باید حداقل یک نقطه صفر از شبکه به زمین وصل شده باشد (بوسیله بوبین پترسون که امپدانس بوبین Z_o می باشد).

ب : وقتی تمام صفر شبکه از زمین ایزوله باشد $Z_o = \infty$

I_1 نمی تواند عبور کند چون یکی از Z ها ∞ است. در حالت اول نقطه صفری داشتیم که جریان عبوری بزمین را دوباره به شبکه برگرداند ولی در این حالت جریان در یک مدار باز قرار گرفته است پس :

$$J_1 = 0 \rightarrow J_0 + J_d + J_i = 0 \rightarrow 3J_o = 0 \rightarrow J_o = 0$$



$$\begin{pmatrix} I_1=0 \\ I_2=0 \\ I_3=0 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} I_o=0 \\ I_i=0 \\ I_d=0 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_i=0 \\ V_o=E \\ V_d=-E \end{pmatrix} \quad \begin{aligned} V_1 &= V_o + V_i + V_d = 0 \\ V_o &= (V_i + V_d) = -E \end{aligned}$$

$$V_1 = 0$$

$$V_2 = -E + 0 + a^2 E = (a^2 - 1) E = (-3/2 - j\sqrt{3}/2) E$$

$$V_3 = -E + 0 + a E = (a - 1) E = (-3/2 + j\sqrt{3}/2) E$$

$$\left\{ \begin{aligned} |V_1| &= 0 \end{aligned} \right.$$

وقتي فاز يك به زمین شده وصل باشد و تمامی نقاط صفر شبکه از زمین ایزوله باشند

ولتاژ های فاز دیگر به اندازه ۷۰٪ افزایش می یابد اما عایق ها و

$$|V_2| = \sqrt{3}E = 1.732E$$

مقره ها برای ۱۰-۱۵٪ اضافه ولتاژ طراحی و محاسبه شده اند

$$|V_3| = \sqrt{3}E = 1.732E$$

در این حالت عایق بندی فاز های سالم معیوب خواهد بود پس بایستی $Z_o \neq \infty$ باشد و برای این کار باید حداقل

یک نقطه صفر از شبکه زمین شده باشد برای محدود کردن جریان های اتصال کوتاه توسط بوبین اتصال کوتاه

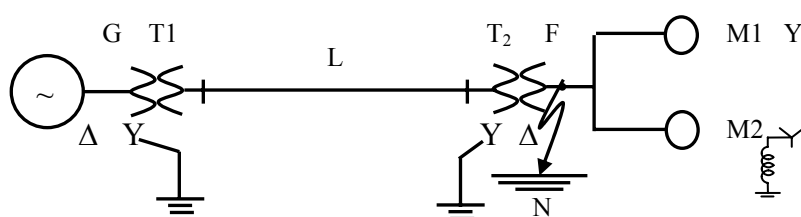
می کنیم .

مثال) يك ژنراتور سه فاز با قدرت نامي 20MVA و ولتاژ نامي 11kv داراي راکتانس زیرگذراي 20% است. این ژنراتور از طریق يك خط انتقال و دو ترانسفورماتور در ابتدا و انتهاي خط، دو موتور الكتريكي با ولتاژ 10kv و قدرتهاي نامي 7.5MVA و 15MVA را كه داراي راکتانس زیرگذراي 25% مي باشند را تغذيه مي كند. ترانسفورماتورهاي سه فاز هر دو داراي مقادير نامي 30MVA ، 10.8/121kv با اتصال ΔY و راکتانس نشتي 10% leakage هستند. مقدار راکتانس سري خط انتقال برابر 100Ω مي باشد. با فرض برابري راکتانس ترتيب معكوس ماشين ها باراکتانس زیرگذرا و صرفنظر كردن از مقادير مقاومتي و در نظر گرفتن مقادير نامي ژنراتور بعنوان مقادير مبناي مدار سه فاز مطلوبست

الف) ترسيم شبکه هاي ترتيب مستقيم، معكوس و صفر با مقادير پريونييت

ب) قبل از وقوع عيب تك فاز به زمين بدون امپدانس عيب (LG) در نقطه F ، موتور ها در شرايط بارداري با قدرت 7.5MW ، 15 و ولتاژ 10kv و ضريب قدرت 0.8 lead پيش فاز قرار دارند. اگر از جريان قبل از عيب صرفنظر گردد، جريان عيب و جريان زیرگذرا را در تمام قسمتهاي شبکه بدست آوريد.

پ) جريانهاي عيب را بدون صرفنظر كردن از جريان قبل از عيب محاسبه نماييد.



راکتانسهاي ترتيب صفر ژنراتور و موتور ها $0.06P_u =$

راکتورهاي محدود کننده جريان ژنراتور و موتور دوم $2.5\Omega =$

راکتانس ترتيب صفر خط انتقال $300\Omega =$

حل)

الف) مقادير مبنا:

$$G : S_b = S_n = 25MVA \quad , \quad V_b = V_n = 11kv$$

$$L : S_b = 25MVA \quad , \quad V_b = 11 \times \frac{121}{10.8} = 123.2kv$$

$$M_1, M_2 : S_b = 25MVA \quad , \quad V_b = 123.2 \times \frac{10.8}{121} = 11kv$$

مقادیر درصد (پریونیت) راکتانس‌ها

$$G : X_d = X_i = j0.2Pu \Rightarrow X_0 = j0.06Pu$$

$$\begin{cases} T_1 \\ T_2 \end{cases} : j0.1 \times \frac{25}{30} \times \left(\frac{10.8}{11} \right)^2 = j0.0805 Pu \Rightarrow X_0 = X_d = X_i = j0.0805 Pu$$

$$L_1 : j100 / Z_b = \frac{(123.2k)^2}{25M} = j0.1647 Pu \Rightarrow X_0 = j300 / Z_b = \frac{(123.2k)^2}{25M} = j0.494 Pu$$

$$M_1 : j0.25 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = j0.345 Pu = X_d, X_i$$

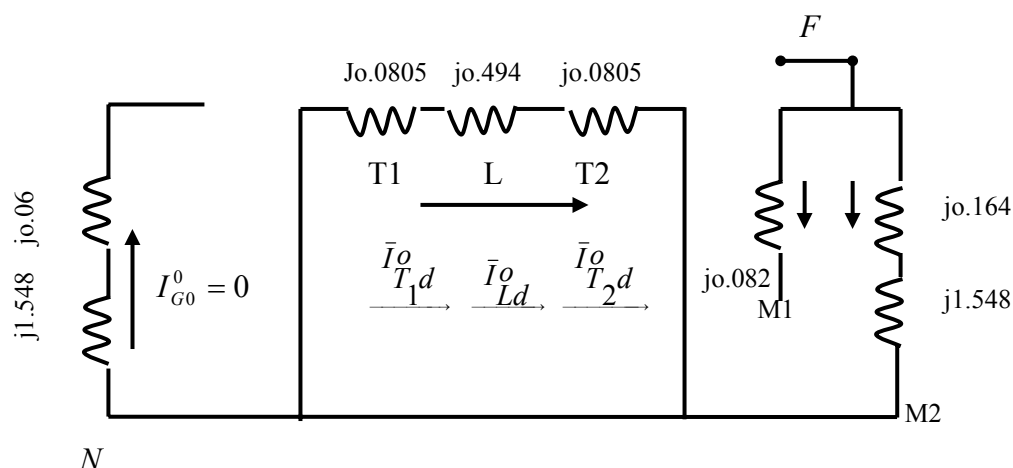
$$M_2 : j.25 \times \frac{25}{7.5} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = j0.69 Pu = X_d, X_i$$

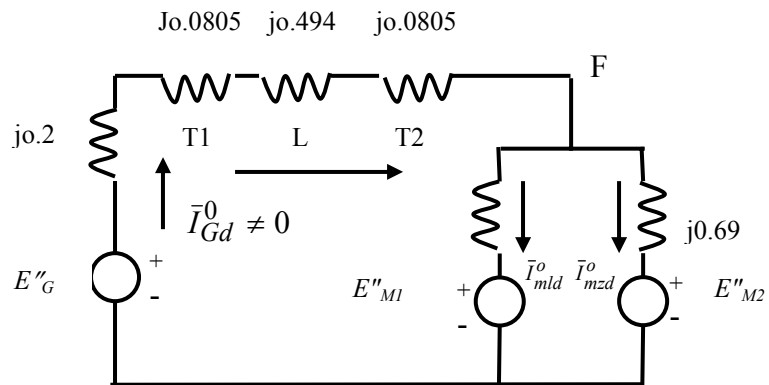
$$X_o = j0.06 \times \frac{25}{15} \times \left(\frac{10}{11} \right)^2 = j0.082 Pu \quad X_o = j0.06 \times \frac{25}{7.5} \left(\frac{10}{11} \right)^2 = j0.164 Pu$$

$$\text{Current limiting Reactor : } \begin{matrix} G \\ M_2 \end{matrix} \left\{ j2.5 / Z_b = \frac{(11k)^2}{25M} = j0.516 Pu = Z_n \right. \text{ یا } X_n$$

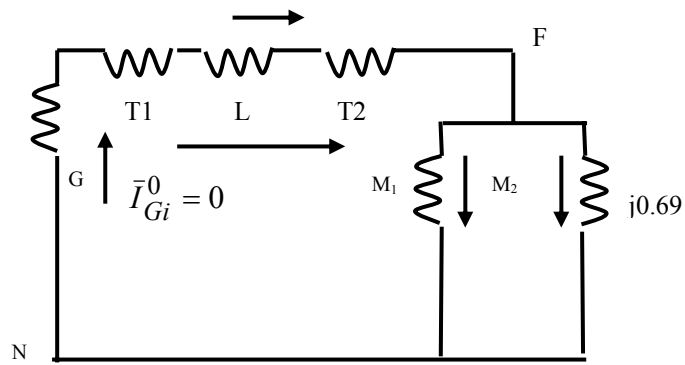
$$X_o = 3 \times j0.516 = j1.548 Pu$$

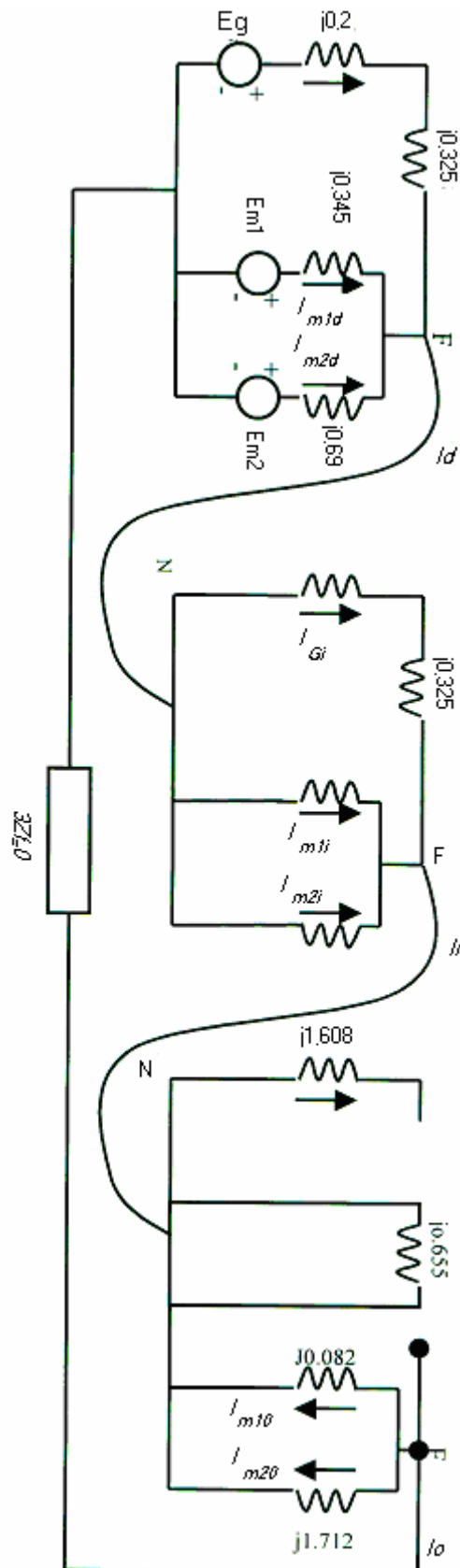
شبکه توالی صفر، مثبت و منفی به ترتیب زیر می باشند.





(ب)





$$E_G'' = E_{M1}'' = E_{M2}'' = V_F^0 (\text{Prefault Voltage at } F) = \frac{10k}{11k} = 0.909 \text{ Pu}$$

چون از جریان قبل از عیب صرفنظر شده است سطح ولتاژ در تمام نقاط شبکه یکسان است.

تعویض شبکه ترتیب مثبت با مدار معادل تونن:

$$\bar{Z}_d = \frac{j0.525 \times j0.23}{j0.525 + j0.23} = j0.16 \text{ Pu}$$

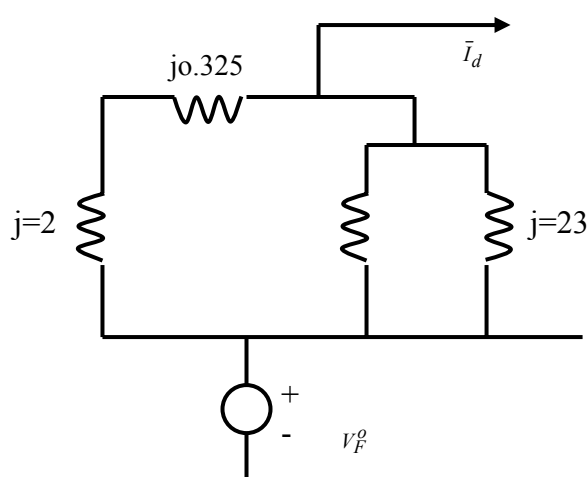
همچنین در شبکه ترتیب منفی:

$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_d = j0.16 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_d = \bar{I}_2 = \bar{I}_o = \frac{V_F^0}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0 + 3\bar{Z}_f} = \frac{0.909}{j2.032} = -j0.447 \text{ Pu}$$

$$\bar{I}_1 = \bar{I}_0 + \bar{I}_i + \bar{I}_d = 3\bar{I}_d = -j1.341 \text{ Pu}$$

جریان عیب



چون هیچ جریانی از شبکه در حالت بی باری برای مدار معادل تونن نمی‌گذرد توانستیم براحتی V_F^0 را در قسمت معیوب قرار دهیم. در صورتیکه اگر شبکه بار دار بود بایستی ولتاژ نقطه F به زمین در حالت بارداری محاسبه می‌شد. بدترین کار در محاسبه مدار معادل تونن این است که امپدانس معادل تونن با صفر کردن منابع محاسبه شده و بجای بکار بردن ولتاژ سر نقطه تونن، امپدانس معادل تونن را با منبع مدار اولیه سری کنیم. (بدترین اشتباه مداری)

جریانهای مولفه ها :

$$\bar{I}_{Gd}^f = -j0.447 \times \frac{j0.23}{j0.755} = -j0.136Pu \Rightarrow \begin{cases} \bar{I}_{Gi}^f = -j0.136Pu \\ \bar{I}_{M12d}^f = -j0.447 \times \frac{j0.525}{j0.755} = -j0.311Pu \Rightarrow \bar{I}_{M12i}^f = -j0.311Pu \\ \bar{I}_{Go}^f = 0, I_{Mlo}^f = 0, \bar{I}_{M20}^f = \bar{I}_o = -j0.447Pu \end{cases}$$

جریانهای فازها :

$$G: \begin{bmatrix} I_{G1} \\ I_{G2} \\ I_{G3} \end{bmatrix}^f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j0.136 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j0.272 \\ j0.136 \\ j0.136 \end{bmatrix}$$

$$M_1, M_2: \begin{bmatrix} I_{M12,1} \\ I_{M12,2} \\ I_{M12,3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -j0.447 \\ -j0.311 \\ -j0.311 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -j1.069 \\ -j0.136 \\ -j0.136 \end{bmatrix}$$

نکته: جریانها و ولتاژهای فازهای همنام با استاندارد $Y\Delta$ کلاسیک ترتیب مثبت خط انتقال نسبت به ژنراتور

$$\begin{Bmatrix} A-a \\ B-b \\ C-c \end{Bmatrix} \text{ (نسبت } \Delta \text{ در } T_1 \text{)} -90^\circ \text{ شیفیت می یابد.}$$

نکته: جریانها و ولتاژهای فازهای همنام با استاندارد $Y\Delta$ کلاسیک ترتیب منفی خط انتقال نسبت به ژنراتور y) نسبت به Δ در T_1 $+90^\circ$ شیفیت می یابد.

$$\bar{I}_{Ld}^f = -j\bar{I}_{Gd}^f = -j(-j0.136) = -0.136Pu$$

$$\bar{I}_{Li}^f = +j\bar{I}_{Gi}^f = j(-j0.136) = 0.136Pu$$

جریان ترتیب صفر در خط جریان نمی یابد. $\bar{I}_{Lo}^f = 0$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_{L1} \\ \bar{I}_{L2} \\ \bar{I}_{L3} \end{bmatrix}^f = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.136 \\ -0.136 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ a-a^2 \\ a^2-a \end{bmatrix} 0.136$$

$$M_1: \bar{I}_{M1}^o = \frac{P_{m1}}{V_{m1} \times \cos \vartheta_{m1}} \angle \cos^{-1} \vartheta_{m1} = \frac{15M/25M}{0.909 \times 0.8} \angle 36.86^\circ = 0.825 \angle 36.86^\circ Pu$$

$$M_2: \bar{E}_{M2}^o = \frac{7.5M/25M}{0.909 \times 0.8} \angle 36.86^\circ = 0.4125 \angle 36.86^\circ = 0.33 + j0.246Pu$$

$$\bar{I}_{M12}^0 = \bar{I}_{M1} + \bar{I}_{M2} = 0.99 + j0.743 \text{ Pu} = \bar{I}_{Gd}^0$$

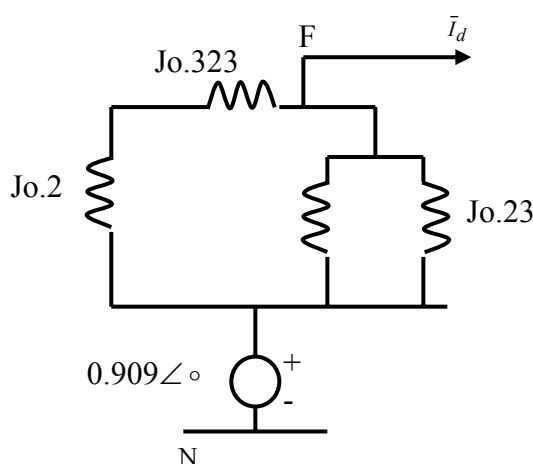
ولتاژهاي زیرگذراي موتورها و ژنراتور

$$\begin{aligned} M_1 : \bar{E}_{m1}'' &= \bar{V}_{m1} - \bar{Z}_{m1} \bar{I}_{m1}^D = 0.909 \angle 0^\circ - j0.345 (0.825 \angle 36.86^\circ) \\ &= 1.08 - j0.228 = 1.104 \angle -11.92^\circ \text{ Pu} \end{aligned}$$

$$M_2 : \bar{E}_{m2}'' = 0.909 \angle 0^\circ - j0.69 (0.4125 \angle 36.86^\circ) = 1.08 - j0.228 = 1.104 \angle -11.92^\circ \text{ Pu}$$

$$\begin{aligned} G : \bar{E}_G'' &= \bar{V}_G + (\bar{Z}_G + \bar{Z}_{T1} + \bar{Z}_L + \bar{Z}_{T2}) \bar{I}_G^o = 0.909 + j0.525 (1.2375 \angle 36.86^\circ) \\ &= 0.52 + j0.52 = 0.735 \angle 45^\circ \text{ Pu} \end{aligned}$$

توجه کنید که با در دست بودن ولتاژهاي زیرگذراي موتورها و ژنراتور مدار معادل تونن ترتیب مثبت همان مدار قبلي خواهد بود.



$$\bar{V}_{th} = \bar{V}_{FN} = \bar{V}_{m1} = \bar{V}_{m2} = \bar{V}_F^0$$

بنابراین در عمل نیازی به محاسبه $E_G'', E_{m2}'', E_{m1}''$ نخواهد بود و فقط بایستی جریانها حساب می‌شدند.

از سوي ژنراتور به سمت محل عیب

$$\frac{\bar{E}_G'' - \bar{V}_{FN}''}{j0.2 + j0.325} = 1.236 \angle 36.8$$

$$\bar{I}_{m12d} = \bar{I}_{m12d}^o + \bar{I}_{m12d}^f = (0.99 + j0.743) + (-j0.136) = 0.99 + j1.054 \text{ Pu}$$

:

از سوي محل عیب به موتورها

$$\bar{I}_{m12d} = \bar{I}_{m12d}^0 - \bar{I}_{m12d}^f = (0.99 - j - 1.054) \text{ Pu}$$

از سوي موتور ها به سمت محل عيب

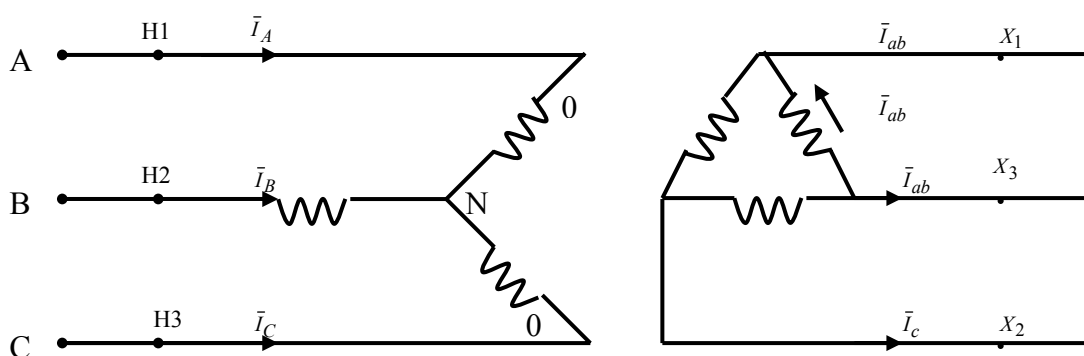
$$-0.99 - j1.1054Pu$$

در اين مسئله چون راکتانس ترتيب صفر بزرگ بود جريان بار (قبل از عيب) قابل مقايسه و حتي بزرگتر از جريان عيب بود در صورتيکه در مسائل واقعي و تحت شرايط عادي جريان بار نسبت به جريان عيب قابل صرفنظر کردن است.

۷-۳ بررسی نقش ترانسفورماتور ها

استاندارد کلاسيک (اين نوع اتصال معمولاً در محاسبات بکار مي‌رود)

حالت (۱): ترانسفورماتور سه فاز $Y\Delta$ (اوليه ستاره ثانويه مثلث) را در نظر بگيريد که سيم پيچي هاي هر فاز بصورت موازي در اوليه و ثانويه بهمد يگر کوپل مغناطيسي شده باشد. ترتيب پلاريته ها بصورت زير مي-باشد.



بر اساس نقاط سيم پيچ ها V_{AN} هم فاز با V_{bc} است

- با علامتگذاري ABC براي طرف Y مي‌توان به روشهاي مختلف علامتگذاري abc را براي طرف Δ انجام داد.

- در يك علامتگذاري که در محاسبات زير مناسب باشد (حالت فوق):

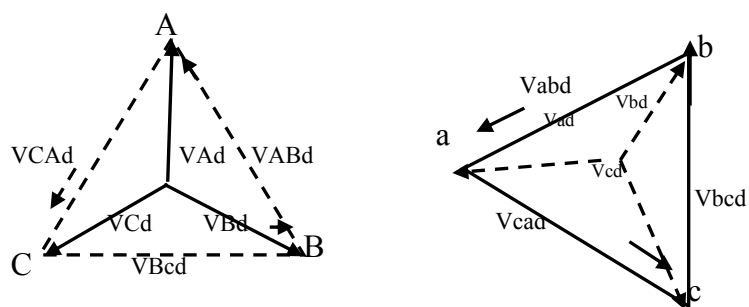
در حالت متقارن ترتيب مثبت ولتاژ فاز a نسبت به نقطه خنثي مجازي n در طرف Δ $90^\circ \leq$ جلوتر است

نسبت به ولتاژ فاز A نسبت به نقطه خنثي در طرف Y

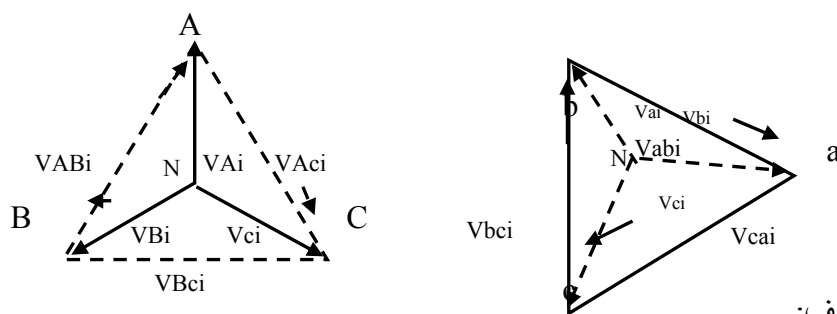
در ترتيب منفي 90° - مي‌شود.

با فرض زيرنويس هاي تكي روي پارامترهاي فاز و دابل براي پارامترهاي خط و نسبت تبديل واحد براي پارامترهاي خط ترانسفورماتور:

ولتاژ های ترتیب مثبت:



ولتاژ های ترتیب منفی:



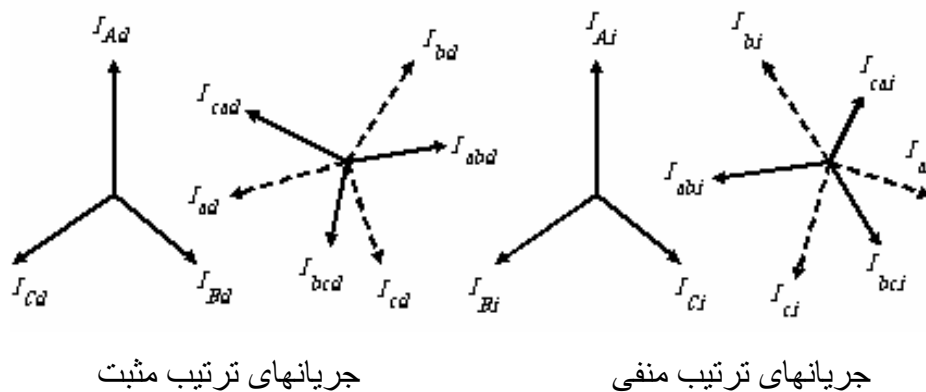
ارتباط بین مقادیر فازي و خطي هر طرف:

$$y: V_{ABd} = \sqrt{3}V_{Ad} \angle 30^\circ$$

$$y: V_{ABi} = \sqrt{3}V_{Ai} \angle -30^\circ$$

$$\Delta: V_{abd} = \sqrt{3}V_{ad} \angle 30^\circ$$

$$\Delta: V_{abi} = \sqrt{3}V_{ai} \angle -30^\circ$$



ارتباط بین مقادیر فازي و خطي در طرف Δ :

$$\Delta: \bar{I}_{abd} = \frac{\bar{I}_{ad}}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ$$

$$\Delta: \bar{I}_{abi} = \frac{I_{ai}}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

نتیجه کلی I:

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ad} = +jV_{Ad} \text{ ترتیب مثبت} \\ I_{ad} = +jI_{Ad} \end{array} \right\} \quad \left\{ \begin{array}{l} \bar{V}_{ai} = -j\bar{V}_{Ai} \text{ ترتیب منفی} \\ I_{ai} = -jI_{Ai} \end{array} \right\} \quad (\text{اتصال فازهای همنام در طرف ستاره و مثلث})$$

در صورتیکه جهت جریان عوض شود (از Δ به سمت λ) در آن صورت

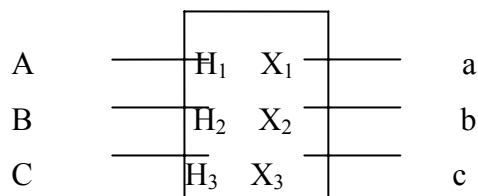
۱- در فازورهای ولتاژ تغییری حاصل نمی شود.

۲- فازورهای جریان معکوس می شوند.

بنابراین در اینجالت ارتباط ما بین ولتاژها و جریانهایی Δ, λ نسبت به هم بدون تغییر باقی می ماند

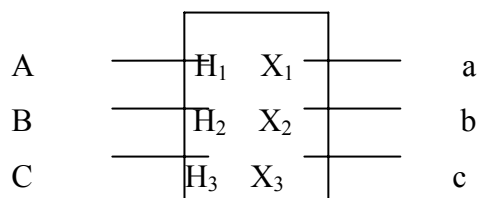
حالت (۲): با علامتگذاری ثابت ABC در طرف y می توان علامتگذاری جابجا شده abc را در طرف Δ

بصورت $b \rightarrow a, c \rightarrow b, a \rightarrow c$ (American standard) انجام داد. (استاندارد Yd1)



در استاندارد آمریکایی در ترتیب مثبت فاز طرف ستاره 30° از فاز طرف مثلث جلوتر است.

حالت (۳) در صورتیکه پلاریته طرف Δ باز هم معکوس شود (استاندارد Yd11)



در اینصورت V_{an} نسبت به V_{AN} دارای زاویه $30^\circ +$ است (در ترتیب مثبت). اما فاز اول مثلث V_{bn} نسبت به

فاز اول ستاره V_{AN} دارای زاویه 30° است.

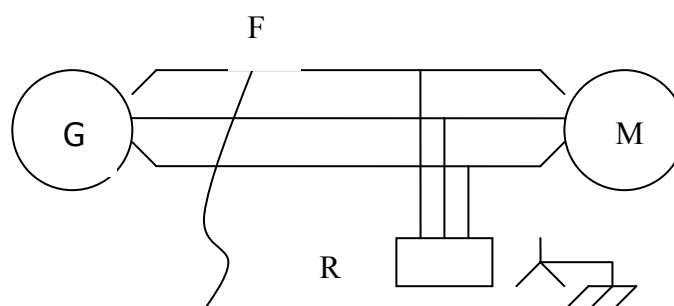
نتیجه کلی II:

$$\left. \begin{array}{l} b(1) \\ a(2) \\ c(3) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ترتیب مثبت: فاز اول مثلث} \\ \text{نسبت به فاز اول ستاره (A) } 30^\circ \text{ عقب تر است } (-30^\circ) \end{array}$$

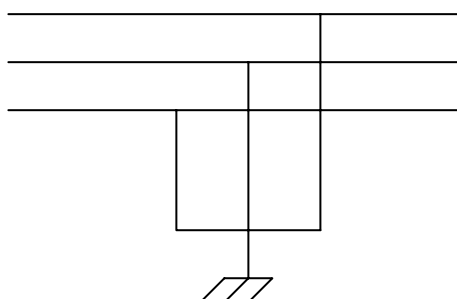
$$\left. \begin{array}{l} b(1) \\ a(2) \\ c(3) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{ترتیب منفی: فاز اول مثلث} \\ \text{نسبت به فاز اول ستاره (A) } 30^\circ \text{ جلوتر است } (+30^\circ) \end{array}$$

در هر حالت نتیجه کلی II برای تمامی حالات (۱)، (۲)، (۳) برقرار است.

مثال) در شکل زیر ژنراتور G دارای سیم پیچی بصورت اتصال Δ بوده و نقطه صفر ژنراتور به سیم زمین وصل شده است. امپدانس های پریودیک این ژنراتور در سه سیستم عبارتند از Z_{Go} Z_{Gi} Z_{Gd} این ژنراتور مستقیماً يك بار سه فازه R را تغذیه می کند و این بار در سیستم های مستقیم و معکوس دارای امپدانس Z_{Rd} و در سیستم هموپولر امپدانس Z_{Ro} می باشد. نقطه صفر این بار به سیم صفر متصل شده است. ژنراتور مزبور علاوه بر بار R يك موتور که دارای امپدانس Z_{md} در سیستم مستقیم و Z_{mi} در سیستم معکوس می باشد را تغذیه می کند. اگر اتصال کوتاه تکفاز در نقطه F خروجی ژنراتور بین فاز 1 و زمین رخ دهد جریانهایی ژنراتور، موتور و بار R را بدست آورید.



۳-۸ اتصال کوتاه سه فاز بهم (با زمین و بدون زمین)



$$V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

$$J_1, J_2, J_3 = ?$$

$$V_2 = V_3 \Rightarrow v_i = v_d$$

$$\bar{V}_2 = 0, v_i = v_d \Rightarrow V_0 + (a + a^2)V_i = 0 \rightarrow v_0 = v_i$$

$$\bar{V}_1 = 0 \Rightarrow V_0 + V_i + V_d = 3\bar{V}_0 = 3\bar{V}_i = 3V_d = 0$$

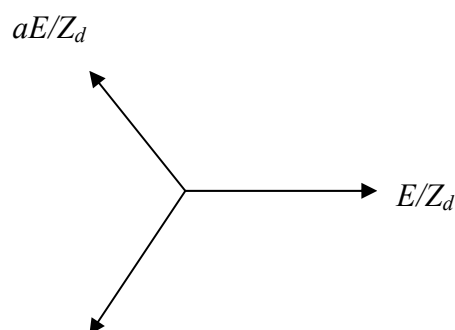
از روش ماتریسی زودتر به این نتیجه می توان رسید.

$$\begin{cases} E = V_d + Z_d J_d \\ 0 = V_i + Z_i J_i \\ 0 = V_0 + Z_0 J_0 \end{cases} \rightarrow \begin{cases} J_d = \frac{E}{Z_d} \\ J_i = 0 \\ J_0 = 0 \end{cases} \quad \begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{E}{Z_d} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E/Z_d \\ a^2 E/Z_d \\ a E/Z_d \end{pmatrix} \quad |J_1| = |J_2| = |J_3| = J_{3\phi} = \frac{E}{Z_d}$$

$$J_1 \phi, LG = \frac{3E}{\Sigma Z}$$

$$V_0 = V_i = V_d = 0$$



در سر ژنراتور:

$$\text{تک فاز با زمین} \quad J_1 = \frac{a^2 E/Z}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_i + \bar{Z}_d) + 3\bar{Z}_f} \rightarrow \bar{Z}_f = 0 \rightarrow \frac{3E}{\Sigma \bar{Z}} > J_1 = \frac{E}{\bar{Z}_d} = \frac{3E}{3\bar{Z}_d} \quad \text{سه فاز}$$

$$Z = \bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0 = 2\bar{Z}_d + \bar{Z}_0$$

در خط انتقال:

$$\text{تک فاز با زمین} \quad J_1 = \frac{3E}{(\bar{Z}_0 + \bar{Z}_i + \bar{Z}_d) + 3\bar{Z}_f} \rightarrow \bar{Z}_f = 0 \rightarrow \frac{3E}{\Sigma \bar{Z}} < J_1 = \frac{E}{\bar{Z}_d} = \frac{3E}{3\bar{Z}_d} \quad \text{سه فاز}$$

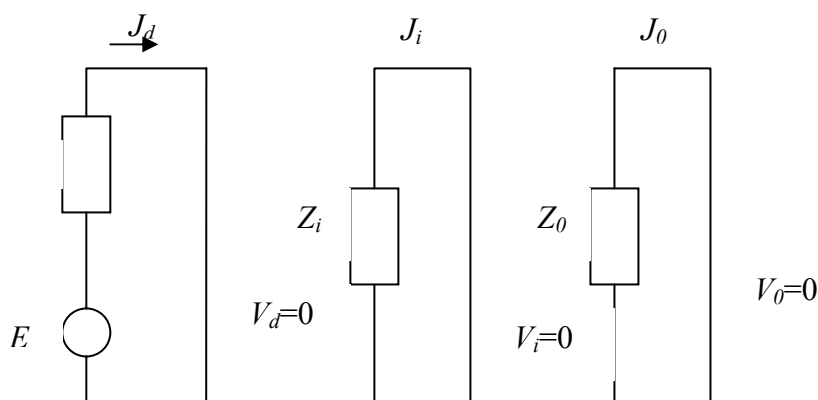
پس در ژنراتور جریان اتصال کوتاه تکفاز بیشتر از جریان اتصال کوتاه سه فاز است (وقتی نقطه صفر ژنراتور بدون امپدانس زمین شده باشد ($\bar{Z}_n = 0$) شدیدتر است ($\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{G0} + 3\bar{Z}_n$) $\left\{ \begin{matrix} \text{solidly} \\ \text{grounded} \end{matrix} \right\}$). اما در خط انتقال جریان اتصال کوتاه تکفاز کمتر از جریان اتصال کوتاه سه فاز است.

در ژنراتور داریم: $\bar{Z}_d = \bar{Z}_i$ در صورتی که در خط انتقال داریم: $\bar{Z}_0 \gg \bar{Z}_d = \bar{Z}_i$

در صورتیکه نقطه خنثی ژنراتور با امپدانس زمین شده باشد بخاطر بزرگ بودن امپدانس زمین کننده (Z_n) و تاثیر گذاري آن بر روي امپدانس ترتیب صفر (Z_0) در اینصورت \bar{Z}_0 در مقایسه با \bar{Z}_i, \bar{Z}_d قابل ملاحظه بوده پس در اینحالت برای عیب سر ژنراتور خواهیم داشت:

$$\bar{J}_{1,1\phi} < \bar{J}_{1,3\phi}$$

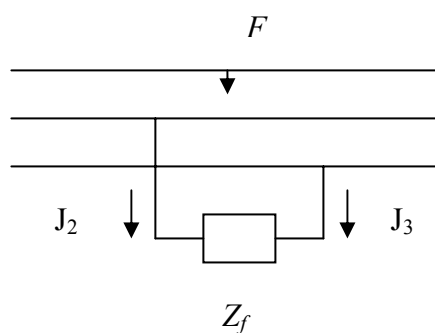
شمای مدار معادل تونین شبکه مستقیم اتصال کوتاه هموپلر و معکوس مدار باز



اگر اتصال سه فاز بدون زمین باشد داریم:

$$\begin{cases} V_1 = V_2 = V_3 \\ J_1 + J_2 + J_3 = 0 \end{cases} \xrightarrow{\text{نتایج}} V_1 = V_2 = V_3 = 0$$

۳-۱۰ اتصال کوتاه دوفاز به هم بدون زمین LINE TO LINE (LL) FAULT



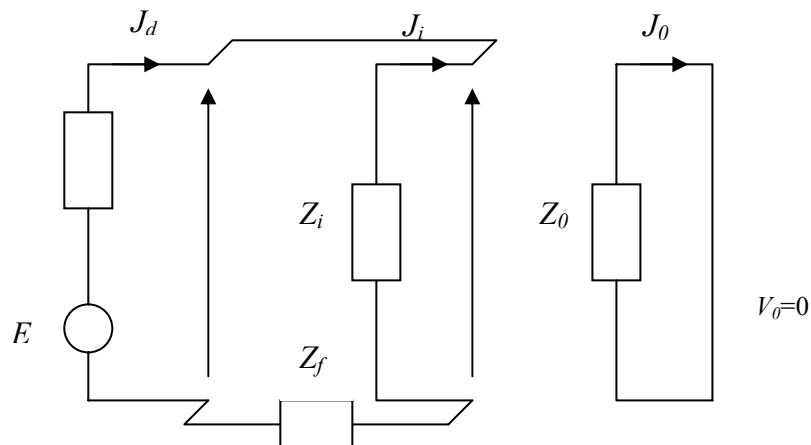
$$\begin{bmatrix} J_1 = 0 \\ J_2 = ? \\ J_3 = -J_2 \end{bmatrix} \quad \begin{aligned} J_{10} + J_{1i} + J_{1d} &= 0 \\ V_2 - V_3 &= Z_f J_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} J_{10} \\ J_{1i} \\ J_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ J_2 \\ -J_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{aligned} J_{10} &= 0 \\ J_{1i} &= -J_{1d} = 3(a^2 - a)J_2 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{1i} \\ V_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_2 - Z_f J_2 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} 3V_{10} = V_1 + 2V_f - Z_2 J_2 \\ 3V_{1i} = V_1 + (a^2 + a)V_2 - a Z_f J_2 \\ 3V_{1d} = V_1 + (a + a^2)V_2 - a^2 Z_f J_2 \end{cases}$$

$$3(V_{1d} + V_{1i}) = (a - a^2)Z_f J_2 = +j\sqrt{3}Z_f J_2$$

$$\begin{cases} -J_{1d} = \frac{1}{3}(a^2 - a)J_2 \\ J_2 = J_{10} + a^2 J_{1i} + a J_{1d} = (a^2 - a)J_{1d} = -j\sqrt{3}J_{1d} \end{cases}$$



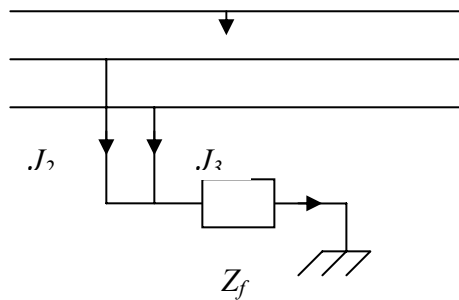
$$\begin{cases} V_{1d} - V_{1i} = Z_f J_{1d} \\ J_0 = 0 \rightarrow \bar{V}_0 = 0 \end{cases}$$

$$J_{1d} = \frac{E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f}$$

$$J_2 = \frac{-j\sqrt{3}E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} = -J_3$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{10} = 0 - Z_{10}J_{10} = 0 \\ V_{1d} = E - Z_{1d}J_{1d} = \frac{(Z_{1i} + Z_f)E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} \\ V_{1i} = 0 - Z_{1i}J_{1i} = Z_{1i}J_{1d} = \frac{Z_{1i}E}{Z_{1i} + Z_{1d} + Z_f} \end{array} \right\} \rightarrow \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$

۱۱-۳ اتصال کوتاه دو فاز به هم و به زمین DOUBLE LINE TO GROUND (LLG) FAULT



$$J_1 = 0 \rightarrow J_{10} + J_{1i} + J_{1d} = 0$$

$$\begin{bmatrix} J_{10} \\ J_{1i} \\ J_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix}$$

$$3J_{10} = J_2 + J_3$$

$$V_2 = V_3 = Z_f(J_2 + J_3) = 3Z_f J_{10}$$

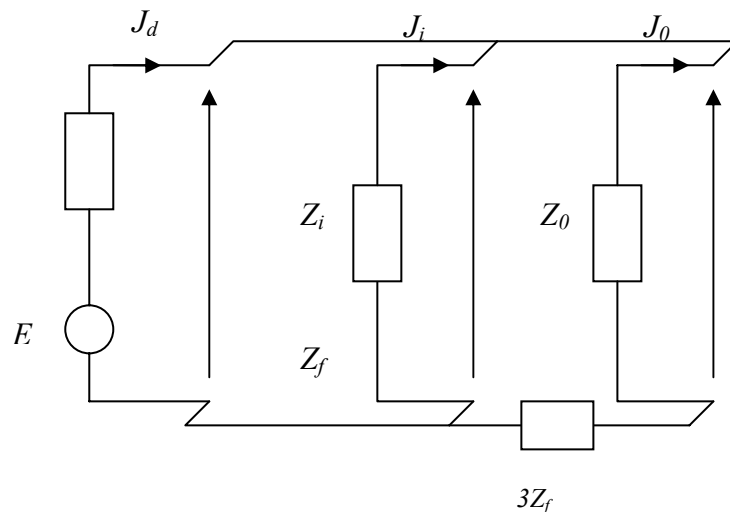
$$\begin{bmatrix} V_{10} \\ V_{1i} \\ V_{1d} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_2 \end{bmatrix}$$

$$v_{10} = \frac{1}{3}(v_1 + 2v_2)$$

$$v_{1d} = v_{1i} = \frac{1}{3}(v_1 + (a + a^2)v_2)$$

$$V_{10} - V_{1d} = \frac{1}{3}(2 - a - a^2)V_2 = V_2 = 3Z_f J_{10}$$

$$V_{10} = V_{1d} + 3Z_f J_{10}$$



$$J_{1d} = \frac{E}{Z_{1d} + Z_{1i} + (Z_{10} + 3Z_f)}$$

$$J_{10} + J_{1i} + J_{1d} = 0 \Rightarrow J_{1i} + J_{1d} = -J_{10}$$

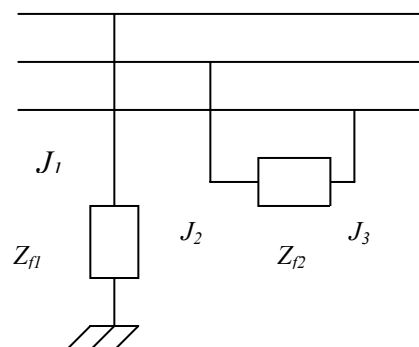
$$E - Z_{1d}J_{1d} = Z_{1i}(J_{1d} + J_{10}) \rightarrow J_{10} = \frac{E}{Z_{1i}} - \left(\frac{Z_{1d}}{Z_{1i}} + 1 \right) J_{1d}$$

$$J_{2N} = J_2 + J_3 = 3J_0$$

$$J_2 = J_0 + aJ_i + a^2J_d$$

$$J_3 = J_0 + a^2J_i + aJ_d$$

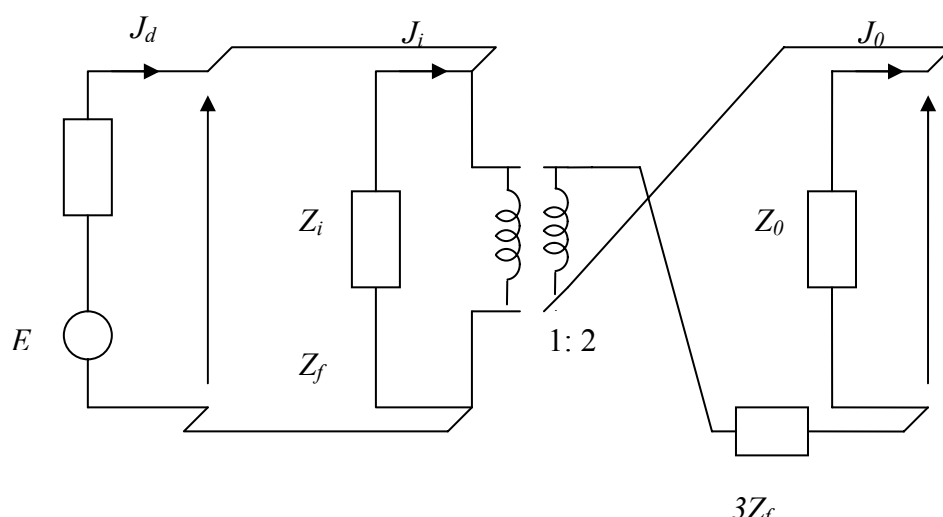
۱۲-۳ - عیب دو فاز بهم بدون زمین و فاز سوم به زمین LL-LG



$$\bar{V}_1 = \bar{Z}_{f1} \bar{I}_1$$

$$\bar{V}_2 - \bar{V}_3 = \bar{Z}_{f2} \bar{I}_2$$

$$\bar{I}_2 = -\bar{I}_3$$



مثال - يك توربو ژنراتوري با قدرت اسمي 100 MVA ولتاژ نامي 15 KV وجود دارد. براي اين ژنراتور داریم:

$$S_n = 100 \text{ MVA}$$

$$U_n = 15 \text{ kV}$$

$$X'_d = 25\% \quad X_i = 20\%$$

$$X_b = \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{15k^2}{100M} = 2.25\Omega$$

$$X'_d = \frac{25}{100} \times 2.25 = 0.56\Omega \quad X_i = \frac{20}{100} \times 2.25 = 0.45\Omega$$

مثال - ژنراتوري با قطب هاي برجسته به قدرت نامي 10 MVA به ولتاژ خطي 10KV مفروض است براي اين ژنراتور داریم:

$$X'_d = 1.5\Omega \quad X_i = 2.5\Omega \quad X_d = 3.5\Omega$$

اگر نقطه صفر اين ژنراتور به وسيله راکتانس 100/3 اهمي زميني شده باشد مطلوب است

الف- راکتانس گذرا و معکوس و هموپولر ماشين به درصد (پريونيت)

ب- امپدانس هموپولر آلترناتو به اهم

ج - در صورت وقوع يك اتصال کوتاه سه فاز بار زمين در خروجي هاي آلترناتور مقدار جريان اتصال کوتاه

د- اگر اتصالي از نوع تکفاز با زمين باشد جريان اتصالي چند پريونيت و چند آمپر مي باشد.

نقطه صفر ژنراتور بصورت مستقیم زمین نشده است و \bar{Z}_n در مقایسه \bar{Z}_i, \bar{Z}_d قابل ملاحظه است پس $J_{1,LG} < J_{1,LLL}$ (در سر ترمینال ژنراتور) می باشد. اما در حالت اتصال مستقیم نقطه صفر ژنراتور $\bar{Z}_n = 0$ که در آن صورت $J_{1,LG} > J_{1,LLL}$ و $Z_0 \ll Z_d, Z_i$ (در سر ترمینال ژنراتور) می باشد.

$$\bar{Z}_f = 0$$

$$X_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{10k^2}{10M} = 10\Omega$$

$$X_0 = \frac{1.5\Omega}{10\Omega} = .15 pu$$

$$X_i = .25 pu \quad x'_d = 35 pu$$

$$X_0 = X_0 + 3X_o = 15 + 3 \frac{100/3}{10} = 10.15 pu$$

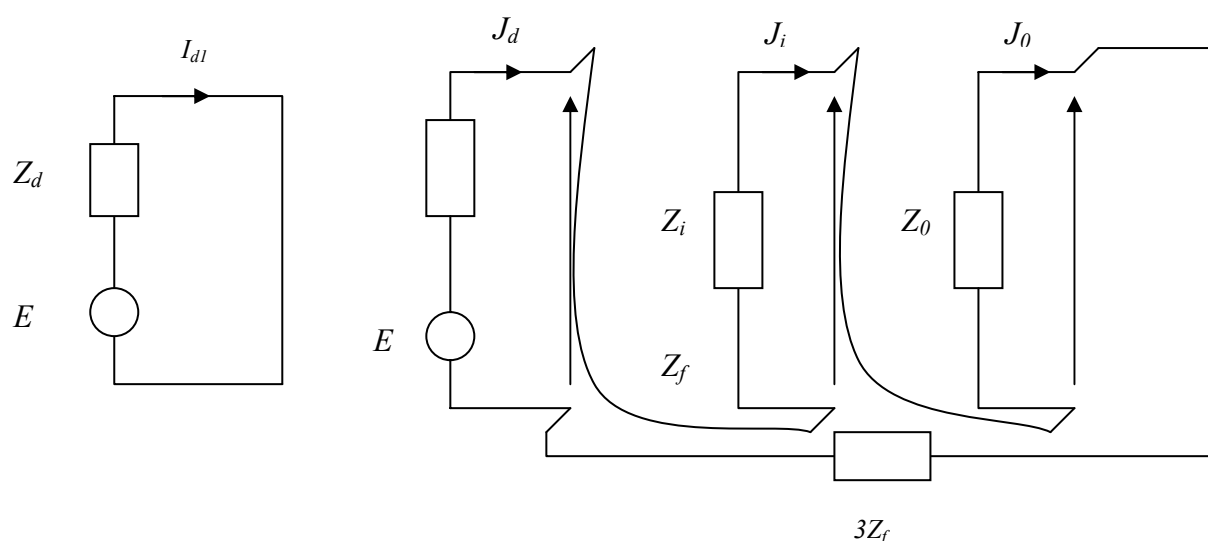
(الف)

(ب)

(ج) در اتصال کوتاه سه فاز:

$$\bar{I}_{123} = \bar{F} \bar{I}_{oid}$$

$$\bar{I}_{1,LLL} = I_{d1} = \frac{E}{Z_d} = \frac{U_b}{JX'd} = \frac{10K}{J3.5\Omega} = -j2.857kA \quad \bar{I}_{2,LLL} = a^2 E / Z_d, \bar{I}_{3,LLL} = aE / Z_d$$

اتصال مستقیم $Z_n = 0$

$$I_{1,LG} = \frac{3E}{(Z_d + Z_i + Z_0) + \bar{Z}_f} = \frac{3 \times 10k}{J(3.5 + 2.5 + 1.5) + 0} = -j3.999KA > I_{1,LLL}$$

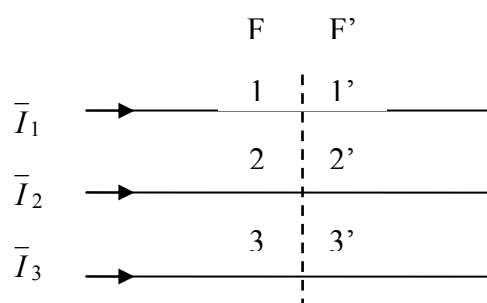
$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}U_b} = \frac{10M}{\sqrt{3} \cdot 10k} = 577.35A \rightarrow I_{11} = \frac{I_{11}}{I_b} = j6.92 pu$$

$$I_{1,LG} = \frac{3E}{j3.5 + j2.5 + (100j + j1.5)} = -j0.278KA < I_{1,LLL}$$

$$Z_n = \frac{100}{3} \rightarrow 100\Omega \text{ اتصال با امپدانس}$$

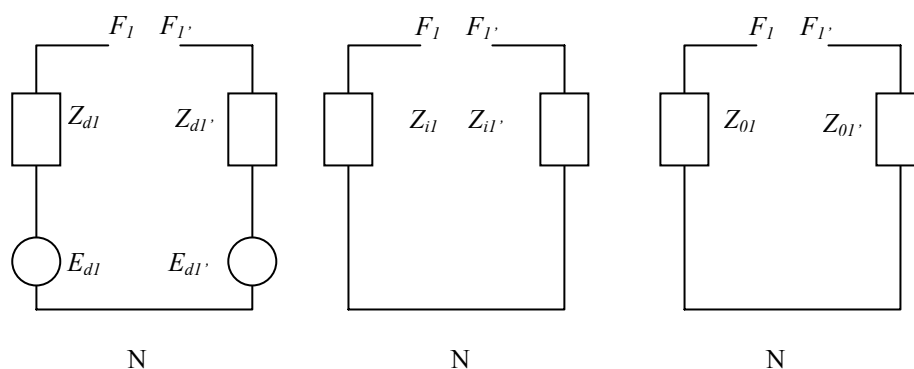
۳-۱۳ عیب قطع شدگی (قطع فازها) Open Conductor Faults (Series Type Faults)

این عیوب از نوع عیوب سری در خط انتقال یا هادی هستند. در این حالت بایستی جریان خطوط انتقال و ولتاژهای سری معین نقاط قطع شده محاسبه شوند. بردارهای جریان و ولتاژ در این حالت عبارتند از:

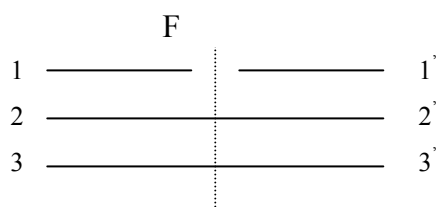


$$\bar{I}_{oid} = \begin{bmatrix} \bar{I}_{01} \\ \bar{I}_{i1} \\ \bar{I}_{d1} \end{bmatrix} \quad \bar{V}_{oid} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{011'} \\ \bar{V}_{i11'} \\ \bar{V}_{d11'} \end{bmatrix} \quad \bar{I}_{123} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{11'} \\ \bar{V}_{22'} \\ \bar{V}_{33'} \end{bmatrix} \quad \bar{V}_{123} = \begin{bmatrix} \bar{V}_{11'} \\ \bar{V}_{22'} \\ \bar{V}_{33'} \end{bmatrix}$$

شبکه های ترتیب صفر، معکوس و مستقیم (مدارات معادل تونن) برای فاز شماره ۱ به صورت زیر است.



حالت اول - قطع يك فاز (فاز ۱)

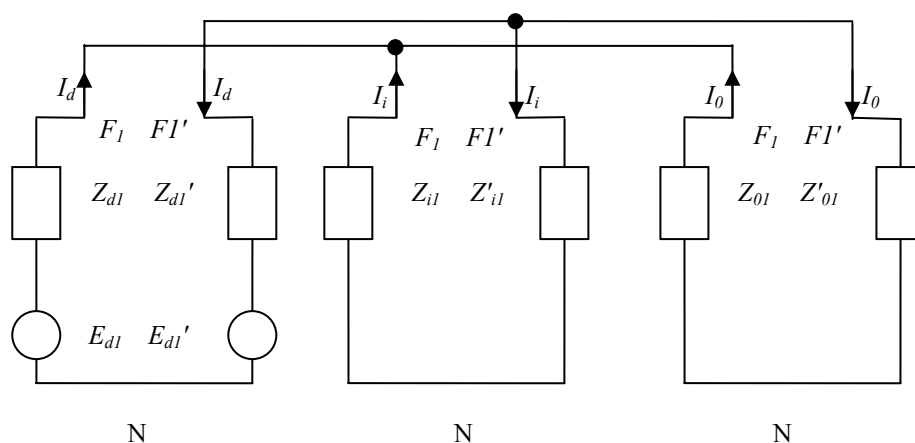


$$\bar{I}_1 = 0$$

$$\bar{V}_{22} = \bar{V}_{33'} = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_{011'} \\ V_{i11'} \\ V_{d11'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & 1 \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_{11'} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} I_{01} \\ I_{i1} \\ I_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{I}_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{011'} - \bar{V}_{i11'} = \bar{V}_{d11'} = \frac{1}{3} \bar{V}_{11'} \quad \bar{I}_{01} + \bar{I}_{i1} + \bar{I}_{d1} = 0$$



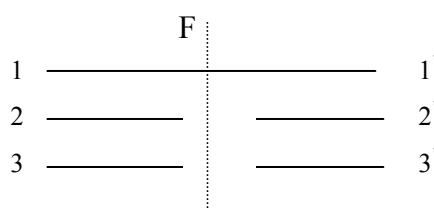
برای فاز شماره ۱ داریم:

$$\begin{cases} \bar{Z}_d = \bar{Z}_{d1} + \bar{Z}_{d1'} \\ \bar{Z}_i = \bar{Z}_{i1} + \bar{Z}_{i1'} \\ \bar{Z}_0 = \bar{Z}_{01} + \bar{Z}_{01'} \end{cases} \quad \bar{I}_d = \frac{\bar{E}_{d1} - \bar{E}_{d1'}}{\bar{Z}_d + (\bar{Z}_i \parallel \bar{Z}_0)} \quad \bar{I}_i = -\bar{I}_d \left(\frac{\bar{Z}_0}{\bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \right) \quad \bar{I}_0 = -\bar{I}_d \left(\frac{\bar{Z}_i}{\bar{Z}_i + \bar{Z}_0} \right)$$

حالت دوم - قطع دو فاز (فاز ۲ و ۳)

$$\bar{V}_{11'} = 0$$

$$\bar{I}_2 = \bar{I}_3 = 0$$

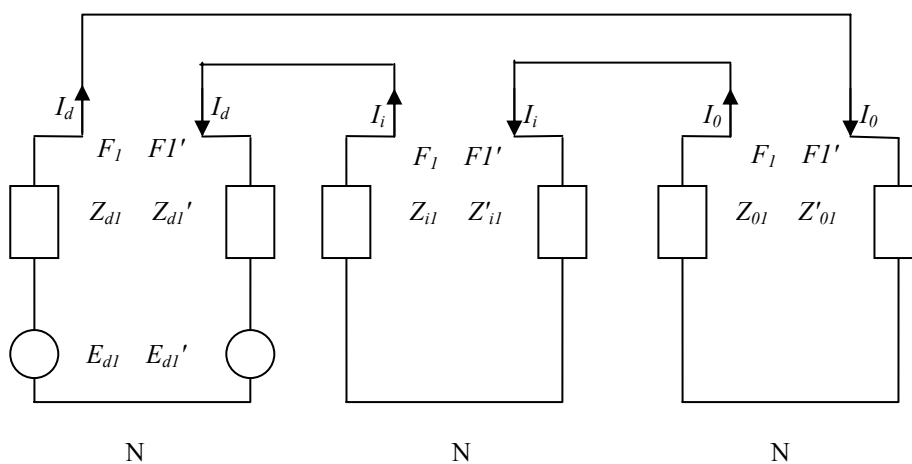


تبدیل معکوس

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_{011'} \\ \bar{V}_{i11'} \\ \bar{V}_{d11'} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \bar{V}_{22'} \\ \bar{V}_{33'} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \bar{I}_{01} \\ \bar{I}_{i1} \\ \bar{I}_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{V}_{011'} + \bar{V}_{i11'} + \bar{V}_{d11'} = \bar{V}_{11'} = 0 \quad \text{تبدیل مستقیم}$$

$$\bar{I}_{01} = \bar{I}_{id} = \bar{I}_{d1} = \frac{1}{3} \bar{I}_1 \quad \text{تبدیل معکوس}$$



$$\bar{Z}_d = \bar{Z}_{d1} + \bar{Z}_{d1'}$$

$$\bar{Z}_i = \bar{Z}_{i1} + \bar{Z}_{i1'}$$

$$\bar{Z}_0 = \bar{Z}_{01} + \bar{Z}_{01'}$$

برای فاز داریم:

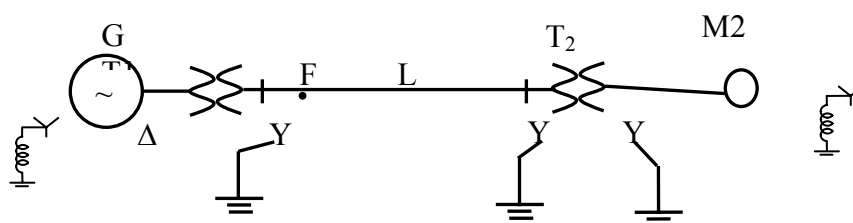
$$\bar{I}_d = \bar{I}_i = I_0 = \frac{\bar{E}_{d1} - \bar{E}_{d1'}}{\bar{Z}_d + \bar{Z}_i + \bar{Z}_0}$$

۳-۱ عیب های ترکیبی

۱- سری (قطع فاز)

۲- موازی (اتصال کوتاه)

مثال عیب قطع فاز: در نقطه F روی شبکه زیر



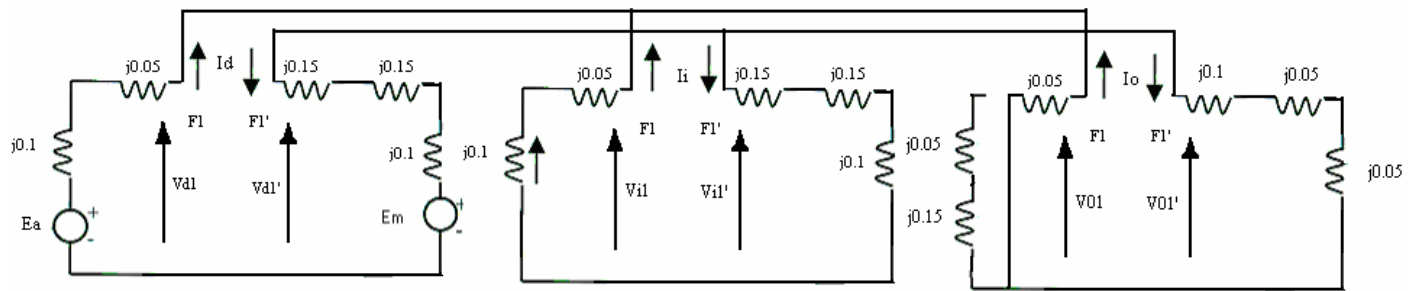
$$G, M : X_d = X_i = j0.1 pu \quad x_0 = j0.05 X_\eta = j0/05$$

$$T_1, T_2 : X_d = X_i = X_0 = j0.05 pu$$

$$L : X_d = X_i = j0.15 \quad X_0 = j1$$

$$V_{tm} = 1.0 \angle 0 \quad I_L = 1.0 \angle 0 pu$$

فرض شرایط کارکرد اولیه:



$$\begin{cases} E_a = V_{Tm} + I_L(j0.05 + j0.15 + j0.05 + j0.1) = 1 + j0.35 = 1.059 \angle 19.29^\circ \text{ pu} \\ E_m = V_{Tm} - I_L(j0.1) = 1 - j0.1 = 1.005 \angle -5.71^\circ \text{ pu} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{Z}_d = \bar{Z}_i = j(0.1 + 0.05 + 0.15 + 0.05 + 0.1) = j0.95 \\ \bar{Z}_0 = j(0.05 + 1 + 0.05 + 0.05) = j1.15 \end{cases}$$

$$\bar{I}_d = \frac{E_a - E_M}{Z_d + (\bar{Z}_i \parallel \bar{Z}_0)} = \frac{j0.45}{j0.773} = 0.582 \rightarrow \begin{cases} \bar{I}_i = -\bar{I}_d \frac{Z_0}{Z_i + Z_0} = -0.418 \\ \bar{I}_0 = -\bar{I}_d \frac{Z_i}{Z_i + Z_0} = -0.164 \end{cases}$$

$$T1(Y_{\text{طرف}}) I_{dT1} = \bar{I}_d \quad \bar{I}_{iT_1} = \bar{I}_i \quad \bar{I}_{0T_1} = \bar{I}_0 : 1 \text{ فاز}$$

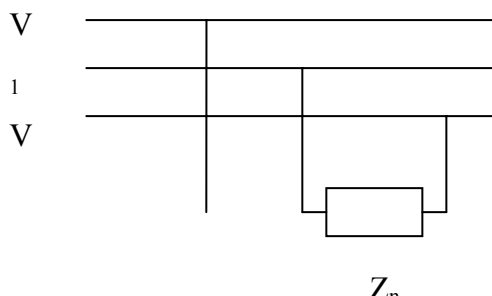
$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0 \\ I_i \\ I_d \end{bmatrix}_{T_1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.9 \angle -105.9 \\ 0.9 \angle 105.9 \end{bmatrix}$$

$$T1(\Delta_{\text{طرف}}) I_{dG} = jI_d = j0.582 \quad I_{iG} = -jI_i = j0.418 \quad I_{0u} = 0$$

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}_G = \begin{bmatrix} 1 \angle 90 \\ 0.52 \angle -74.1 \\ 0.52 \angle -105.9 \end{bmatrix}$$

۳-۱۵ انواع عیوب نامتعادلی (بر اثر اتصال بار نامتعادل)

انواع اتصال ها بررسی شد. وقتی بار نامتعادل باشد باید تاثیر این نامتعادلی را حساب کرد. يك بار تكفازي را بین دو فاز تغذیه کرده و فاز سوم را آزاد می گذاریم.



مثال - قطار برقی دو فاز

$$\begin{cases} V_2 - V_3 = Z_n I_n = Z_n J_2 \\ J_2 + J_3 = 0 & J_i = -J_d \\ J_1 = 0 & J_0 = 0 \end{cases}$$

قبل از نامتعادلی $V_0=0, V_i=0$ بود ولی در حالت نامتعادلی V_i مقداری غیر صفر بدست آمده است. مقدار نامتعادلی شبکه به صورت زیر بدست می آید.

$$\begin{cases} V_0 = 0 \\ V_i = \frac{EZ_i}{Z_n + Z_d + Z_i} \\ V_d = E(Z_n + Z_i) / Z_n + Z_d + Z_i \end{cases}$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_i}{V_d} = \frac{Z_i}{Z_i + Z_n} \approx \frac{Z_i}{Z_n}$$

Z_i در مقابل Z_n خیلی کوچک است.

اگر Z_n طوری باشد که نسبت به امپدانس شبکه امپدانس بزرگی بوده و از Z_o شبکه بیشتر باشد در صداقت در طول شبکه کم و ولتاژ رسیده به دو سر بار در حد معقولی باشد. Z مدار همان Z_d است که $Z_d = Z_i$. برای خطوط هوایی و ترانس قدرت تحویلی به بار برابر است با:

$$\bar{S}_n = \bar{V}_n \cdot I_n^*$$

$$S_n = (V_2 - V_3) \frac{(V_2 - V_3)^*}{Z_n^*} = \frac{|V_n^2|}{Z_n^*}$$

اگر در این شبکه عوض بار يك اتصال کوتاه سه فاز داشته باشیم:

$$I_{cc3N} = \frac{E}{Z_d} = \frac{Un/\sqrt{3}}{Z_d}$$

قدرت اتصال کوتاه هر قدر بیشتر باشد جریان اتصال کوتاه سه فاز نیز بزرگ خواهد بود

$$S_{cc} = \sqrt{3} U_n I_{cc}^*$$

قدرت اتصال کوتاه برابر است با ولتاژ نامی در نقطه اتصال کوتاه در جریان اتصال کوتاه (بصورت سه فاز) لذا هر قدر ولتاژ نامی بالاتر، قدرت اتصال کوتاه شبکه بیشتر است.

$$S_{cc} = \sqrt{3} U_n \left(\frac{U_n / \sqrt{3}}{Z_d} \right) = \frac{|V_n^2|}{Z_d^*}$$

در بالاترین ولتاژ قدرت اتصال کوتاه بیشتر است. و برای بالا بردن قدرت اتصال کوتاه شبکه باید Z_d را پائین آورد که این کار باید بصورت مصنوعی انجام شود. چون شبکه بصورت سلفی است با گذاشتن خازنهای سری این کار انجام می شود (برای بالا بردن قدرت اتصال کوتاه شبکه و پایداری شبکه). خازنهای موازی برای اصلاح ضریب قدرت مدار استفاده می شوند. اگر کل شبکه از خطوط هوایی و ترانس تشکیل شده باشد داریم: $Z_i = Z_d$

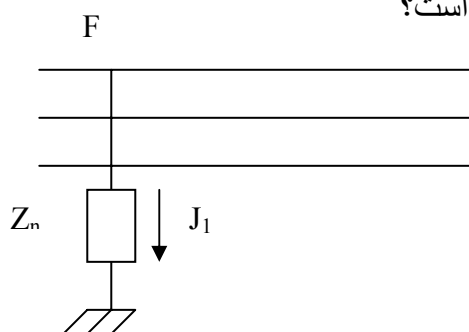
$$\varepsilon_v = \frac{Z_i}{Z_n} = \frac{Z_d}{Z_n} \rightarrow \varepsilon_r^* = \frac{Z_d^*}{Z_n^*} = \frac{|V_n^2| / s_{cc}}{|V_n^2| / s_n} = \frac{S_n}{S_{cc}}$$

نتیجه:

در صد نامتعادلی ولتاژ در شبکه مثل قدرت تکفاز تغذیه شده در آن نقطه، به قدرت اتصال کوتاه سه فاز بستگی دارد. هر قدر قدرت اتصال کوتاه شبکه در نقطه نامتعادلی بیشتر باشد درصد نامتعادلی ولتاژ کمتر است. هر گاه توان بار (S_n) که بطور تکفاز تغذیه میکنیم کمتر باشد، درصد نامتعادلی ولتاژ شبکه کمتر خواهد بود. پس برای پائین آوردن نامتعادلی باید بار نامتعادل در جایی به شبکه وصل شود که در آنجا قدرت اتصال کوتاه بیشتر است (در ولتاژهای بالا) و یا قدرت کمتری از شبکه بخواهد. ولی اگر در آن واحد، سه بار نامتعادل داریم (سه قطار) میتوان آنها را در شبکه بین سه فاز پخش کرده و در صد نامتعادلی شبکه را پائین آورد. یکی از عوامل پائین آوردن درصد نامتعادلی شبکه بستن سلف و خازن روی خطوط (۱ و ۲) و (۱ و ۳) است که ازدو فاز ۲ و ۳ بار تکفاز گرفته ایم. استانداردهای مختلف درصد نامتعادلی بین ۱-۱/۵٪ را قبول می کنند.

$$\varepsilon_i = \frac{J_i}{J_n} = \frac{\frac{-E}{Z_n + Z_d + Z_i}}{\frac{(a^2 - a)E}{Z_n + Z_d + Z_i}} = \frac{1}{a - a^2} \rightarrow |\varepsilon_i| = \frac{1}{\sqrt{3}} = 58\%$$

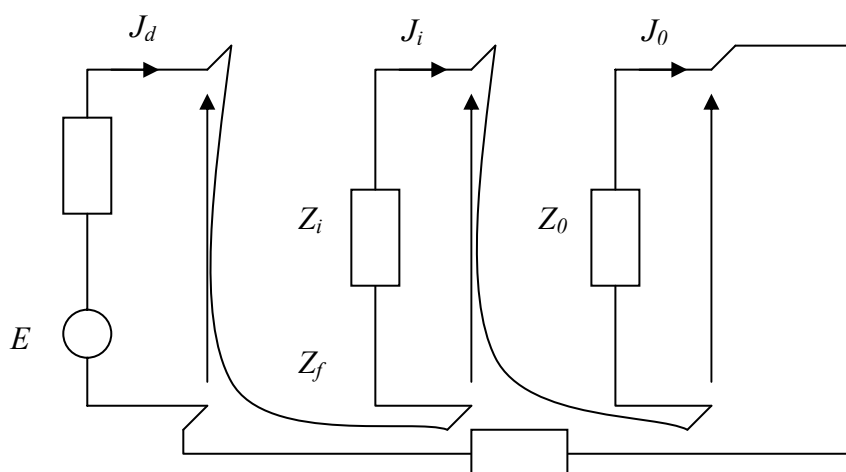
مثال: درصد نامتعادلی ولتاژ و جریان در شکل زیر چقدر است؟



$$\begin{cases} J_2 = 0 \\ J_3 = 0 \\ V_1 = Z_n J_1 \end{cases}$$

$$\begin{bmatrix} J_{01} \\ J_{i1} \\ J_{d1} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} J_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \rightarrow J_{01} = J_{i1} = J_{d1} = \frac{1}{3} J_1$$

$$V_{01} + V_{i1} + V_{d1} = Z_n I_1 = 3Z_g J_{d1} \quad \begin{cases} E = V_d + Z_d I_d \\ 0 = V_i + Z_i I_i \\ 0 = V_0 + Z_0 I_0 \end{cases}$$



$$J_{d1} = J_{i1} = I_{01} = \frac{E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} \quad I_1 = 3I_{d1} = 3I \quad 3Z_f$$

$$V_{d1} E - Z_d I_{d1} = \frac{(Z_i + Z_0 + 3Z_n) E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n}$$

$$V_{i1} = Z_i I_{i1} = \frac{Z_i E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} \quad V_{01} = Z_0 I_{01} = \frac{Z_0 E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n}$$

$$\varepsilon_v = \frac{V_i}{V_d} = \frac{Z_i}{\bar{Z}_i + \bar{\Sigma}_0 + \bar{Z}_y} \approx \frac{Z_i}{3\bar{Z}_y} \approx \frac{\bar{Z}_d}{3\bar{Z}_y}$$

$$\varepsilon_i = \frac{I_i}{I_n} = \frac{I_i}{I_1} = \frac{I_i}{3I_i} = \frac{1}{3} = 33.33\%$$

مثال - يك توربو ژنراتور با مشخصات زیر مفروض است:

Exam 11.1/342

ژنراتور با اتصال Δ بوده و نقطه صفر زمین شده همچنین با قدرت نامی 10MVA و ولتاژ نامی 13.8KV می باشد. بر مبنای مشخصات اسمی مقادیر راکتانس های ژنراتور عبارتند از:

$$X_d'' = X_i = 15\% pu$$

$$X_0 = 0.05 pu$$

مطلوب است :

الف) نسب جریان اتصال کوتاه فوق گذرا برای اتصال تکفاز به زمین و سه فاز به زمین در خروجی ژنراتور ب- اگر اتصال کوتاه دو فاز داشته باشیم این نسبت و جریان اتصال چقدر خواهد بود؟ ج) برای اینکه جریان فوق گذاری عیب تکفاز به زمین و سه فاز با زمین مساوی گردند چه مقدار راکتانس باید بین نقطه صفر ژنراتور و سیم زمین قرار گیرد.

$$\text{الف -} \quad I_{ccN} = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_n} \rightarrow I_0 = I_i = I_d = \frac{E}{\sum X}$$

تکفاز

$$\text{تکفاز} \quad I_{cc1N} = 3I_d \quad I_{cc1\phi} = \frac{3E}{Z_d + Z_i + Z_0} \rightarrow \text{اگر بدون امپدانس زمین شده باشد.}$$

$$I_0 + I_i + I_d = \text{در يك فاز، تنها از فاز اتصالی جریان کشیده شده و از طریق F بزمین می رود.}$$

$$I_{3L} = \frac{E}{Z_d} = \frac{3E}{3Z_d} \rightarrow I_d = \frac{E}{X_d}, I_{cc3\phi} = I_d$$

در سه فاز از هر فاز این جریان کشیده شده aI_d, a^2I_d, I_d ولی مجموعه برداری اینها که صفر است

$$\frac{I_{CC1\phi}}{I_{CC3\phi}} = \frac{3Z_d}{\sum Z} = \frac{3X_d''}{X_d'' + X_i + X_0} = \frac{3 \times 0.15}{0.15 + 0.15 + 0.05} = 1.2857$$

$$\text{در این شرط} \quad I_{LG} > I_{3L}$$

(ب)

$$\text{در اتصال کوتاه دو فاز} \quad \begin{cases} I_{LL1} = 0 \\ I_{LL2} = \frac{\sqrt{3}E}{Z_d + Z_i} \leftarrow \left(I_d = \frac{E}{Z_d + Z_i} I_i = -I_d \quad I_0 = 0 \right) \\ I_{LL3} \end{cases}$$

$$\frac{I_{LL}}{I_{3L}} = \frac{\sqrt{3} \frac{E}{X_d'' + X_i}}{\frac{E}{X_d''}} = \frac{\sqrt{3}X_d''}{X_d'' + X_i} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0.86$$

$$I_{ll} < I_{3L}$$

(ج)

$$I_{LG} = I_{3L} \rightarrow \frac{3E}{X_d'' + X_i + x_0 + 3X_n} = \frac{3E}{3X_d''}$$

$$X_d'' + X_i + X_0 + 3X_n = 3X_d'' \rightarrow X_n = \frac{2X_d'' - X_i - X_0}{3}$$

بوبین پترسون جریان اتصال کوتاه نامتعادل را کم می کند و در کار عادی شبکه دخالتی نمی کند.

$$X_n = 0.33 pu \rightarrow X = 0.33 \times 19.044 = 0.63 \Omega$$

$$Z_b = \frac{Un^2}{sb} = 19.044 \Omega$$

مثال - یک ژنراتور با قدرت اسمی ۱۰ MVA مفروض است راکتانس های این ژنراتور عبارتند از:

$$X_d'' = X_i = pu \quad X_0 = 0.5 pu$$

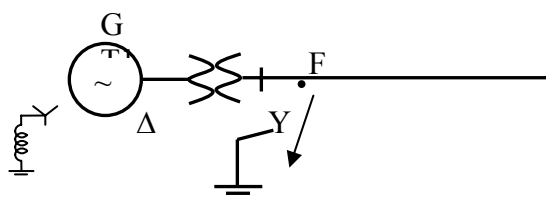
مرکز ستاره این ژنراتور از طریق راکتانس $X = 0.381 \Omega$ به زمین وصل شده است در ژنراتور در حالت بی باری 6.9kV را تولید می کند اگر اتصال کوتاه تک فاز به زمین در یکی از فازهای ژنراتور بوقوع بپیوندد جریان فوق گذرا را در فاز معیوب بدست آورید.

ب- اگر این ژنراتور را به ترانسفورماتور Δ/λ و بقدرت اسمی 10MVA وصل کنیم موقعی که یک اتصال کوتاه تکفاز به زمین در طرف فشار قوی ترانس رخ دهد جریان هر یک از فازهای ژنراتور را پیدا کنید. ولتاژ طرف Δ ترانس 6.9kV و طرف ستاره 44kV بوده و راکتانس اتصال کوتاه آن 7.5% می باشد.

$$I_d = \frac{E}{Z_d + \frac{Z_i Z_0}{Z_i + Z_0}} = 5.7 pu \quad I_{cc2\phi} = 3J_0 = 8.41 pu$$

$$I_i = I_d = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_i} = I_d = \frac{JZ_i}{Z + Z_i} = j2.67$$

اگر عیب دو فاز با زمین داشتیم جریان اتصال کوتاه چقدر می شد؟



الف -

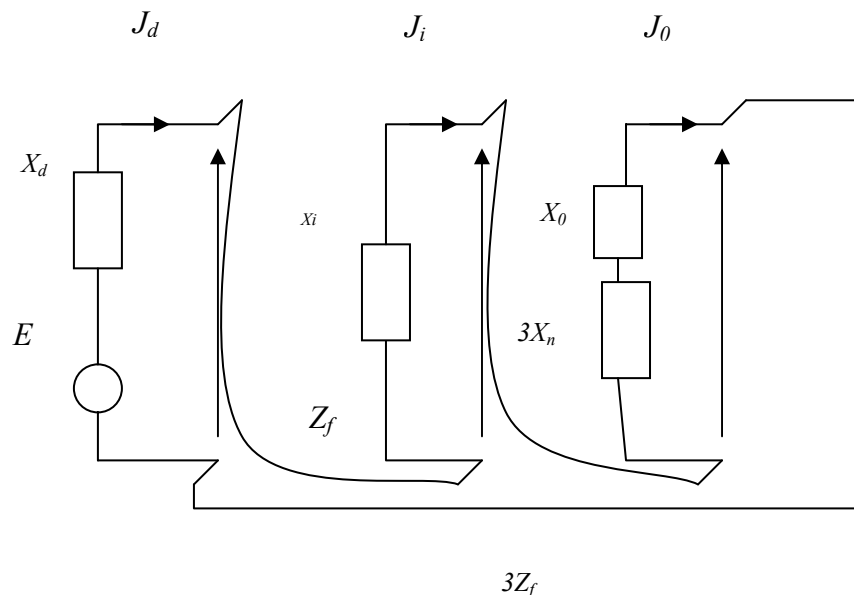
$$S_b = 10 MVA$$

$$\rightarrow Z_b = \frac{U_b^2}{S_b} = \frac{6.9^2}{10M} = 4.761$$

$$U_b = 6.9 kV$$

$$X_d'' = X_i = 0.15 \text{ pu} \quad X_0 = 0.05 \text{ pu}$$

$$3X_n = 3 \frac{0.381}{4.761} = 0.24 \text{ pu}$$

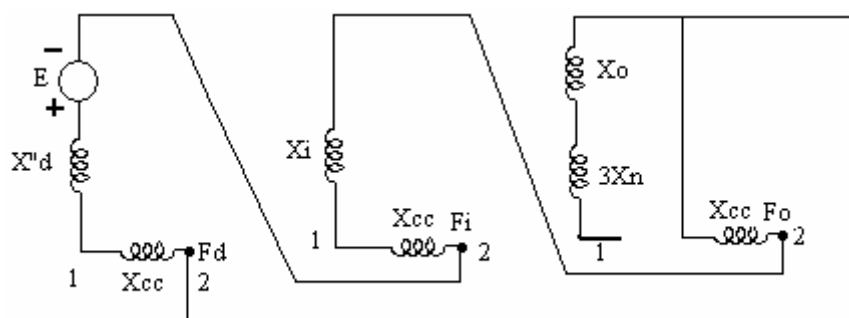


$$I_d = \frac{E}{\sum X}$$

$$I_1'' = \frac{3E}{\sum x} = \frac{3 \times 1}{0.15 + 0.15 + 0.05 + 0.24} = 5.084 \text{ pu}$$

(ب)

$$X_{cc} = 7.5\% \text{ pu} \quad s_b = 10 \text{ MVA}$$

جریان هموپولر به قسمت Δ نمی تواند نفوذ کند

$$I_d'' = \frac{E}{X_d'' + X_i + 3X_{cc}} = \frac{1}{j(0.15 + 0.15 + 3 \times 0.75)} = -j.1/9 \text{ pu} = I_0 = I_i$$

$$I_1'' = 3I_d'' = 5.714 \text{ pu} \angle 0^\circ \text{ فاز معیوب}$$

برای $\lambda \lambda 0$ جریانهای I_i, I_o, I_d که در طرف ثانویه داشتیم در طرف اولیه نیز خواهیم داشت

برای $\Delta\lambda$

$$I_{d\Delta} = j I_{d\lambda} \quad I_i = -j I_{il}$$

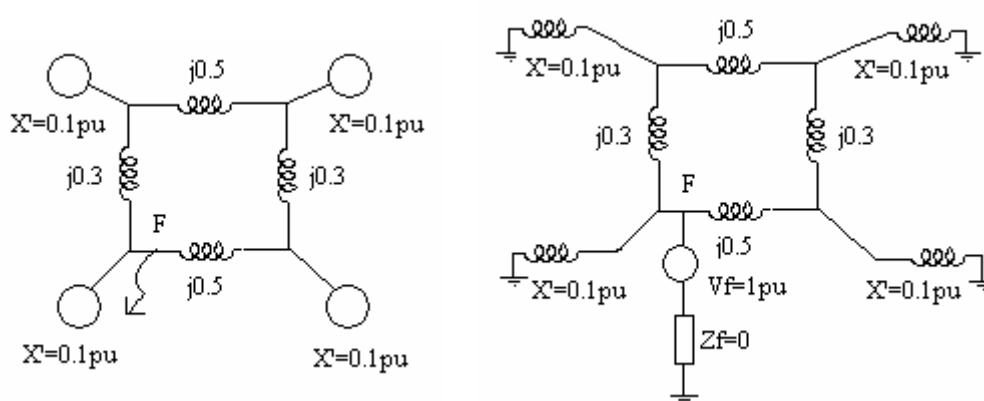
در هموپرلراز طرف Δ جریانی نمی گذرد.

$$\begin{cases} I_{G_0} = 0 \\ I_{d\Delta} = I_{dGj} = j1/9 \\ I_{i\Delta} = I_{iG} = 0j1.9 \end{cases} \begin{cases} I_{1G} = I_{dG} + I_{iG} + I_{oG} = 0 \\ I_{2G} = I_{0G} + aI_{iG} + a^2I_{dG} = (a^2 - a)1.9 = j\sqrt{3}1.9 \\ I_{3a} = I_{0G} + a^2I_{iG} + aI_{dG} = j\sqrt{3}1.9 \end{cases}$$

در فاز ۱ در طرف λ ترانس اتصالی روی داده که در G در فاز ۱ جریانی نیست ولی در فازهای ۲ و ۳ جریان داریم.

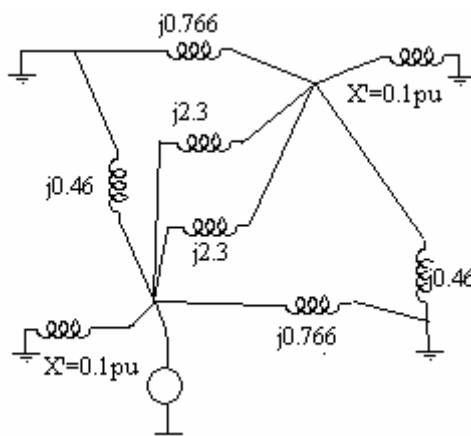
Example 9.5/293

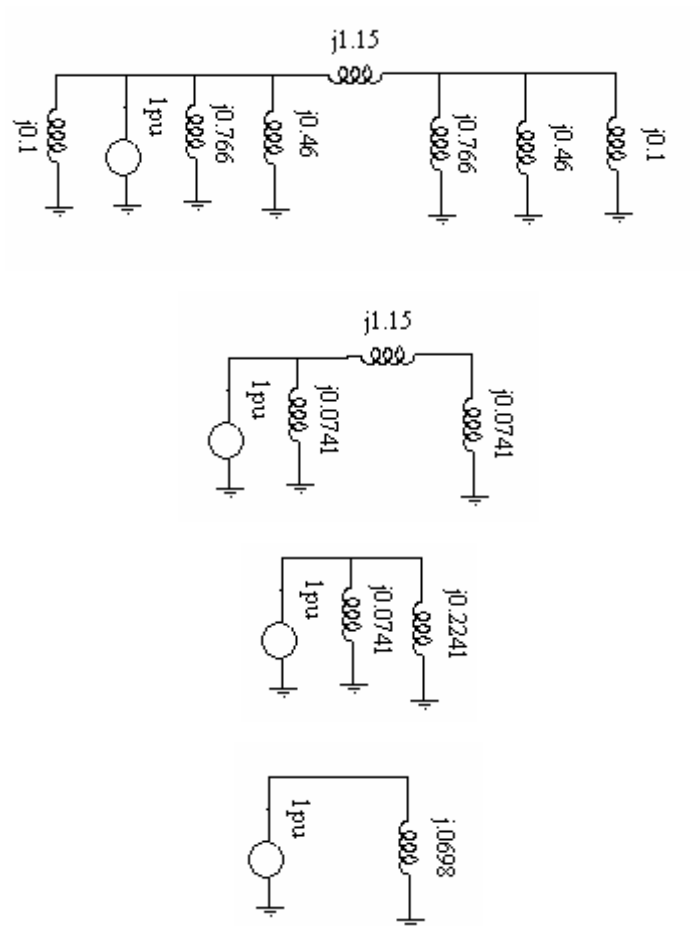
در نقطه F از یک شبکه سه فاز، مطابق شکل زیر یک اتصال کوتاه سه فاز روی می‌دهد مطلوب است جریان اتصال کوتاه به KA, pu



$$S_b = 100 \text{ MVA}, U_b = 11 \text{ KV}$$

بخاطر تقارن جریانهایی گردشی در حلقه وجود دارد و قبل از اتصالی ولتاژ ژنراتور یک پریونیت است. در تمام نقاط از جمله نقطه F وجود دارد و در اتصال کوتاهی باید V_f ولتاژ نقطه اتصالی قبل از اتصال کوتاه و در حالت عادی مدار باشد.





$$I_f = \frac{1}{j0.0698} = -j14.295 \text{ pu}$$

$$\Rightarrow \bar{I} = \bar{I}_f \times \bar{I}_b = 75.12 \text{ KA}$$

$$I_b = \frac{s_b}{\sqrt{3}u_b} = \frac{100M}{\sqrt{3} \times 11K} = 5.2486 \text{ KA}$$

ادامه فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

$$\begin{array}{ccc} \text{پس از} & \text{برقراری} & \\ \Rightarrow & & \\ P_{m0} \rightarrow P_{m1}, \delta_0 \rightarrow \delta_1 & \Rightarrow & p_{e0} \rightarrow p_{e1} \end{array}$$

استاتیکی پایداری

$$p_{m1} \rightarrow p_{m0} \Rightarrow p_{m0} < p_1 \Rightarrow p_a = p_{m0} - p_{e1} < 0 \Rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_0$$

حال اگر نقطه کار حول نقطه A باشد باتوجه به اینکه نقطه A يك نقطه *stable* (پایدار) است خواهیم گفت پایداری استاتیکی وجود دارد ولی نقطه B حتی برای تغییرات جزئی، يك نقطه غیر استاتیکی است.

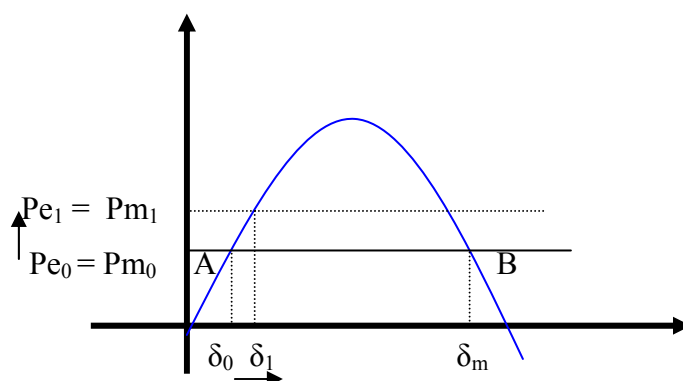
$$p_{m0} \rightarrow p_{m1} \rightarrow p_{m0}$$

زیرا :

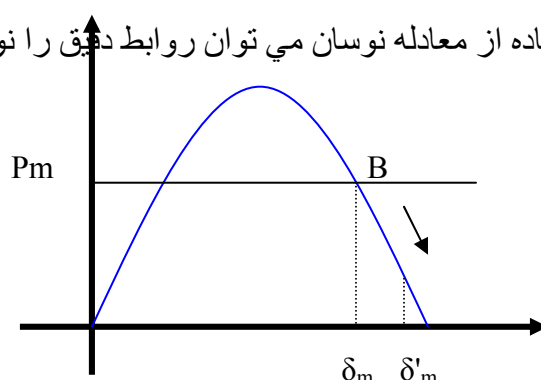
۱- بطور لحظه ای از ژنراتور بار کشیده و سپس قطع می کنیم. فرض می کنیم که چنین ژنراتوری به شین بی نهایت وصل بوده و تغییرات جزئی قدرت در شبکه بی نهایت پیش آید. مثلاً توان بیشتری لازم باشد. در این صورت فرض کنیم توان بعلت اتصال بارهای اضافی يك مقدار جزئی افزایش یابد (البته با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکی) در اینصورت حتی اگر این قدرت خواسته شده بصورت لحظه ای هم باشد، با فرض ثابت بودن قدرت مکانیکی این قدرت اضافه خواسته شده از انرژی جنبشی ماشین تامین می شود. می خواهیم رفتار ژنراتور را در این حالت بررسی کنیم. در این حالت داریم:

$$p_m < p_e \Rightarrow \delta_1 \rightarrow \delta_0$$

شتاب منفی بوده و سرعت روتور به نقطه قبلی بر می گردد. پس A بطور استاتیکی پایدار است.



هرگاه این مسئله را از دید نقطه B بررسی کنیم اگر زاویه بار از δ_m به مقدار δ'_m افزایش یابد چون P_e کاهش یافته ولی P_m ثابت است پس δ افزایش می یابد (افزایش سرعت روتور و افزایش ناپایداری). بصورت کلی تر با استفاده از معادله نوسان می توان روابط دقیق را نوشت.



افزایش سرعت روتور و افزایش ناپایداری $\delta \rightarrow \delta'_m \rightarrow P_m > P_e \rightarrow p_a > 0$

حالت اولیه $A_0 = P_{e0} = P_{m0}$

$$P_{m0} \rightarrow P_{m1} \Rightarrow P_{m1} > P_{e0} \Rightarrow p_a = P_{m1} - P_{e0} > 0 \Rightarrow \delta_0$$

$$\delta_0 \rightarrow \delta_1 \quad A_1: P_e \rightarrow P_{m1} \quad p_a = P_{m1} - P_{e1} = 0 \rightarrow \delta = \delta_1$$

اما تغییرات زاویه δ متوقف نمی شود زیرا انرژی جنبشی ذخیره شده در روتور بایستی آزاد شده و بصورت انرژی الکتریکی به شبکه به علاوه اصطکاک تبدیل شود.

$$\delta_1 \rightarrow \delta \quad P_{e1} \rightarrow P_e > P_{m1} \quad p_a = P_{m1} - P_{e1} < 0 \rightarrow A_2: \delta = \delta_2$$

$$p_a = P_{m1} - P_{e2} < 0$$

$$\delta_2 \rightarrow \delta, P_{e2} \rightarrow P_e \Rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_1.$$

$$A1 = P_e -$$

اما تغییرات زاویه δ متوقف نمی شود و انرژی جنبشی آزاد شده + اصطکاک بایستی بصورت انرژی الکتریکی از شبکه اخذ شود.

$$\delta_1 \rightarrow \delta \quad p_{e1} \rightarrow p_e \rightarrow P_e(p_{m1} - p_a) > 0 \rightarrow A_0 : \delta = \delta_0$$

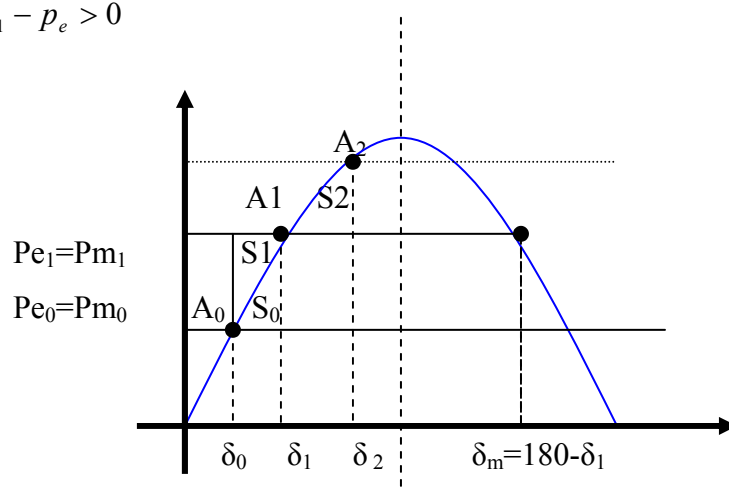
$$P_a = P_{m1} - P_{e0}$$

برای کار ماشین باید همیشه:

$$\delta_0 < \pi/2$$

۲- حال برای تحقیق پایداری دینامیکی قدرت مکانیکی را بطور ناگهانی زیاد می کنیم و در همانجا نگه می داریم تا اینکه پس از نوسانات متعدد $\delta_1 \Rightarrow \delta_0$ بر عکس حالت قبل که بطور لحظه ای بار کشیده و قطع می کردیم باز به همان حالت ماشین را در نظر می گیریم و فرض می کنیم قدرت مکانیکی داده شده را به ۲۰٪ افزایش دهیم $p_{m0} \rightarrow p_{m1}$ که در این حالت ماشین می خواهد با زاویه δ_1 کار کند. حال با توجه به اینکه زاویه مکانیکی نمی تواند جهشی باشد لذا زاویه الکتریکی هم به تبعیت از آن تغییرات تدریجی خواهد داشت و علی رغم تغییر p_m ، δ هم تقریباً δ_0 است و قدرت الکتریکی تحویل همان مقدار قبلی p_e است پس $p_{m1} > p_e$ و مابقی قدرت صرف شتاب دادن روتور می شود و با گذشت زمان

$$p_a = p_{m1} - p_e > 0$$



با افزایش δ p_e افزایش می یابد و در نقطه A' $\begin{cases} p_{m1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$ در لحظه t_1 زاویه بار به δ_1 رسیده و در

این حالت سطح مستطیلی S ، مجموع سطح مثلث پائینی (قدرت الکتریکی داده شده S_0) و مثلث بالایی (هاشور خورده S_1) است که بصورت انرژی جنبشی (صرف شتاب شده) در سیستم باقی میماند.

$$S = S_0 + S_1$$

سپس قدرت معادل همان سطح بالا می رود تا همان مقدار انرژی جنبشی ذخیره شده را بصورت الکتریکی به شبکه تحویل دهد (مثلاً تا نقطه F) در این نقطه $p_e > p_m$ بوده و سرعت روتور کمتر می شود باز هم به همان ترتیب p_{m1} ثابت بوده و $p_e \uparrow$ و $p_a = p_{m1} - p_e < 0$ و روتور سرعتش را کاهش می دهد تا در حالت ثابت بماند.

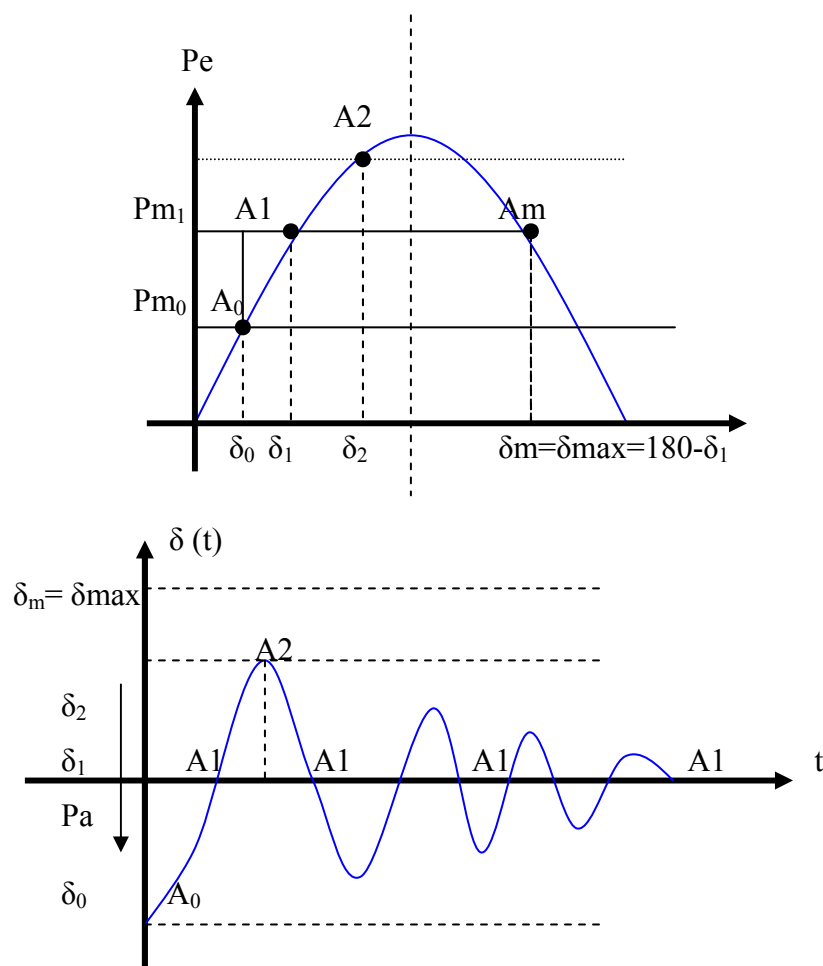
$$\begin{cases} p_{m_1} = p_e \\ p_a = 0 \end{cases}$$

$$S_1 = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_{m_1} - p_e) ds \quad S_2 = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (p_e - p_{m_1}) d\delta$$

به علت وجود انرژی جنبشی نوسان بین δ_0 و δ_2 ادامه می یابد (مربوط به نقطه F) ولی با توجه به تلفات اصطکاک دامنه نوسان بصورت میرایی کاهش یافته و در نهایت بر هم منطبق می شود (وضعیت جدید) ولی باید توجه کرد که باید سطح بالایی تا نقطه F برابر سطح پایینی $A_1=A_2$ هاشور خورده باشد. منظور سطحی است که تا δ_M باشد و اگر سطح بالایی که معادل افزایش قدرت مکانیکی است، برای نوسان کافی نباشد δ از δ_M عبور کرده و پایداری از بین خواهد رفت و همین مسئله است که ما را بر آن می دارد که تغییرات افزایش P_m را بطور تدریجی انجام دهیم تا دامنه نوسان زیاد نباشد.

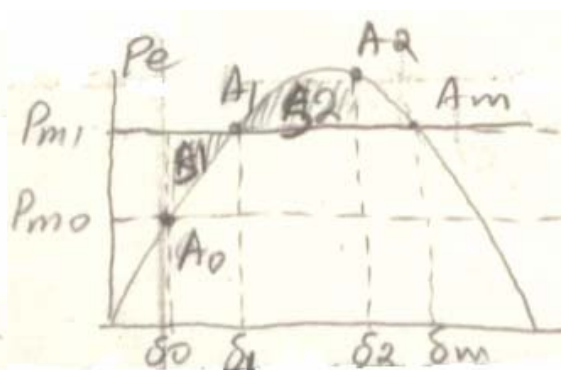
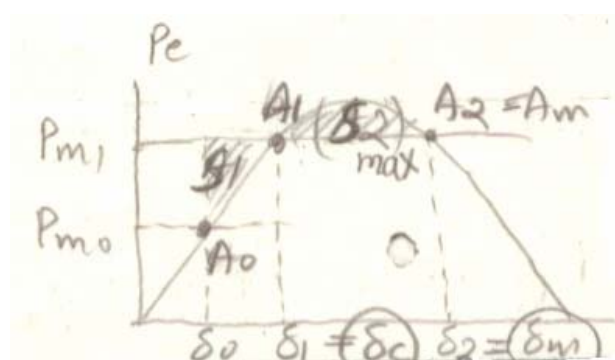
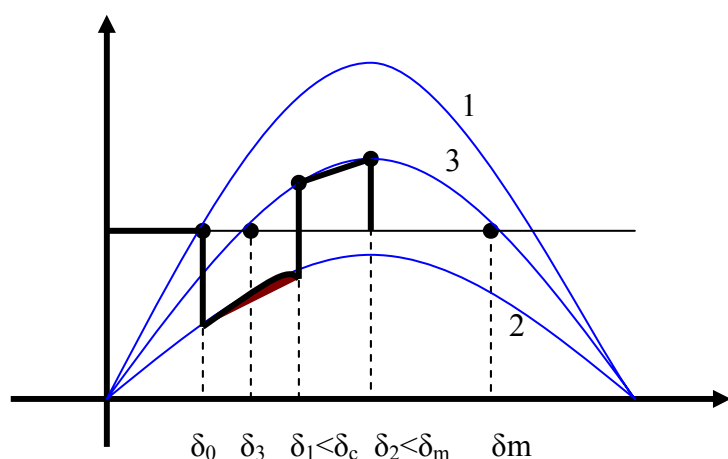
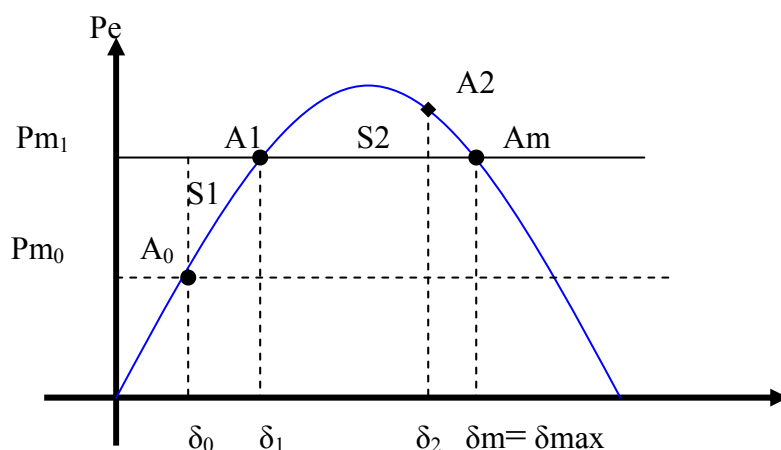
رسم نمودار توان شتاب دهنده P_a

در حالت کلی اصطکاک به پایداری شبکه های قدرت کمک می کند. $\delta_m = \delta_{max}$ حداکثر زاویه بار در شرایط پایداری گذرا می باشد. $\delta_m = 90$ حداکثر زاویه بار در شرایط پایداری استاتیکی (ماندگار) است.



این منحنی می تواند منحنی توان الکتریکی و توان شتاب دهنده هم (بصورت معکوس) باشد. البته تغییرات ناگهانی قدرت نمی تواند در شبکه رخ دهد ولی عیب واتصال زیاد پیش می آید. در شبکه اتصالی ایجاد شده است. شرط کامل وجود پایداری گذرا بصورت معیار سطوح برابر:

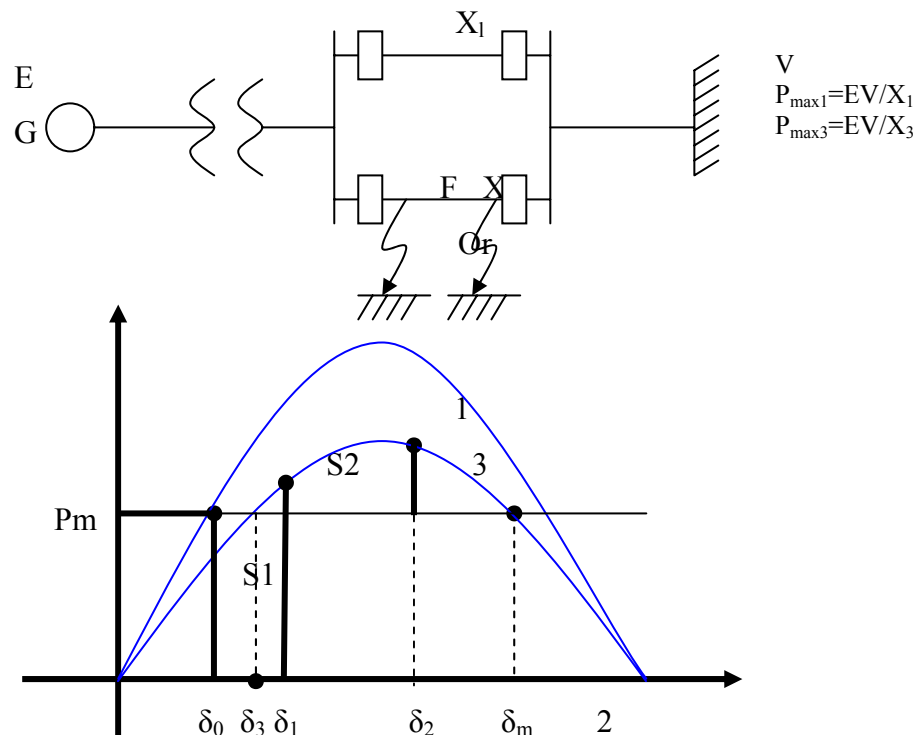
$$S_1 = S_2 \leq S_{2,\max}$$



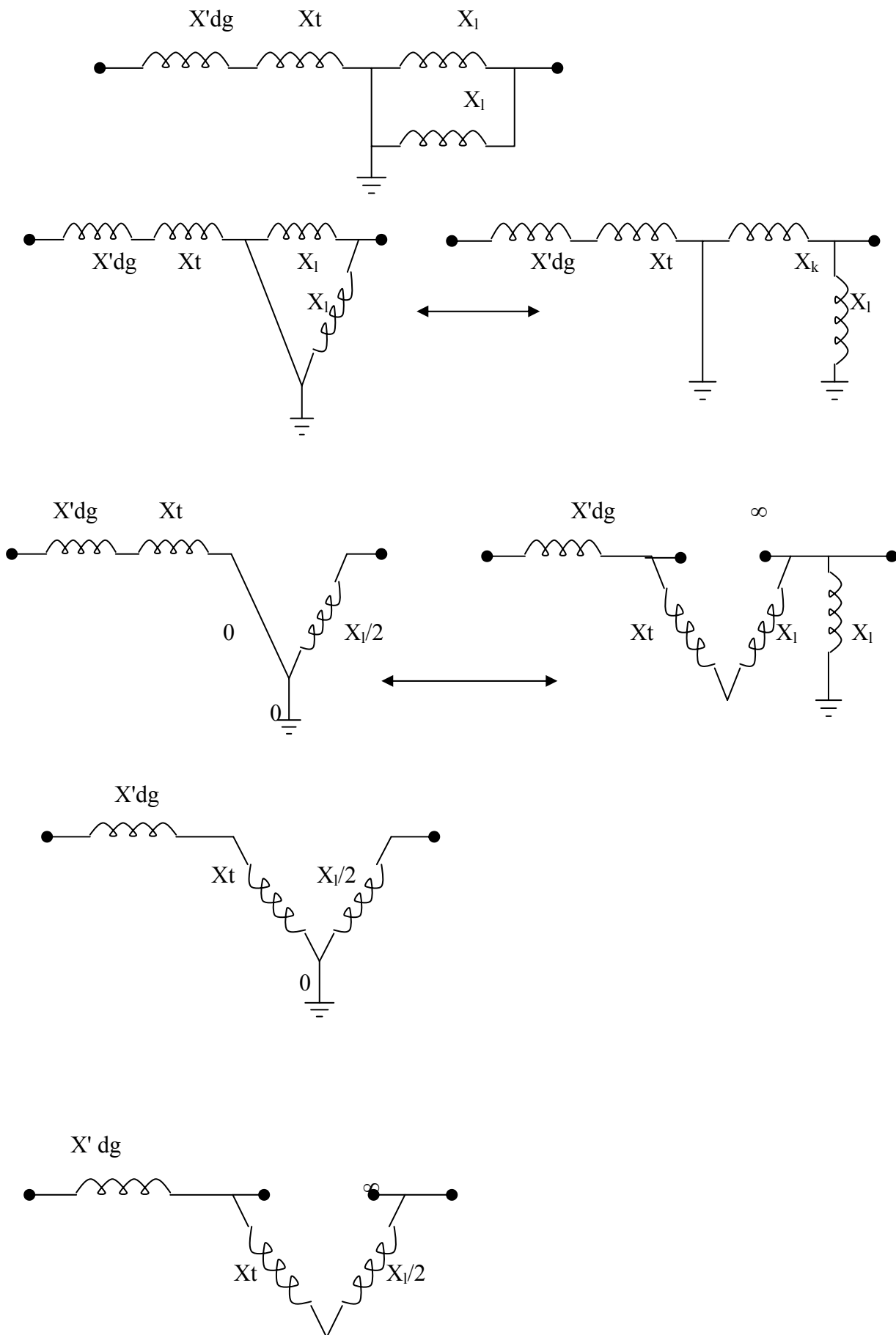
بررسی تغییرات زاویه بار ماشین

الف- اتصال کوتاه در یک طرف خط انتقال

اتصال کوتاهی در اول یا آخر یکی از خطوط بوقع می پیوندد. مسلماً دژنکتور بلافاصله قطع نمی کند.



با توجه به اینکه اتصال کوتاه ۳ فاز است، در زمان عیب از $t_0 \rightarrow t_1$ قدرت انتقالی به شبکه صفر است که در منحنی فوق نشان داده شده است حال می خواهیم X بین ژنراتور و شبکه را حساب کنیم.



یا به طور ساده تر:



در زمان عیب $x_2 = \infty \rightarrow P_{e2} = 0$ ($p_{\max 2} = 0$) (دژنکتور بلافاصله عمل نمی کند و پس از Δt خط معیوب را جدا می سازد).

بعد از رفع عیب برداشته شدن خط معیوب داریم:

$$X_3 = X'_{dg} + X_l + X_l$$

$$P_{e3} = \frac{EV}{X_3} \sin \delta = P_{\max} \sin \delta$$

پس با توجه به X_3 ملاحظه می شود که توان انتقالی کاهش خواهد یافت. با توجه به اینکه در فاصله زمانی رفع عیب سرعت زاویه ای و انرژی جنبشی روتور افزایش می یابد منحنی قدرت روی منحنی جدید آمده (منحنی ۳) و باید سطح بالایی منحنی جدید با منحنی انرژی جنبشی ذخیره شده باشد برابر باشد. برای پایدار بودن سیستم سطح ضد شتاب دهنده بایستی با سطح شتاب دهنده مساوی باشد.

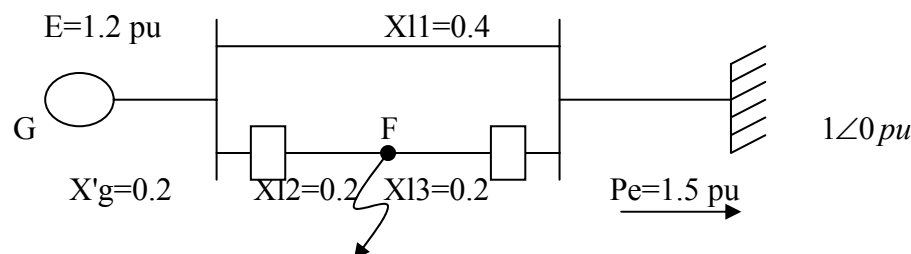
$$S_1 \leq (S_2)_{\max}$$

شرط وجود پایداری گذرا معیار سطوح برابر است. Equal Area Criterion.

سطح S_1 بستگی به زمان $\Delta t = t_1 - t_0$ برای رسیدن به δ_1 دارد که پایداری را کوچک بودن این زمان Δt و کوچک شدن سطح S_1 بهتر میکند.

پس از نوسان سیستم حالت پایدار خواهد یافت ولی ممکن است زاویه بار تا یک حدی مثلاً δ_e (بحرانی) بتواند پیش رود تا پایداری سیستم از بین نرود.

مثال: ژنراتوري توسط دو خط پارانل مطابق شکل قدرت معادل $1/5$ پريونيت را به شبکه تحويل مي دهد. در نقطه F عيبي پيش مي آيد كه بلافاصله دژنكتورهاي طرفين خط معيوب عمل کرده و خط معيوب را از شبکه حذف مي کنند تغييرات زاويه اي بار را روي اين شبکه بررسي كنيد .



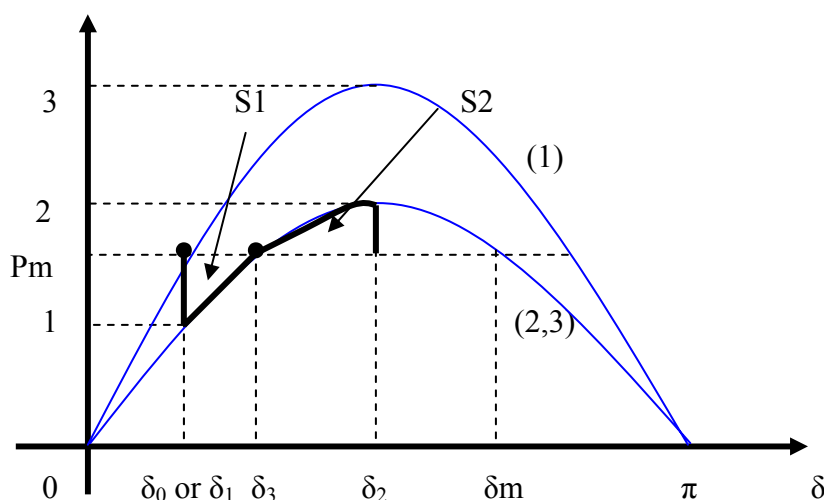
حل

$$X_1 = 0.2 + \frac{4}{2} + 0 = 0.4$$

قبل از عيب

$$\frac{EV}{X_1} \sin \delta = \frac{1.2 \times 1}{4} \sin \delta_c \Rightarrow 1.5 = 3 \sin \delta_0$$

$$\delta_0 = 30 = 0.524 \text{ rad}$$



چون دژنكتورها بلافاصله عمل كردند پس قدرت انتقالي روي منحنی يك خط سالم قرار خواهد گرفت
(نه روي خط صفر مثل حالت قبل)

$$X_3 = 0.2 + 0.4 + 0 = 0.6 \quad \frac{EV}{X_3} \sin \delta = 2 \sin \delta \rightarrow$$

$$2 \sin \delta_3 = 1.5 \rightarrow \delta_3 = 48.6 = 0.848 \text{ rad}$$

$$\delta_m = 90^\circ + (90 - \delta_3) = 180 - \delta_3 = 131.4^\circ \rightarrow 2.293 \text{ rad}$$

حال باید دید بالای p_m می توان سطحی بدست آورد که معادل سطح پائینی باشد. δ بر حسب رادیان است.

$$A_1 = \left| \int_{\delta_0}^{\delta_3} (1.5 - 2 \sin \delta) d\delta \right| = 0.773$$

$$(A_2)_{\max} = \left| \int_{\delta_3}^{\delta_2} (25m\delta - 1.5) d\delta \right| = .478$$

برای تعیین δ_2 :

$$S_1 = S_2 \rightarrow 0 / 0773 = \int_{\delta_3}^{\delta_2} (2 \sin \delta - 1.5) d\delta = (-2 \cos \delta - 1.5\delta) \Big|_{\delta_1}^{\delta_2}$$

$$1.5\delta_2 + 2 \cos \delta_2 = 2.518$$

$$\delta_2 = 10218 \text{ rad} = 69.8^\circ$$

تغییرات زاویه بار δ از روی معادله نوسان بررسی می شود.

$$1.5 - 2 \sin \delta = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m - P_e = P_m - \frac{EV}{X} \sin \delta = P_a$$

طرفین به $\frac{d\delta}{dt}$ ضرب می شود.

$$M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt} = (p_m - p_e) \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{M}{2} \frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_m - p_e) \frac{d\delta}{dt}$$

$$\frac{d}{dt} \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \left(\frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^{2-1} = 2 \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} \cdot \frac{d\delta}{dt}$$

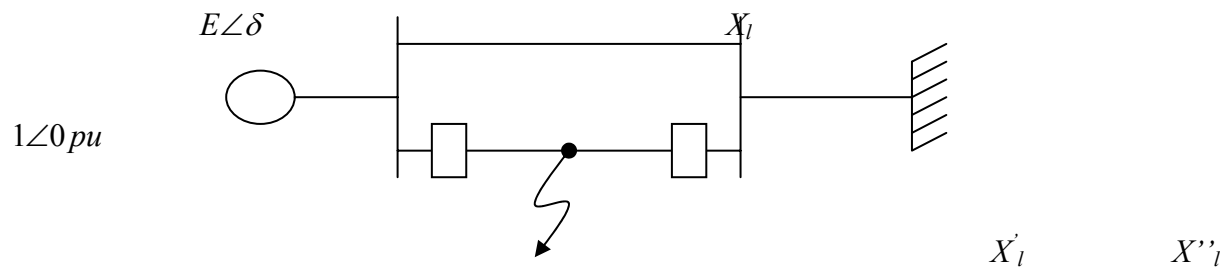
$$\frac{M}{2} d \left[\left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (p_m - p_e) d\delta$$

سطح زیر منحنی

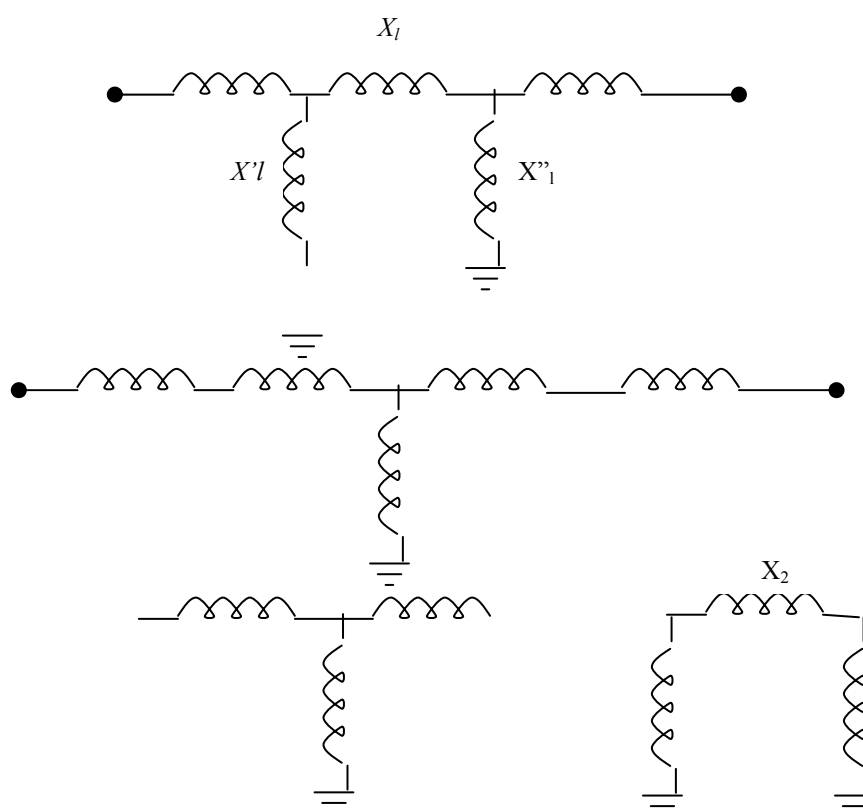
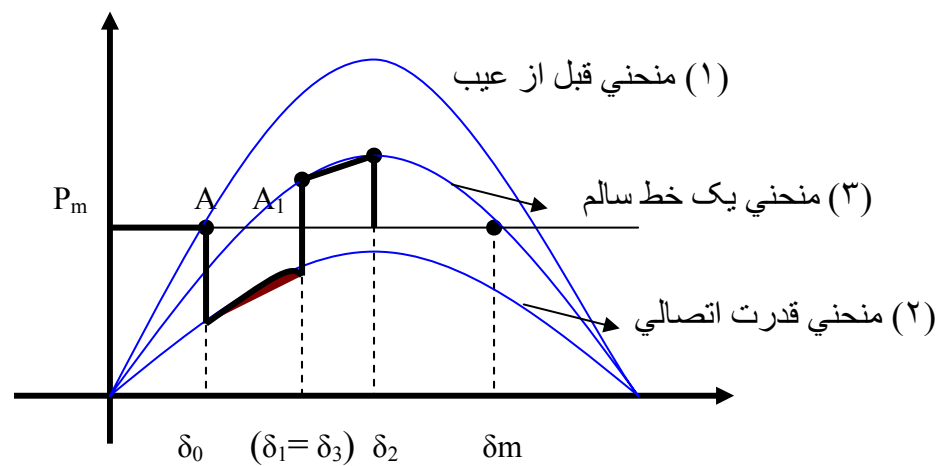
$$\frac{M}{2} \left(\frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \int (p_m - p_e) d\delta = \int \left(p_m - \frac{Ev}{x} \sin \delta \right) d\delta$$

و از همین رابطه نتیجه می گیریم که سطح مشخص شونده در منحنیهای قبل معادل انرژی جنبشی است.

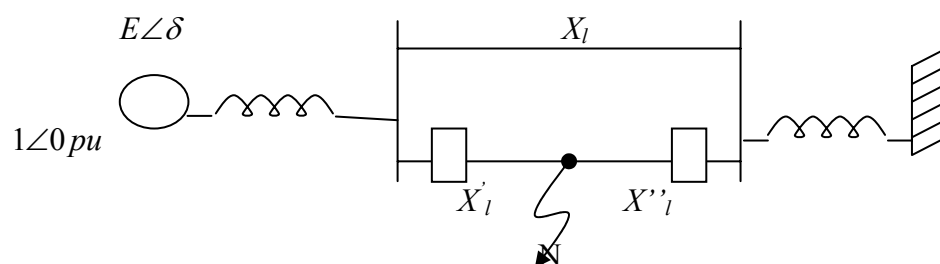
در حالت اتصال کوتاه غیر ۳ فاز (مثلاً تکفاز) و به غیر از ابتدا و انتهای خط انتقال اتصال کوتاه در وسط یکی از خطوط صورت می گیرد. نقطه عیب هر نقطه دیگر می تواند باشد.



$$X_l = X'_l + X''_l$$



عیب غیر از اول یا انتهای خطوط صورت می گیرد که می تواند L-L یا L-L-L یا L-G یا L-L-G باشد. در این صورت $X_2 \neq \infty$ خواهد بود (در زمان عیب). در شبکه های قدرت ماشین های سنکرون ممکن است از حالت سنکرون خارج شوند و بعلت های مختلف ممکن است این مساله بوقوع بپیوندد. مثلاً اتصال کوتاهی که برطرف نشود، عملیات سوئیچینگ و یا افزایش ناگهانی بار. بطور کلی این مورد در مورد يك سیستم دو ماشینه که قدرت توسط دو خط پارالل انتقال یابد و در یکی اتصال کوتاه پیش آید می تواند مطرح باشد. دیاگرام تکی خطی شبکه ای مطابق شکل زیر است:

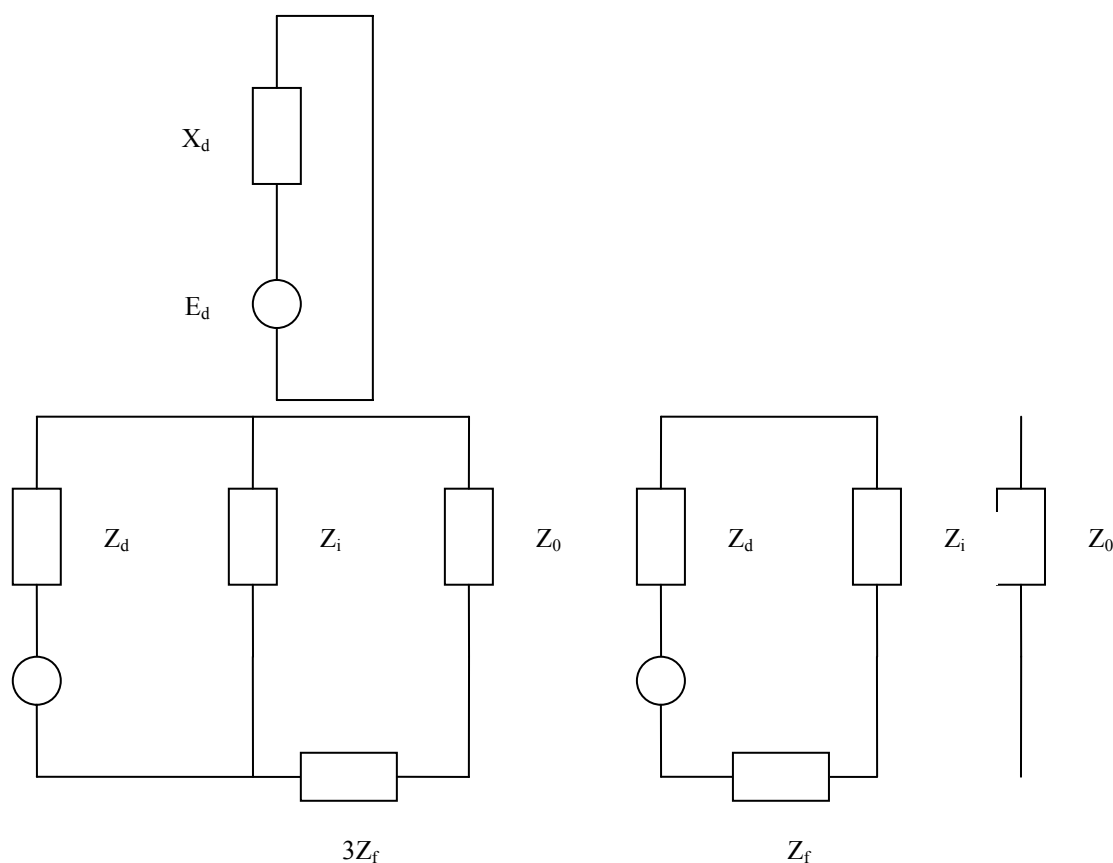


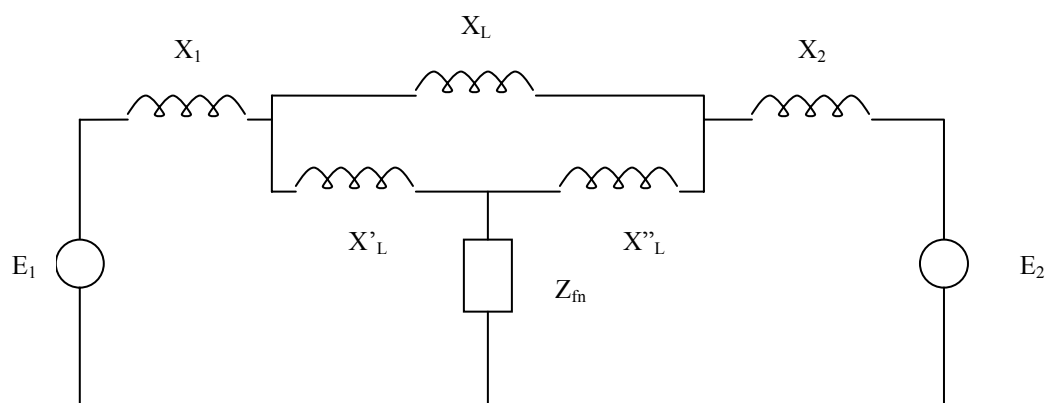
اتصال کوتاه از هر نوع در یکی از خطوط

$$X_l = X'_l + X''_l$$

انتقال رخ می دهد (F)

اگر اتصال کوتاه از نوع ۳ فاز باشد. بین N,F شمای مستقیم را پیدا کرده و NF را اتصال کوتاه می کنیم. اگر از نوع ۲ فاز بدون زمین باشد شمای مستقیم و راکتانس معکوس و هموپلر را حساب کرده و راکتانس معکوس را با شمای مستقیم موازی می کنیم یعنی بین N,F راکتانس معکوس قرار می دهیم در اتصال کوتاه ۲ فاز با زمین در شمای مستقیم بین N,F موازی شده راکتانس معکوس و هموپلر را قرار می دهیم.





اتصال کوتاه ۳ فاز (LLL)

$$Z_{FN} = \begin{cases} 0 & \text{(LL)} \\ Z_i & Z_i + Z_f & \text{(LG)} \\ Z_i + Z_0 & Z_i + Z_0 + 3Z_f & \text{(LLG)} \\ Z_i \parallel Z_0 & Z_i \parallel (Z_0 + 3Z_f) \end{cases}$$

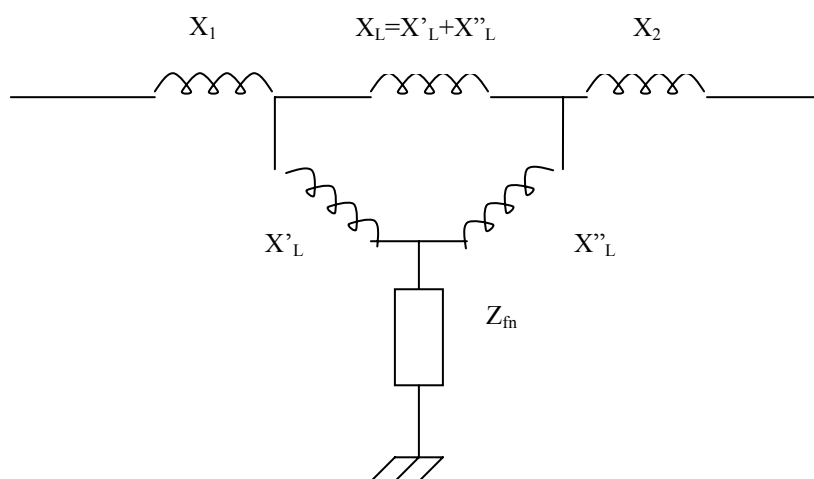
این امپدانس بین N,F در شبکه ترتیب مستقیم قرار می گیرد. برای هر اتصالی مسئله پایداری را در این شبکه باید بررسی کرد.

قدرت منتقله در حین اتصالی بین E_2, E_1 (از ژنراتور به شبکه)

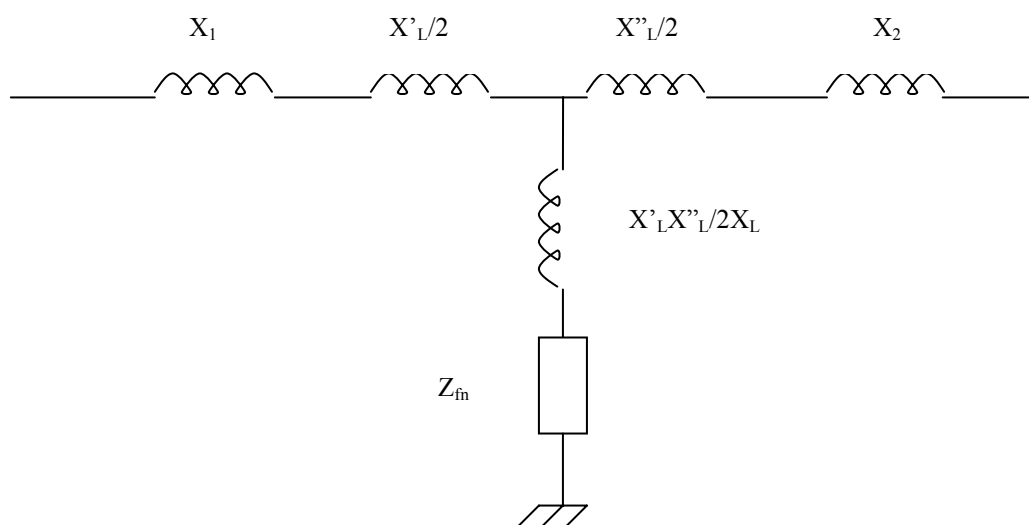
$$p = \frac{E_1 E_2}{X_{12}} \sin \delta$$

X_{12} راکتانس سری بین E_2, E_1

δ زاویه بار بین E_2, E_1



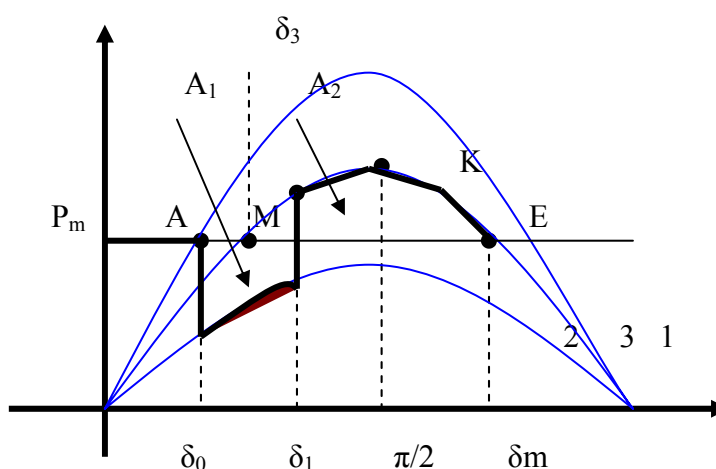
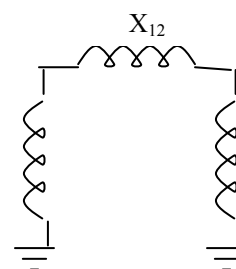
با تبدیل مثلث به ستاره در شبکه انتقال داریم



با تبدیل ستاره به مثلث با احتساب مقاومت های دیگری سری به ستاره قبلی و در این Δ به ضلع بالا

این که قدرت را منتقل می کند احتیاج داریم:

$$X_{12,2} = \left(X_1 + \frac{X''_L}{2}\right) + \left(X_2 + \frac{X''_L}{2}\right) + \frac{\left(X_1 + \frac{x'_L}{2}\right)\left(X_2 + \frac{X''_L}{2}\right)}{\left(\frac{x'_L x''_L}{2X_L} + Z_{FN}\right)}$$



قبل از عیب

$$\begin{cases} P = \frac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin \delta = r_1 P_{\max} \sin \delta \\ X_{12,1} = X_1 + \frac{Xl}{2} + X_2 \end{cases} \quad r_1 = 1$$

در زمان عیب

$$p = \frac{E_1 E_2}{X_{12,2}} \sin \delta = r_2 \frac{E_1 E_2}{X_{12,1}} \sin \delta$$

$$r_2 \langle r_1 = 1$$

در اینجا $X_{12,2} \rangle X_{12,1}$ پس در زمان عیب $X_{12,2} = \frac{1}{r_2} X_{12,1}$ و $P = r_2 P_{\max} \sin \delta$

قدرت منتقله بوسیله توربین ژنراتور E_1 تولید می شود. نقطه کار P_m تحت زاویه δ_0 می باشد. در حالت عیب منحنی قدرت منتقله منحنی پائینی شده و نقطه کار بطور ناگهانی بعلت عیب از A به B نزول کرده و توسط منحنی پائین قدرت منتقل می شود اگر این عیب به همین ترتیب ادامه یابد باید δ آنقدر افزایش یابد تا P_m لازم را به شکل تحویل دهد ولی این تا آخر نمی تواند ادامه داشته باشد چون وضع p_m ژنراتور خراب تر شده و ژنراتور از حالت سنکرون خارج می شود و باید این ادامه در جایی قطع شود در زاویه قدرت δ_1 کلید قدرت عمل کرده و خط معیوب را از مدار قطع می کند که در این حال قدرت از طریق یکی از خطوط منتقل می شود.

بعد از رفع عیب

$$P = \frac{E_1 E_2}{X_{12,3}} \sin \delta = r_3 P_{\max} \sin s$$

$$x = x_1 + x_l + x_2 \quad r_2 < r_3 < r_1 = 1$$

در نوزنقه پائینی در ژنراتور انرژی جنبشی در اینرسی ماشین ذخیره شده که بایستی این انرژی جنبشی به شبکه تحویل داده شود. از نقطه D به بعد شتاب ژنراتور در حال کند شدن است و این کند شدن تا ϵ مانده به E ادامه پیدا خواهد کرد (شرط برای پایداری گذرا $A_1 \leq A_2$).

هر چه دژنکتور زودتر عمل کند انرژی ذخیره شده در اینرسی ماشین کمتر بوده و زودتر مساحت بالایی مساوی با مساحت پائین را پیدا می کنیم. این زاویه بحرانی رفع عیب δ_c است و آن زاویه ای که در آن $A_1 = A_{2\max}$ و در بیشتر از این زاویه، پایداری از دست می رود اگر زاویه در کمتر از δ_c عمل کند آنجا $A_1 < A_{2\max}$ و پایداری صددرصد خواهد بود. پس سرعت عمل دژنکتورها خیلی مهم است. t_c زمان بحرانی رفع عیب، حداکثر زمانی است که در شبکه می توان تحمل کرد تا پایداری در

شبکه از دست نرود ولی عمل تنظیم بین ۰/۵-۱ ثانیه صورت می گیرد. ۵-۷ سیکل بعد دژنکتور قطع می کند که این حداکثر مقدار برای دژنکتور است. اگر دژنکتور بعد از این سیکل عمل کند پایداری از دست می رود.

Case c: Recloser

حالت ۴ اگر کلید قدرت خط شماره ۲ بطور موفقیت آمیزی reclose یا دوباره بسته شود (یعنی عیب خط دوم بصورت گذرا بوده و بنابراین بعد از مدتی از بین رفته است) داریم:

$$P_{e4} = P_{el} = P_{\max l} \sin \delta$$

چون با عمل دوباره بسته شدن کلید دوباره همان قدرت اولیه به سیستم داده می شود پس عملکرد پایدار سیستم توسعه می یابد. برای شرایط کلی داریم:

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{pm}{P_{\max 4} \text{ or } P_{\max l}} \right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (p_m - p_{\max 2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_{rc}} (p_{\max 3} \sin \delta - p_m) d\delta$$

$$+ \int_{\delta_{rc}}^{\delta_2} (P_{\max 4} \sin \delta - p_m) d\delta$$

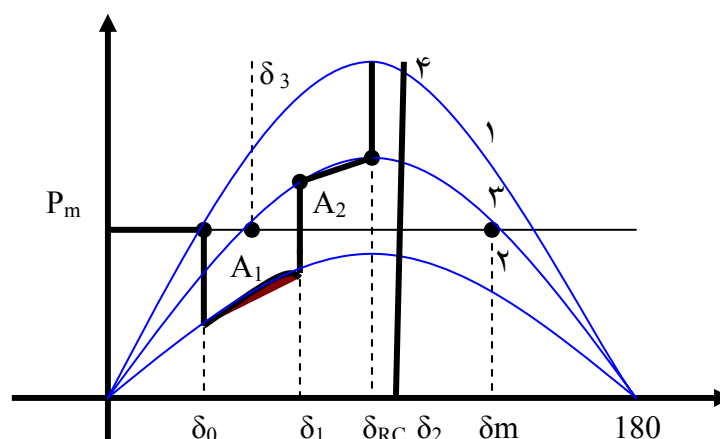
برای شرایط زاویه رفع عیب بحرانی δ_c داریم:

$$\delta_1 \rightarrow \delta_c \Rightarrow \delta_2 \rightarrow \delta_m$$

$$\delta_2 = \delta_m = \pi - \sin^{-1} \left(\frac{pm}{P_{\max 4}} \right)$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (p_m - p_{\max 2} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_{rc}} (p_{\max} \sin \delta - pm) d\delta$$

$$+ \int_{\delta_{rc}}^{\delta_m} (p_{\max 4} \sin \delta - p_m) d\delta$$



پیدا کردن زاویه بحرانی رفع عیب

$$A_1 = A_{2_{\max}}$$

$$\delta_c \rightarrow S_{ABCMA} = S_{MDKEM}$$

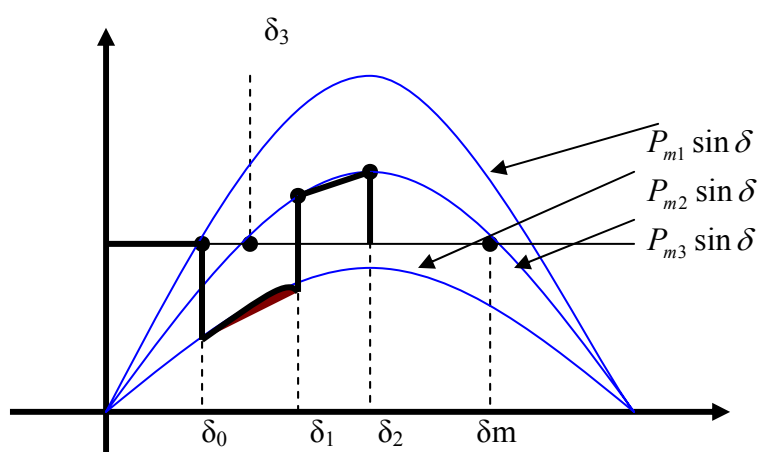
$$P_m(\delta_c - \delta_0) - \int_{\delta_0}^{\delta_c} (r_2 p_{\max} \sin \delta) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (r_3 p_{\max} \sin \delta) d\delta$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_c} (pm - Pe_2) d\delta = \int_{\delta_c}^{\delta_m} (pe_3 = p_m) d\delta$$

$$-p_m \delta_0 + r_2 p_{\max} (\cos \delta_c - \cos \delta_0) - r_3 p_{\max} (\cos \delta_c - \cos \delta_m) - p_m \delta_m$$

$$p_{\max} (r_2 \cos \delta_c - r_3 \cos \delta_c) = p_m (\delta_c - \delta_m) + P_{\max} (r_2 \cos \delta_0 - r_3 \cos \delta_m)$$

$$\cos \delta_c = \frac{\frac{pm}{p_{\max}} (\delta_0 - \delta_m) + (r_2 \cos \delta_0 - r_3 \cos \delta_m)}{r_2 - r_3}$$



فقط δ_m, δ_0 به رادیان می باشد.

P_M قدرت منتقله قبل از عیب

نقطه $p_0 = p_m \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0$

روي منحنی (۱) $\delta_0 = \sin^{-1} \left(\frac{P_m}{P_{\max 1}} \right)$ رادیان

پایداری

$$\delta_m = \pi - \sin^{-1} \frac{pm}{P_{\max}}$$

روي منحنی (۳) $\delta_m = \sin^{-1} \frac{P_m}{P_{\max 3}}$

زمان بحرانی رفع عیب از روی زاویه معلوم می شود $t_c = ? \rightarrow$ معلوم

$$\delta_c =$$

اگر مقدار تغییرات زاویه بار را بر حسب زمان رسم کنیم از روی منحنی می توان زمان بحرانی را حساب کرد.

$$P_{e2} = \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0 \quad p_a = p_m - r_2 \sin \delta_0 = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

$$p_a = p_m - \frac{EV}{X_0} \sin \delta_0 = M \frac{d^2 \delta}{dt^2}$$

از حل این معادله غیر خطی به صورت غیر خطی زاویه بار تعیین خواهد شد.

$$p_m^{MW} - p_e^{MW} = M^{MJ \text{ sec/rad}} \frac{d^2 \delta^{rad/sec^2}}{dt^2}$$

$$M = HS_b / (F_s \pi)$$

$$p_m^{Pu} - p_e^{Pu} = M^{MJ \text{ sec/rad}} \frac{d^2 \delta^{rad/sec^2}}{dt^2}$$

می توان زوایای استفاده شده در معادله بالا را بر حسب درجه هم بیان کرد.

$$M' = M \frac{H}{f_s \pi} \left[\frac{\text{sec}^2}{\text{rad}} \right] \text{ or } \frac{H}{f_s 180} \left[\frac{\text{sec}^2}{\text{deg}} \right] \quad \Delta t = \frac{t_c - t_0}{n}$$

در روش گام بگام زمان را به n قسمت مساوی تقسیم کرده و بزرگی n روی تقریباً محاسبات اثر دارد.

$$(n-2)\Delta t \quad (n-1)\Delta t \quad (n)\Delta t \Rightarrow t_0 + (n-2)\Delta t \dots (t_0 + n\Delta t = t_c)$$

بجای اینکه شتاب را بصورت یک منحنی الخط حساب کنیم آنرا بصورت خط شکسته فرض می کنیم، از

وسط گام قبل آخر تا وسط گام آخر، در لحظه $(n-1)\Delta t$ شتابی داریم و برای گام هایی دیگر نیز چنین

عمل می کنیم. از وسط یک گام تا وسط گام دیگر شتاب را ثابت فرض می کنیم و به این ترتیب منحنی

توان شتاب دهنده بوجود می آید. در لحظه n و n-1 شتاب را ثابت فرض می کنیم. سرعت را هم در

لحظه $n - \frac{3}{2}, n - \frac{1}{2}$ ثابت فرض می کنیم. تغییرات سرعت و جهش سرعت مربوط به توان شتاب دهنده

$$\alpha = \frac{\omega'_{n-1} - \omega'_{n-\frac{3}{2}}}{\Delta t} = \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Big|_{n-1} = \frac{p_a(n-1)}{M}$$

$$\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}} = \Delta t \cdot \frac{p_a(n-1)}{M} \quad \text{همان بازه در منحنی اول است.}$$

$$\omega'_{n-\frac{3}{2}} - \omega'_{n-\frac{5}{2}} = \Delta t \cdot \frac{p_a(n-2)}{M}$$

یکی از روش های حل عددی این معادله دیفرانسیل روش گام به گام است.

توان شتاب دهنده يك تابع نقضانی است که رفته رفته کم می شود. تغییرات سرعت ماشین بر حسب

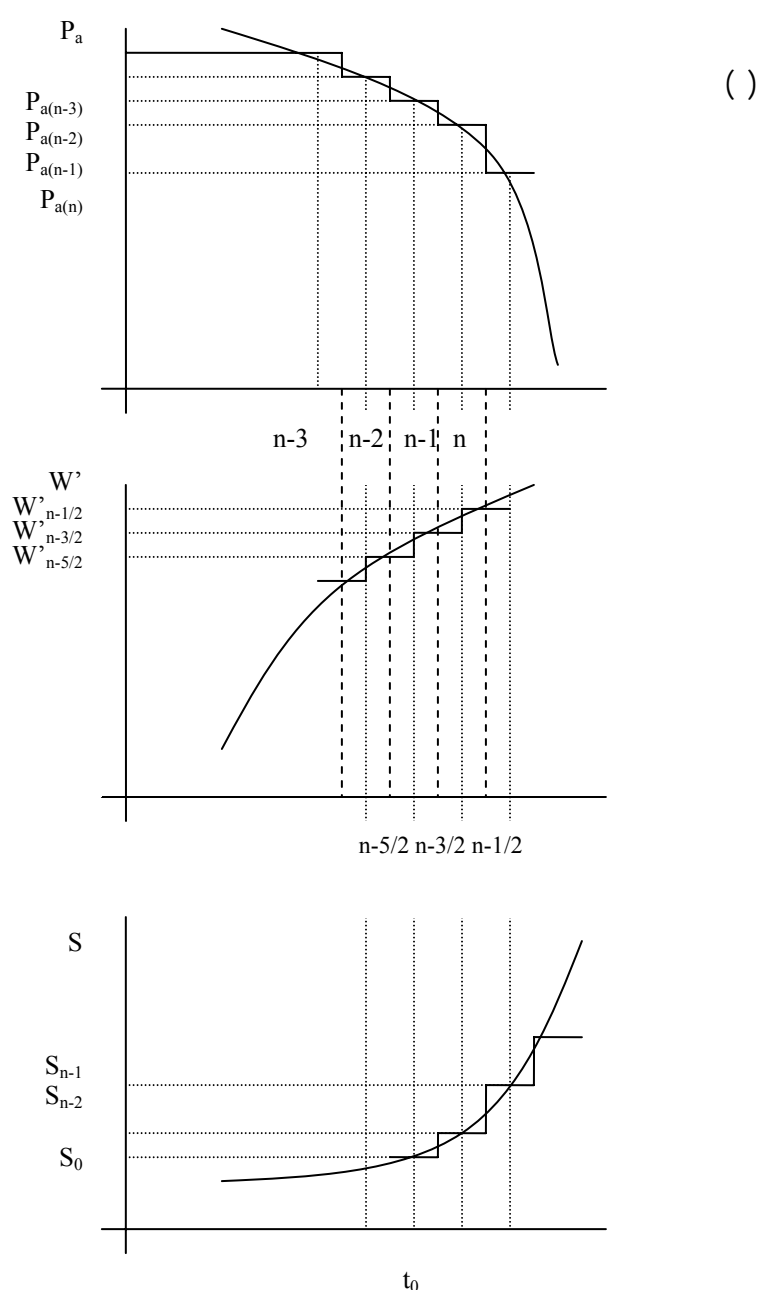
زمان

را در منحنی دوم رسم می کنیم. در زمان غیر از عیب $\omega - \omega_s = 0$. در لحظه $t=0$ با زیاد شدن زمان

افزایش $w-w_s$ می یابد. در منحنی دوم زاویه δ بر حسب زمان را رسم می کنیم در لحظه $t=t_0$ ،

$\delta = \delta_0$ و با افزایش زمان افزایش می یابد. خط معیوب قبل از δ_c باید قطع شود. اگر δ را بر حسب

زمان پیدا کردیم از روی منحنی t_c را می توان پیدا کرد. پس مهم رسم منحنی $\delta(t)$ است.



در لحظه $t = \bar{0}$ ← منجني (۱) پایدار در δ_0

$$P_{a\bar{0}} = p_m - p_{e1,\delta_0} = 0$$

در لحظه $t = 0^+$ ← منجني (۲) در حال نوسان در شروع از δ_0

$$P_{a0^+} = p_m - p_{e2,\delta_0} \neq 0$$

پس بطور متوسط در $t=0$ توان شتاب دهنده P_{a0} جمع مقادیر فوق و تقسیم بر ۲ خواهد شد. مقدار میانگین فقط در لحظه $t=0$ به صورت زیر است:

$$P_{a_0} = \frac{P_{a\bar{0}} + P_{a0^+}}{2}$$

$$M = \frac{S_b H}{\pi f_s} \left[\frac{MJ \sec}{rad} \right] \quad \frac{s_b H}{180 f_s} \left[\frac{MJSec}{deg} \right]$$

$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s} \left[\frac{\sec^2}{rad} \right] \quad or \quad \frac{H}{180 f_s} \left[\frac{\sec^2}{deg} \right]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M} \cdot P_{a(n-1)}^{[MW]} \rightarrow [rad] or [deg]$$

$$\frac{\Delta t^2}{M'} \cdot P_{a(n-1)}^{[pu]} \rightarrow [rad] or [deg]$$

حال تغییرات δ را به تغییرات ω ربط می دهیم. تغییرات δ بیان لحظه ۲- n و ۱- n مربوط به $\omega'_{n-\frac{1}{2}}$

است و همینطور بقیه. پس می نویسیم

$$\frac{\Delta \delta}{\Delta t} \quad \text{شتاب} \quad \frac{\Delta \omega}{\Delta t} \quad \text{سرعت}$$

$$\Delta \delta_{n-1} = \delta_{n-1} - \delta_{n-2} = \Delta t \cdot \omega'_{n-\frac{3}{2}}$$

$$\Delta \delta_n = \delta_n - \delta_{n-1} = \Delta t \cdot \omega'_{n-\frac{1}{2}}$$

$$\Delta \delta_n - \Delta \delta_{n-1} = \Delta t (\omega'_{n-\frac{1}{2}} - \omega'_{n-\frac{3}{2}}) = \Delta t \cdot \Delta t \cdot P_{a(n-1)}$$

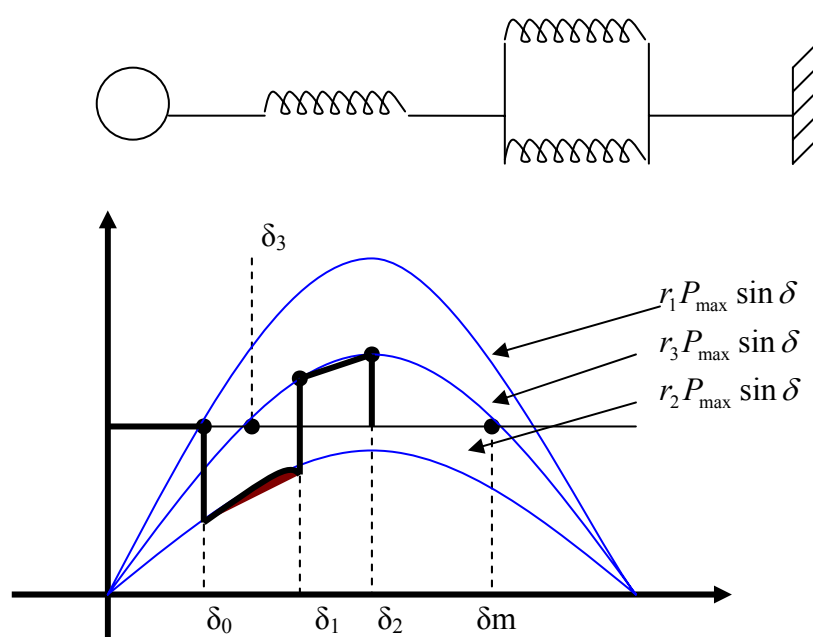
$$\Delta \delta_n = \Delta \delta_{n-1} + \left(\frac{\Delta t^2}{M} \right) P_{a(n-1)}$$

$$t = 0 \rightarrow \Delta \delta_1 = \Delta \delta_0 + \frac{(5 \times 10^{-2})^2}{M} P_{a0}$$

$$\Delta \delta_0 = 0$$

$\Delta \delta_n$ بر روی منحنی (۲) درجه یا رادیان است که بستگی به واحد M یا M' خواهد داشت.

مثال - يك ژنراتور قدرت $P_m = P_e = 1pu$ را به شين بي نهايت مي فرستد قبل از وقوع اتصالي ژنراتور قدرت ماكزيمم $1.8pu$ را دارا بود و در زمان اتصالي اين قدرت به 0.4 کاهش مي يابد و پس از رفع عيب در خط معيوب قدرت منتقله توسط خط سالم به $1.3pu$ افزايش مي يابد مطلوبست الف - محاسبه زاويه بحراني بار δ_c ب- اگر مقدار حرکت زاويه اي ماشين $M' - 3 \times 10^{-4} \text{ sec}^2/\text{deg}$ (پس $\Delta\delta$ درجه خواهد بود). فرض شود باانتخاب گام زماني $\Delta t = 0.05 \text{ sec}$ تغييرات را بر حسب زمان بروش گام بگام پيدا کرده و رسم كنيد و زمان مي نيمم قطع دژنكتورها را از روي آن بدست آوريد (t_c)



$$P_{\max_1} = r_1 P_{\max} = 1.8 pu$$

$$P_{\max} = 1.8 pu$$

$$P_{\max_2} = r_2 P_{\max} = 0.4 \rightarrow r_2 = \frac{0.4}{1.8} = 0.222$$

$$P_{\max} = r_3 P_{\max} = 1.3 \rightarrow r_3 = \frac{1.3}{1.8} = 0.722$$

$$\cos \delta_c = \frac{\frac{P_m}{P_{\max}}(\delta_0 - \delta_m) + (r_2 \cos \delta_0 - r_3 (\cos \delta_m))}{r_2 - r_3}$$

$$1 = 1.8 \sin \delta_0 \rightarrow \delta_0 = 33.7^\circ \text{ or } 0.589 \text{ rad}$$

$$1 = 1.3 \sin \delta_m \rightarrow \delta_m = 129.7^\circ \text{ or } 2.226 \text{ rad}$$

$$\cos \delta_c = \dots \rightarrow \delta_c = 67.8^\circ \text{ or } 1.18 \text{ rad}$$

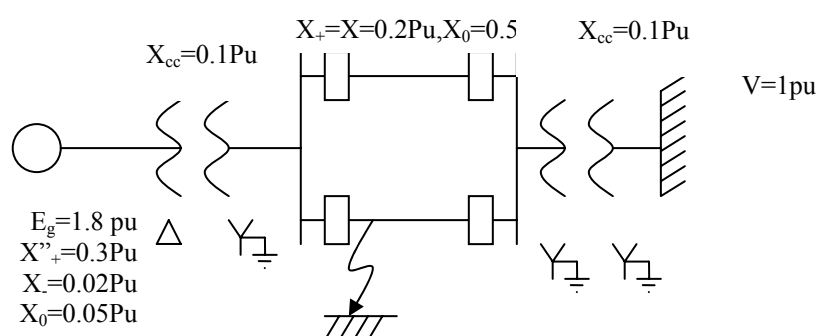
تغییرات δ_0 تا δ_c را بایستی رسم کرد. در لحظه $t=0^-$ ، $p_{a(0)} = 0$ در لحظه

$$P_a(0) = 1 - 4st = 0 \quad t=0^+$$

$$\Delta\delta_n = \Delta\delta_{n-1} + \frac{(\Delta t)^2}{M'} Pa(n-1) \quad \frac{(\Delta t)^2}{M'} = \frac{25}{3} [\text{deg}]$$

$$n=1 \quad \Delta\delta_1 = \Delta\delta_c + \frac{(\Delta t)^2}{M'} \quad Pa(0) = 0 + \frac{25}{3} \left(\frac{1 - 0.4 \sin \delta_c}{2} \right) \approx 3.23^\circ$$

مثال - نمایش تک خطی شبکه ای طبق شکل زیر است



۱- مطلوب است حد پایداری استاتیکی شبکه فوق

۲- اگر با یک مانور یکی از خطوط پارالل قطع شود تخصص کنید شبکه پایدار خواهد بود یا نه (قدرت انتقالی قبل از مانور ۱ pu بوده است)

۳- اگر یک اتصال کوتاه تکفاز زمین در نقطه F بلافاصله بعد از دژنکتور مانند شکل رخ دهد تحقیق کنید حتی اگر اتصال در سیستم دوام یابد شبکه پایدار است.

۴- اگر یک اتصال کوتاه سه فاز در F رخ دهد مطلوب است زاویه قطع بحرانی کلیدهای K_1, K_2

۵- با فرض اینکه مقدار حرکت زاویه ای ماشین $M' = 3 \times 10^{-4} \left[\frac{\text{sec}}{\text{deg}} \right]^2$ باشد با انتخاب گام زمانی

$\Delta t = 0.03^s$ مطلوب است رسم تغییرات δ بر حسب زمان پیدا کردن زمان بحرانی قطع عیب کلیدهای K_1, K_2

$$1- \text{ قبل از عیب } X_1 = X'_+ + X_{cc} + \frac{Xd}{2} + X_{cc} + 0 = 0.3 + 0.1 + \frac{0.2}{2} + 0.1 = 0.6 \text{ pu}$$

$$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} = \frac{1.8 \times 1}{0.6} \times \sin \delta_0 = 1 \rightarrow \delta_0 = 19.5^\circ$$

$$2- \quad X_2 = X'_+ + X_{cc} + X_+ + X_{cc} + 0 = 0.7$$

$$\frac{EV}{X} \sin \delta = 1 \text{ pu} \rightarrow \frac{1.8 \times 1}{0.7} \sin \delta_1 = 1 \rightarrow \delta_1 = 22.9$$

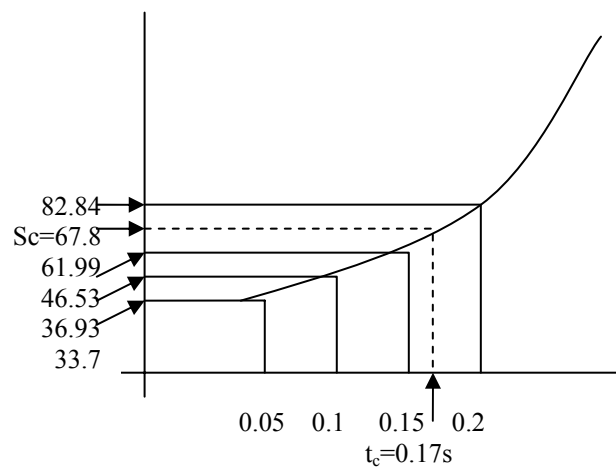
توان شتاب دهنده این مقدار تقسیم بر ۲ خواهد شد (مقدار میانگین) فقط در لحظه صفر

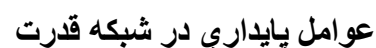
$$\left\{ \begin{array}{l} \delta_1 = \delta_0 + \Delta\delta_1 = 33.7 + 3.23^\circ = 36.93^\circ \\ t = 0 + 0.05 = 0.05 \text{ sec} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_2 = \Delta\delta_1 + \frac{25}{3} P_a(1) = 3.23 + \frac{25}{3} (1 - 0.04 \sin 36.13) = 9.6^\circ \\ \delta_2 = 36.93 + 9.6 = 46.53^\circ \\ t = 2 \times 0.05 = 0.1 \text{ sec} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_3 = 9.6 + \frac{25}{3} (1 - 4 \sin 46.53) = 15.96^\circ \\ \delta_3 = 46.53 + 15.46 = 61.99^\circ \\ t = 3 \times 0.05 = 0.15 \text{ sec} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\delta_4 = 15.46 + \frac{25}{3} (1 - 4 \sin 61.99) = 20.89^\circ \\ \delta_4 = 82.84^\circ \\ t = 4 \times 0.05 = 0.20 \text{ sec} \end{array} \right.$$





اگر کلیدهای قطع در زمان کوتاه سیستم را قطع کنند بهتر است ولی این عمل از لحاظ هزینه گرانتر است در واقع سرعت عمل در نکتور باید بالا باشد.

۲- راکتانسهای شبکه $p = \frac{EV}{X} \sin \delta$

اگر X کوچک شود قدرت حداکثر زیاد می شود. اگر در شبکه X پائین بیاید قدرت مستقیم بالا می رود. پارالل کردن خطوط انتقال انرژی و استفاده از خازنهای سری راکتانس بین E_2, E_1 را پائین می آورد.

۳- نیروی محرکه ژنراتور $p = \frac{EV}{X} \sin \delta$ افزایش E در زمان اتصال کوتاه.

تحریک ژنراتور را بطور مصنوعی و گذر افزایش می دهیم لذا پیک منحنی بالا می رود که به پایداری کمک می کند.

۴- با تنظیم سرعت توربین.

در حالت اتصال کوتاه روتور ژنراتور سرعت گرفته و از حالت سنکرون خارج می شود. سرعت روتور را با استفاده از شیر بخار کم می کنیم ولی بستن شیر بخار ممکن است باعث از بین رفتن سنکرونیزاسیون و زیاد توصیه نمی شود (ثابت زمانی سیستم مکانیکی بیشتر از سیستم الکتریکی است). مثال - یک موتور سنکرون ۴۰٪ قدرت ماکزیمم را از شبکه ∞ جذب می کند بار موتور را بطور ناگهانی حداکثر به چند درصد قدرت ماکزیمم موتور می توان رسانید تا موتور سنکرونیزمی خودش را از دست ندهد؟

ملاحظات کلی

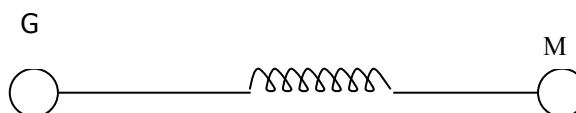
۱- افزایش تدریجی قدرت برای شبکه خطرناک نیست ولی اگر تغییرات ناگهانی باشد اگر بالای سطح pm نتوان سطح معادل را پیدا کرد ممکن است پایداری از دست برود. اگر بخواهیم قدرت انتقالی را افزایش دهیم $1.5 pu \rightarrow 1$ بایستی تدریجی باشد.

۲- حد پایداری دینامیکی از حد پایداری استاتیکی کوچکتر است.

$$90^\circ < 90^\circ$$

۳- زاویه بحرانی رفع عیب 0

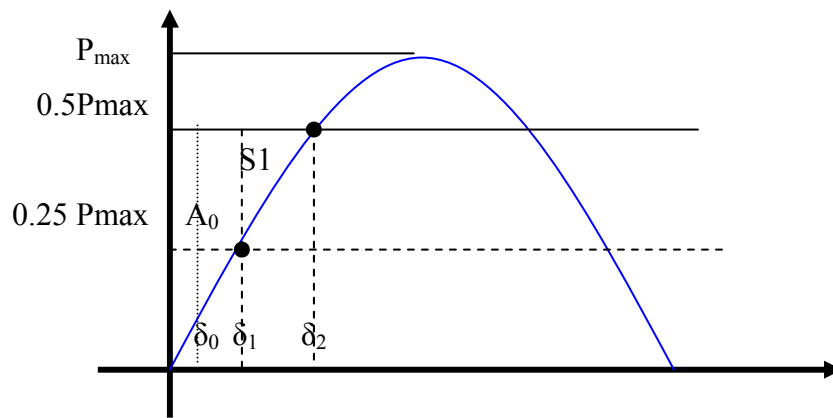
مثال - موتوری که به یک شبکه بی نهایت وصل شده ۲۵٪ قدرت ماکزیمم را جذب می کند. بار موتور را ۲ برابر می کنیم برای اینکه موتور به نقطه تعادل حد ماشین برسد حداکثر تغییرات زاویه δ چقدر است.



$$25P_{\max} = P_{\max} \sin \delta_0$$

$$\delta_0 = 14.48^\circ$$

Pe



$$0.5 P_{\max} = P_{\max} \sin \delta_1$$

$$\delta_1 = 30^\circ$$

$$\int_{14.48}^{30} (0.5 p_{\max} - P_{\max} \sin \delta) d\delta = \int_{30^\circ}^{\delta_2} (p_{\max} \sin \delta - 0.5 P_{\max}) d\delta$$

$$0.5 \left(\frac{\pi}{6} - \frac{14.46 \times \pi}{180} \right) + \cos \frac{\pi}{6} - \cos 14.48^\circ$$

$$= \cos \frac{\pi}{6} - \cos \delta_2 + 0.5 \left(\frac{\pi}{6} - \delta_2 \right)$$

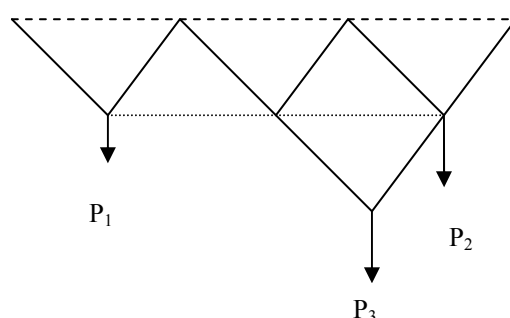
$$2 \cos \delta_2 + \delta_2 - 1.43 = 0$$

فصل چهارم

پایداری در سیستم های قدرت

Power Systems Stability

برای يك شبکه در حالت عادي مي توان ولتاژها و جريانها را حساب كرد. وقتي بار جديدي را از شبکه حذف و يا به آن اعمال كنيم و يا اتصال کوتاه در شبکه ايجاد شود و در اينحال تغييراتي در شبکه ايجاد خواهد شد كه اگر اين تغييرات بطور تدريجي و آهسته باشد ممكن است شبکه تحمل كرده و به شرايط ديگر از پايداري برسد ولي اگر شبکه نتواند اين تغييرات را تحمل كند، اجباراً با آمدن بار جديد شبکه فرو ريخته و ناپايدار خواهد شد. ژنراتورهاي موجود در شبکه چون سنكرون بوده و براي حالت هاي ديناميكي حساس هستند اگر تغييرات ناگهاني پيش آيد و در حالي كه بارها ثابتند ژنراتوري از مدار خارج شده، موجب خواهد شد قدرت آن ژنراتور به روي ديگر ژنراتورها تحميل شده و زاويه بارها و فلوهاي ژنراتورهاي ديگر افزايش يابد. در اين حال قدرت توربينها بايد بيشتر شود. افزايش قدرت ژنراتور با افزايش زاويه بار انجام خواهد شد. در اين حال اگر زاويه بار به حد 60° (زاويه بار بحراني) برسد، با افزايش از مقدار 60° به بعد و باتوجه به رابطه $P = \frac{EV}{X} \sin \delta$ اين كار باعث كاهش P خواهد بود و ژنراتور نخواهد توانست اين بار تحميل شده را تحمل كند. در مواقع پيك بار (شب) كنترل شبکه مهم است چرا كه اگر نتوان پايداري كل شبکه را ايجاد كرد، بايستي قسبتي از شبکه را از مدار خارج كرد.



پایداری سیستم دوشینه یا دوماشینه را بحث و بررسی خواهیم کرد. اگر از سقفي وزنه هايي را از بعضي نقاط يك شبکه توري آویزان کرده باشیم، اگر طنابي از نقطه اي قطع شود، وضع ایستايي شبکه فرق خواهد کرد و سیستم وضعیت دیگری برای تحمل وزنه ها برای خود ایجاد می کند. اما اگر طناب اصلي از سیستم قطع شود، ممکن است شبکه تحمل نکرده و از هم بپاشد و یا ممکن است وزن وزنه ها را زیاد کنیم که در نهایت سیستم تا حدی می تواند افزایش تدریجی را تحمل کند. ولی اگر اضافه کردن وزنه از يك حد افزایش یابد ممکن است بعضي از طنابها و یا حتي خود سیستم از هم بپاشد.

انواع پایداری

(۱) استاتیکی (ماندگار)

در این نوع پایداری تغییرات بصورت تدریجی و کم دامنه می باشد. در بررسی پایداری ماندگار از مدل ماشین ساده (بصورت یک منبع ولتاژ) برای ژنراتور سنکرون استفاده می شود. در این حالت، حد پایداری ماندگار ماشین سنکرون بصورت زاویه بار بحرانی ماشین (δ_C) زاویه قبل از خارج شدن ماشین از حالت سنکرونیزاسیون تعریف می شود. پایداری استاتیکی به شرایط بهره برداری سیستم قدرت اعم از تولید، انتقال و مصرف بستگی دارد.

(۲) - دینامیکی

مسائل مربوط به پایداری استاتیکی و دینامیکی تقریباً یکسان می باشند. در پایداری دینامیکی نیز تغییرات بصورت تدریجی و جزئی در شبکه اتفاق می افتد. تغییرات زمانی در پایداری دینامیکی از حدود چند ده ثانیه تا چند دقیقه می باشد. در پایداری دینامیکی اثرات سیستم تحریک و سیستم گاورنر نیز در مدل ماشین سنکرون بررسی می شوند. پایداری دینامیکی با استفاده از پایدارسازهای سیستم قدرت PSS بهبود می یابد. وجود تغییرات تدریجی و کوچک باعث ایجاد نوسانات طبیعی در شبکه می شود. هرگاه دامنه نوسانات کم باشد در آنصورت نوسانات در زمان کوتاه مستهلک شده و پایداری دینامیکی واقع می شود. هرگاه دامنه نوسانات زیاد باشد در آنصورت نوسانات در زمان طولانی ادامه یافته و ناپایداری دینامیکی ایجاد می گردد.

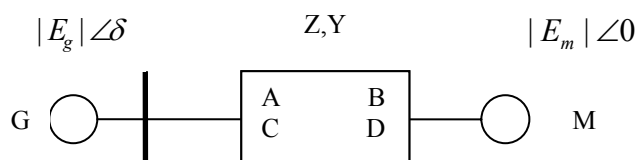
(۳) - گذرا (Transient)

پایداری گذرا در اثر وقوع تغییرات و اختلال ناگهانی و شدید در سیستم شامل اتصال کوتاه، خروج بار، قطع خط، خروج ژنراتور و ... ایجاد می شود. تغییرات زمانی در پایداری گذرا در حدود چند صدم ثانیه تا چند ثانیه می باشد. در مساله پایداری گذرا، سرعت ماشین سنکرون در اثر تغییرات شدید قدرت الکتریکی و زاویه قدرت نقاط مختلف سیستم تغییر می یابد. در صورت عدم برطرف شدن عیب، ماشین های سنکرون در شبکه از سنکرونیزاسیون خارج می شود. در صورت برطرف شدن عیب شبکه به شرایط پایداری استاتیکی

قبل از وقوع غیب برگشته و در غیر اینصورت با قطع محل عیب از شبکه با حفظ یکپارچگی شبکه به شرایط پایداری استاتیکی بعدی خواهیم رفت.

پایداری ماندگار

در بررسی پایداری فرض می شود ژنراتوری را با خط انتقال بلندی به یک بار وصل کرده ایم. ژنراتور با یک خط بلند به یک بار موتور (سیستم یک ماشین متصل به شبکه ∞) در نظر گرفته می شود.



$$\begin{bmatrix} \bar{E}_g \\ \bar{I}_g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{A} & \bar{B} \\ \bar{C} & \bar{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{E}_m \\ \bar{I}_m \end{bmatrix} \Rightarrow \begin{cases} \bar{E}_g = \bar{E}_m \cosh \bar{\gamma} \ell + \bar{I}_m \bar{Z}_c \sinh \bar{\gamma} \ell \\ \bar{I}_g = \frac{\bar{E}_m}{\bar{Z}_c} \sinh \bar{\gamma} \ell + \bar{I}_m \sinh \bar{\gamma} \ell \end{cases}$$

$$\bar{\gamma} = \alpha + j\beta, \quad \bar{Z} = R + j\omega L, \quad \bar{Y} = G + j\omega C, \quad \bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}, \quad \bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}\bar{Y}}$$

$$\begin{cases} \bar{A} = \cosh \bar{\gamma} \ell = \bar{D} & \bar{A}\bar{D} - \bar{B}\bar{C} = 1 \\ \bar{B} = \bar{Z}_c \sinh \bar{\gamma} \ell & \bar{C} = \frac{1}{\bar{Z}_c} \sinh \bar{\gamma} \ell \end{cases}$$

$$\bar{A} = \bar{D} = 1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{2}, \quad \bar{B} = \bar{Z}(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{6}), \quad \bar{C} = \bar{Y}(1 + \frac{\bar{Z}\bar{Y}}{6})$$

$$\bar{S}_g = P_g + jQ_g = \bar{E}_g I_g^* = \frac{|A| |E_g|^2}{|B|} \angle b - a - \frac{|E_m| |E_g|}{|B|} \angle b + \delta$$

$$\bar{A} = |A| \angle a \quad \bar{B} = |B| \angle b \quad \bar{C} = |C| \angle c \quad \bar{D} = |D| \angle d$$

$$\bar{E}_g = |E_g| \angle \delta \quad \bar{E}_m = |E_m| \angle 0 \quad \bar{A} = \bar{D} \quad \bar{A}\bar{D} - \bar{B}\bar{C} = 1$$

اگر بتوانیم δ را تغییر دهیم:

$$\cos(b + \delta) = -1 \Rightarrow b + \delta = \pi \Rightarrow (P_g \rightarrow P_g|_{\max})$$

$b \approx \frac{\pi}{2}$ بنابراین وقتی b به حدود 90° رسید قدرت ماکزیمم از فرستنده گرفته می شود در این صورت داریم:

$$\bar{B} = jX = X \angle 90$$

$$|B| = X$$

$$b = 90$$

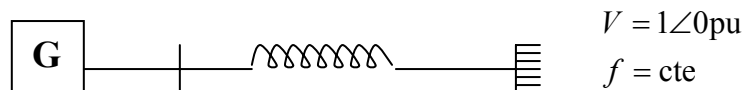
مقدار P_g همچنین وقتی به مقدار حداکثر خود خواهد رسید که داشته باشیم:

$$a = 0$$

$$|A| = |D| = 1$$

همچنین برای خطوط کوتاه $A = D = 1, B = Z, C = 0$ یعنی از مقاومت خط صرف نظر می شود.

برای یک ژنراتور که به شین ∞ وصل شده است داریم:



$$\bar{E} = jX_s \bar{I} + \bar{V}$$

$$\begin{cases} D = A = 1 \\ B = jX_s \\ C = 0 \end{cases}$$

$$P_{eg} = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta$$

$$Q = \frac{|E|}{X_s} (|E| - |V| \cos \delta)$$

$$P_{ij} = \frac{|A|}{|B|} |V_i|^2 \cos(b-a) - \frac{|V_i||V_j|}{|B|} \cos(b+\delta)$$

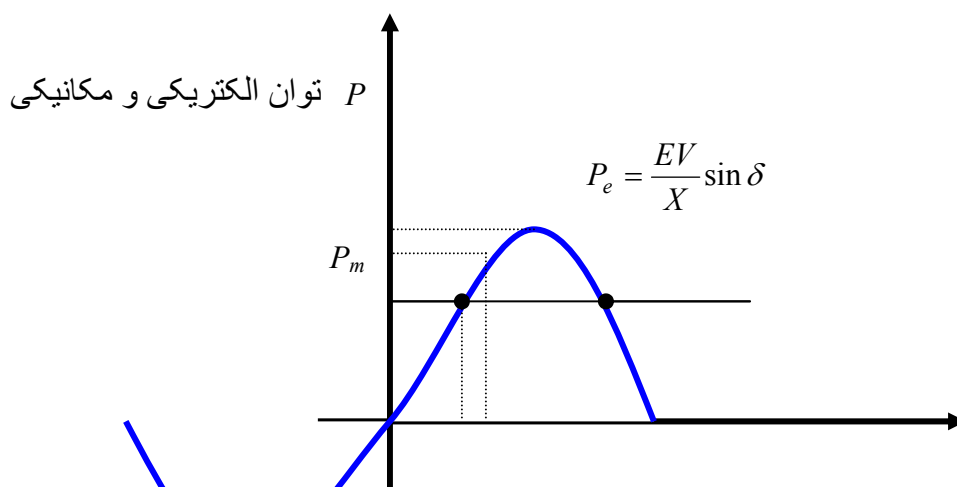
$$Q_{ij} = \frac{|A|}{|B|} |V_i|^2 \sin(b-a) - \frac{|V_i||V_j|}{|B|} \sin(b+\delta)$$

پس تغییرات قدرت برای یک ژنراتور بصورت تغییرات سینوسی از δ است.

$$P_m = P_e + P_{loss}$$

$$P_{loss} \rightarrow 0$$

اگر از تلفات مکانیکی ژنراتور صرف نظر شود آنگاه خواهیم داشت $P_m = P_e$ (معادله نوسان در حالت پایدار)

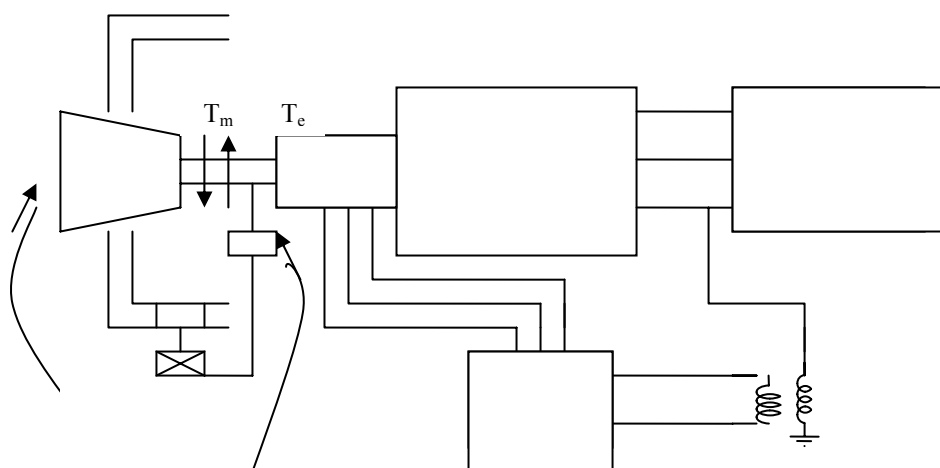


در حالت پایداری در رسیدن تغییرات زاویه صفر خواهیم داشت: $\Delta\delta = 0$

P_m را تا جایی می توان افزایش داد تا δ به ۹۰ درجه برسد و از این محدوده به بعد ژنراتور از حالت پایداری خارج می شود. اگر افزایش قدرت تدریجی باشد زاویه بار فرصت پیدا خواهد کرد تا خروجیش را با شرایط جدید تطبیق دهد ولی تا محدوده ۹۰° (مرحله استاتیکی) میتوان آنرا زیاد کرد. پایداری دینامیکی یکدفعه (لحظه ای) خواهد بود و افزایش قدرت از ۶۰٪ بار تا ۹۵٪ بار خواهد بود. هر چند شاید امکان نداشته باشد ولی این افزایش به صورت تدریجی رخ می دهد. پس برای پایداری در یک شبکه قدرت ایجاد شود افزایش تدریجی قدرت توصیه می شوند نه افزایش دفعه ای.

کنترل قدرت اکتیو

گاورنر بصورت یک سیستم مکانیکی خود کار عمل می کند و از روی شفت توربین کم سرعتی یا پرسرعتی آنرا با فرمان دادن به شیر اصلی بخار تنظیم میکند

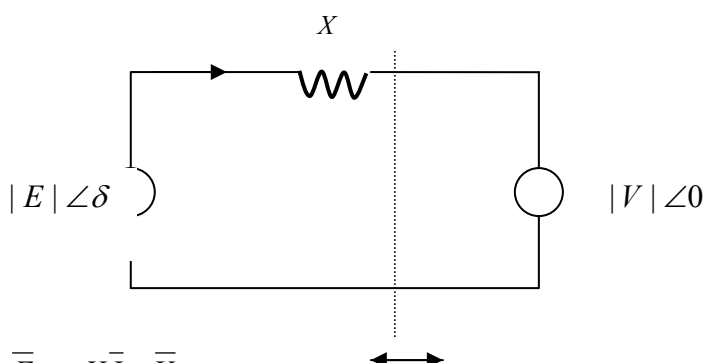


با افت ولتاژ در یک فاز اثر آن در ثانویه ترانس مشاهده شده و با تنظیم کننده ولتاژ به تحریک کننده، فرمان افزایش ولتاژ داده یا با افزایش ولتاژ در خروجی فرمان کاهش تحریک را می دهد (سیستم خودکار الکتریکی) نتیجه:

- ۱- توان مکانیکی تبدیلی به توان الکتریکی توسط شیر بخار کنترل شود (تنظیم قدرت).
- ۲- ولتاژ ترمینال ماشین توسط تنظیم کننده یا رگولاتور ولتاژ کنترل می شود (تنظیم ولتاژ).

مدل تك ماشينه

اتصال ژنراتور به شين بي نهايت:



$$\bar{E} = jX\bar{I} + \bar{V}$$

$$\bar{S} = \bar{V}\bar{I}^* = \bar{V}\left(\frac{\bar{E}}{jX}\right)^*$$

$$\begin{aligned}\bar{S} &= \frac{|E||V|}{X} \angle 90^\circ - \delta - j \frac{|V|^2}{X} \\ &= \frac{|E||V|}{X} \sin \delta + j \left(\frac{|E||V|}{X} \cos \delta - \frac{|V|^2}{X} \right) \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

توان اکتیو و راکتیو که یک ژنراتور به شبکه تحویل می دهد به صورت زیر است:

$$P = \frac{|E||V|}{X} \sin \delta \quad Q = \frac{|E||V|}{X} \cos \delta - \frac{|V|^2}{X}$$

با باز کردن هر چه بیشتر شیر اصلی توربین T_m و نهایتاً افزایش P_m می یابد. لذا T_e و P_e نیز افزایش می یابد از آنجائیکه $|E|, |V|, X$ ثابت هستند δ افزایش خواهد یافت.

$$P_m \rightarrow \langle P'_m \Rightarrow \delta_0 \rightarrow \langle \delta' \rangle$$

پس با افزودن توان از P_m به P'_m زاویه δ نیز از δ_0 به δ' افزایش خواهد یافت. برای P بایستی حدی قابل شد و این حد (P_{\max}) همان حد پایداری استاتیکی نامیده می شود که مقدار آن برابر است با:

$$P_{\max} = \frac{EV}{X} \quad \sin \delta = 1 \quad \delta = 90^\circ$$

$$\delta = \delta_c \text{ زاویه بحرانی}$$

اگر به فرض توان مکانیکی P_m از حد فوق فراتر رود ژنراتور از حالت سنکرونیزاسیون خارج می شود. برای جلوگیری از این امر در شبکه های قدرت ژنراتورها تحت زاویه کوچکی حدوداً 10° الی 20° کار می کنند. از نظر پایداری زاویه بار ژنراتور هر چقدر کمتر باشد بهتر است. اگر دومین سیستم کنترل را در نظر بگیریم (تنظیم ولتاژ) با افزایش توان راکتیو تقاضا Q_D ، چون V, X, δ ثابت فرض می شوند با افزایش تحریک ژنراتور E زیاد شده نتیجتاً Q زیاد می شود (با افزایش E ، P نیز افزایش می یابد اما چون ثابت زمان

مکانیکی را بیشتر از الکتریکی فرض کرده ایم شیر بخار و گاورنر نمی تواند به سرعت عمل کند) پس Q زیاد شده و قدرت راکتیو تحویلی به شبکه افزایش می یابد.

مثال - ژنراتور مربوط به سیستم فوق تحت شرایط نامی، ضریب قدرت 0.8 پس فاز کار می کنند $X=0.7\text{ pu}$ بر مبنای ولتاژ و قدرت نامی ژنراتور ($\cos \varphi = 0.8 \text{ lag}$)

الف - محاسبه δ, E, Q, P

ب - شیربخار را باز کنیم تا P بیشتر از 20% زیاد شود فرض الف را تکرار کنید.

ج - سیستم را به فرض الف بازگردانده و حال تحریک کننده را طوری تنظیم می کنیم که E به میزان 20% زیاد شود. مجدداً فرض الف را تکرار کنید.

$$\bar{V} = 1 \angle 0 \text{ pu}$$

$$\cos \varphi = 0.8 \quad \varphi = \arccos 0.8 = 36.9^\circ$$

$$\bar{I} = 1 \text{ pu} \angle -36.9^\circ = 0.8 - j0.6$$

$$\bar{E}_0 = jX\bar{I}_0 + \bar{V} = j0.7(0.8 - j0.6) + 1 = 1.42 + j0.56$$

$$= 1.53 \angle 21.5^\circ = \delta_0$$

$$= |E| \angle \delta_0$$

$$P_0 = \frac{E_0 V}{X} \sin \delta_0 = \frac{1.53 \times 1}{0.7} \sin 21.5^\circ = 0.8$$

$$Q_0 = \frac{E_0 V}{X} \cos \delta_0 - \frac{V^2}{X} = \frac{1.53 \times 1}{0.7} \cos 21.5^\circ - \frac{1^2}{0.7} = 0.6$$

ب- افزایش قدرت اکتیو نتیجه خواهد داد:

$$P_1 = 1.2 P_0 = 1.2(0.8 \text{ pu}) = 0.96 \text{ pu}$$

$$E_1 = E = 1.53 \text{ pu}$$

$$\sin \delta_1 = \frac{P_1 X}{E_1 V} = \frac{0.96 \times 0.7}{1.53 \times 1} \rightarrow \delta_1 = 26.1^\circ$$

افزایش δ نتیجه شده است. همچنین کاهش قدرت راکتیو نتیجه شده است:

$$Q_1 = \frac{1.53 \times 1}{0.7} \cos 26.1^\circ - \frac{1^2}{0.7} = 0.535 \text{ pu}$$

بنابراین با E ثابت، افزایش P به میزان 20% کاهش 11% در Q را به ما خواهد داد.

(ج) با فرض اینکه تغییرات E بلافاصله روی P اثر نمی گذارد. با ثابت نگه داشتن P بر روی تحریک عمل کرده و 20% درصد نیروی محرکه را افزایش می دهیم در نتیجه قدرت راکتیو را نیز افزایش داده ایم.

$$P_2 = 0.8 \quad \Delta P = 0$$

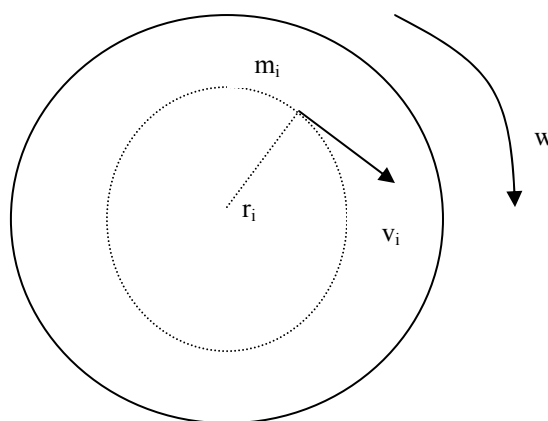
$$E_2 = 1.2 E_0 = 1.84$$

$$\delta_2 = \arcsin \frac{0.8 \times 0.7}{1.84 \times 1} = 17.8^\circ$$

$$Q_2 = \frac{1.84 \times 1}{0.7} \cos 17.8 - \frac{1^2}{0.7} = 1.07 pu$$

افزایش بیش از ۴۴ %

موقعی که ناپایداری در شبکه روی می دهد از حالت دینامیکی می گذریم. حال روتوری که با سرعت ω می چرخد با تغییراتی در شبکه، تغییرات در سرعت را خواهد داشت. باید دید این تغییرات چگونه است. جرم کوچک m_i در داخل سیلندر نیز با سرعت ω می چرخد.



$$\omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$v_i = r_i \omega = r_i \frac{d\theta}{dt}$$

$$\gamma_i = \frac{dv_i}{dt} = r_i \frac{d\omega}{dt} = r_i \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

نیروی جزیی که روی جرم اعمال می شود. $F_i = m_i \gamma_i = m_i r_i \frac{d^2\theta}{dt^2}$

کوپلی که این جرم جزیی بوجود می آورد $\Gamma_i = F_i r_i = m_i r_i^2 \frac{d^2\theta}{dt^2}$

تمامی جرمهایی که سیلندر را پر کرده و کوپل هایی که تشکیل می دهند برابر است با (n جرم جزئی):

$$\Gamma_T = \sum_{i=1}^n m_i r_i \frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{d^2\theta}{dt^2} \sum_{i=1}^n m_i' r_i^2$$

اگر $w = cte$

$$\Gamma_T = J \cdot \frac{d^2\theta}{dt^2}$$

کار جزیی که جرم جزیی انجام می دهید.

$$dw_i = F_i (r_i d\theta)$$

$$p_i = \frac{dw_i}{dt} = \frac{F_i r_i d\theta}{dt} = F_i r_i \cdot \omega$$

$$P_T = \sum P_i = \omega \sum F_i r_i = \omega \cdot \Gamma_T$$

انرژی جنبشی روتور برحسب ممان اینرسی و سرعت زاویه ای

$$[MJ]E_k = \frac{1}{2}J\omega_m^2 = \frac{1}{2}M\omega_m = \frac{1}{2}M\omega_e$$

H ثابت اینرسی ماشین سنکرون است که برابر است با نسبت انرژی جنبشی ذخیره شده در سرعت نامی به قدرت نامی ماشین. در مطالعه پایداری سیستم ها معمولاً از ثابت اینرسی ماشین ها استفاده می شود. در شرایط نامی $W_m = W_s$

$$H_n = \frac{E_{k,n}}{S_n} \left[\frac{MJ}{MVA} \right] \left[\frac{MW \sec}{MVA} \right]$$

اگر قدرت مبنای سیستم S_b با قدرت نامی ماشین متفاوت باشد $S_b H$ جایگزین $S_n H_n$ می شود

$$E_k = S_n H_n = S_b H$$

$$M = \frac{2S_b H}{\omega_s}$$

در اینجا ω_s و مقادیر زاویه ای بصورت مکانیکی هستند

$$M = \frac{S_b H}{\pi f} \left[\frac{Mj \sec}{rad} \right] = \frac{S_b H}{180 f_s} \left[\frac{MJ \sec}{deg} \right]$$

$$P_m - P_e = M\alpha = \frac{S_b H}{\pi f_s} \alpha \quad \frac{-deg}{s^2}$$

با تقسیم بر S_b بصورت پریونیت تبدیل می شود

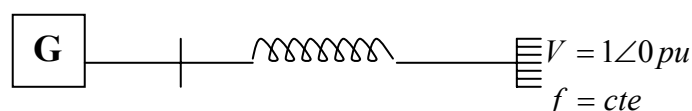
$$M' = \frac{M}{S_b} = \frac{H}{\pi f_s} \left[\frac{sec^2}{rad} \right]$$

$$P_m - P_e = M' \alpha = \frac{H}{\pi f_s} \alpha = \frac{H}{180 f_s} \left[\frac{sec^2}{deg} \right]$$

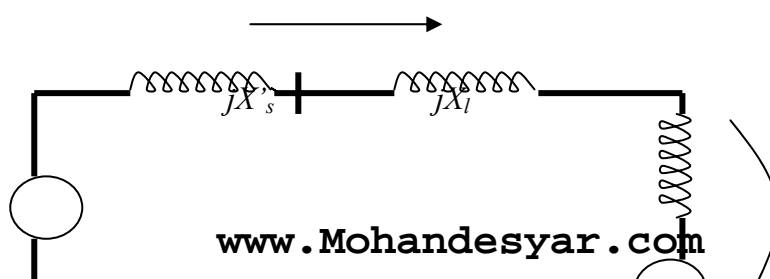
مزیت استفاده از H بجای E_k آن است که H مستقل از اندازه ماشین بوده و مقدار معمول آن در ماشین ها بین ۲ تا ۸ است.

مدل تک ماشینه

فرض می کنیم یک ژنراتور به شین بی نهایت (با ولتاژ ۱ پریونیت و فاز صفر و راکتانس X_l) وصل باشد.



در حالت اتصال کوتاه و اختلال داریم:



$$jX_s m$$

$$E_1 = |E_1| \angle \delta$$

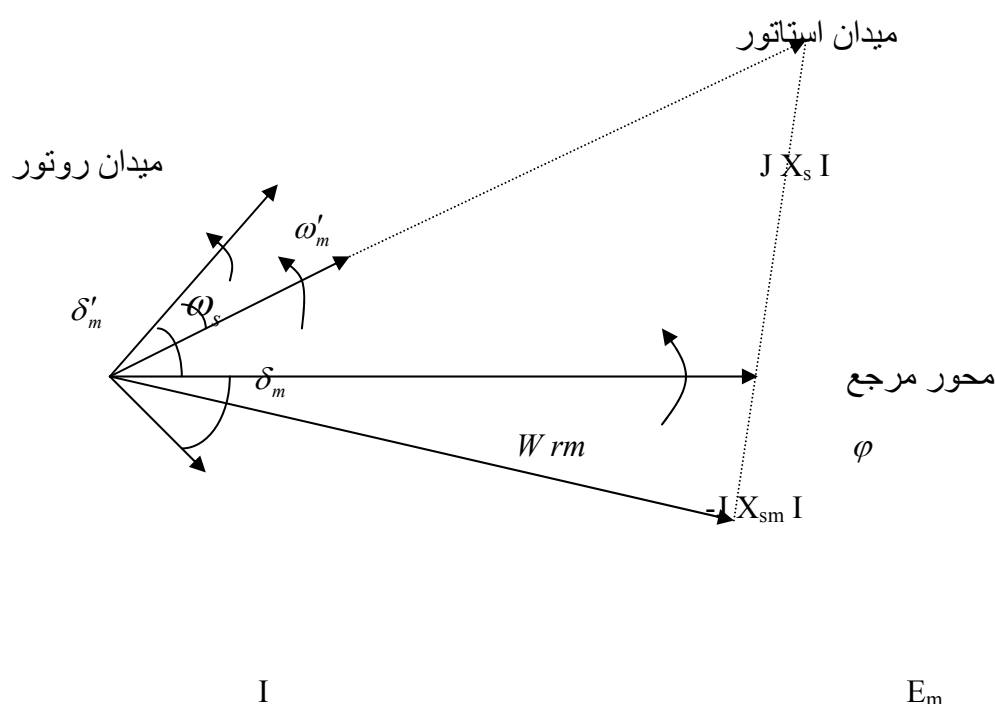
$$E_2 = |V| \angle 0$$

قدرت اکتیو تحویلی به سیستم خارجی به صورت زیر است:

$$P = \frac{E_g V}{x'_s + x_l = x}$$

با توجه به اینکه ژنراتور سنکرون است، میدان روتور با اندازه δ'_m از میدان استاتور جلوتر است در شرایط

$$\omega_m = \omega_s = \omega_{rm} \text{ عادی کار}$$



فرض کنید کوپل مکانیکی شفت موتور بیشتر بشود و اتصال کوتاهی در سیستم پیش آید در این صورت حالت استاتیکی بهم خورده و حالت دینامیکی پیش خواهد آمد. در این صورت δ یا زاویه بار تغییر خواهد کرد. با اتصال کوتاه در سیستم خارجی یک جریان سلفی خواهیم داشت که ۹۰ درجه پس فاز است (چون خط انتقال سلفی (X) است) و قدرت راکتیو به زمین را خواهیم داشت؛ لذا روتور سرعتش افزایش خواهد یافت که تغییر δ_m باعث تغییر ω_s خواهد شد. دو حالت کلی دینامیکی داریم که به صورت زیر است:

مکانیکی $\omega = P \omega_m$ الکتریکی

$$\omega_m = \omega_s + \frac{d\delta'_m}{dt}$$

$$\omega_s = \omega_{rm} + \frac{d}{dt}(\delta_m - \delta'_m) \quad \omega_{rm} = \omega_{reference\ machine}$$

$$\omega_m = \omega_{rm} + \frac{d\delta_m}{dt}$$

$$\omega = \omega_r + d\delta/dt$$

حال اگر اتصال کوتاه ۳ فاز پیش آید تمام قدرت به قدرت راکتیو تبدیل می شود ولی اگر تک فاز باشد علاوه بر قدرت راکتیو به زمین، قدرت اکتیو هم به شبکه داده می شود.

$$P_m - P_e = P_a$$

توان شتاب دهنده برابر است با توان مکانیکی روی شفت موتور منهای توان الکتریکی داده شده به شبکه در طول اختلال

با توجه به اینکه موتور یک اینرسی دارد و نمی تواند زاویه بار خود را دفعاً تغییر دهد باید بتدریج اینکار صورت گیرد و این عمل بوسیله توان Pa صورت می گیرد.

$$P_a = \omega_m T_a = \omega_m J \alpha$$

$$\text{Accelerating Power} = P_a [\text{MW}] \text{ or } [\text{MJsec/rad}_{\text{elect}}]$$

$$\alpha [\text{rad}_{\text{elect}}/\text{sec}^2]$$

$$J [\text{MJsec}^2/\text{rad}^2 \text{ elec or mech}] \text{ or}$$

ممان اینرسی ماشین

$$[\text{Kgm}^2]$$

$$= M [\text{MJsec/rad elec or mech}] \quad \text{ممنتم زاویه ای ماشین (اندازه حرکت زاویه ای ماشین)}$$

$$\omega_m J$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J \frac{d\omega}{dt} + \text{اصطکاک}$$

$$P_a = \omega_m T_m - \omega_m T_e = \omega_m \left\{ \begin{matrix} \text{mech} \\ \text{elect} \end{matrix} \right\} J \left\{ \begin{matrix} \text{mech} \\ \text{elect} \end{matrix} \right\} \frac{d\omega}{dt} \left\{ \begin{matrix} \text{elect} \\ \text{elect} \end{matrix} \right\} + \text{اصطکاک}$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J \frac{d}{dt} \left(\omega_r + \frac{d\delta}{dt} \right) \quad \omega_r = \omega_{\text{reference}} \quad \omega_{re} = \omega_{\text{reference electrical}} = \omega_s$$

$$P_a = P_m - P_e = \omega_m J \left(d \frac{\omega_r}{dt} + \frac{d^2 \delta}{dt^2} \right)$$

و با فرض صفر بودن اصطکاک و ثابت بودن ω_r داریم:

معادله نوسان ماشین سنکرون

$$P_a = P_m - P_e = M \left(\frac{d^2 \delta}{dt^2} \right) = M \left(\frac{d\omega}{dt} \right) = M\alpha$$

$$P_a = P_m - P_e = M\alpha$$

$$P_a = P_m - \frac{EV}{X} \sin \delta = M \frac{d\omega}{dt}$$

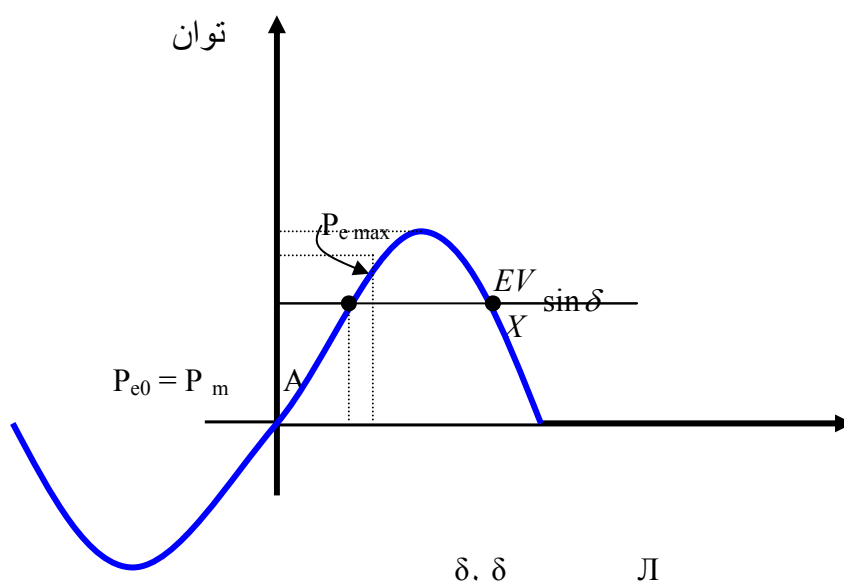
$$P_a = P_m [\text{pu}] - \frac{EV}{X} \sin \delta_{\text{elect}} = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Rightarrow \delta(t)$$

با حل معادله دیفرانسیل فوق می توان δ را بر حسب زمان رسم نمود و پس از این مورد کار ساده است. چون می خواستیم ببینیم δ_m تغییراتش با زمان چگونه است و آیا حالت دینامیکی یا گذرا است و پاسخ به چه صورتی است و در حالت کلی مسئله پایداری به این صورت حل می شود.

فرض می کنیم که ژنراتوری طبق رابطه زیر به شبکه ای قدرتی را تحویل می دهد.

$$P_m = P_e = \frac{EV}{x} \sin \delta$$

این رابطه فقط در حالت استاتیکی صدق می کند. چون ω ثابت است پس $\omega = \frac{d\omega}{dt}$



مثال - يك توربور ژنراتور چهار قطبي، با فرکانس ۵۰ هرتز، توان نامي MVA ۲۰ و ولتاژ نامي kv ۱۱ داراي ثابت اينرسي ماشين برابر $H=9 \text{ Mw.S/MVA}$ است. هر گاه قدرت ورودي مكانيكي با در نظر گرفتن تلفات برابر ۲۶۸۰۰ hp و قدرت الكتريكي MV ۱۶ باشد مقدار شتاب روتور را بدست آوريد.

$$P_M = 26800 \times 746 \times 10^{-6} = 19.99 \text{ MW}$$

$$P_e = 16 \text{ MW}$$

$$P_a = P_M - P_e = 19.99 - 16 = 3.99 \text{ MW}$$

$$S = 20 \text{ MVA}, H = 9 \text{ S}$$

$$M = \frac{SH}{\pi f} = \frac{20 \text{ M} \times 9}{\pi \cdot 50} = 1.146 \text{ Mws}^2 / \text{rad}(\text{elect})$$

$$P_a = M \frac{d^2 \delta}{dt^2} \Rightarrow 1.146 \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 3.99$$

$$\alpha = \frac{d^2 \delta}{dt^2} = 3.48 \quad \text{rad}(\text{elect}) / \text{s}^2 = 199.5 \text{ deg}(\text{elect}) / \text{s}^2$$

ادامه فصل پنجم

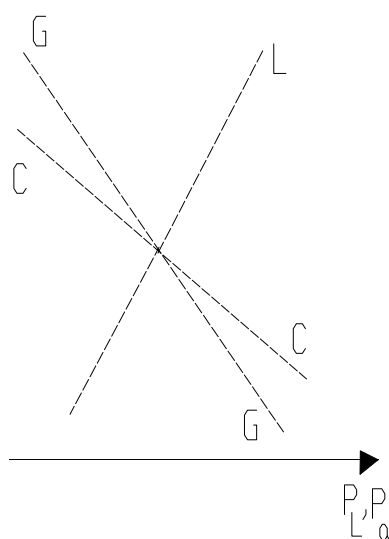
کنترل توان اکتیو و فرکانس

Active Power & Frequency Control

Interconnected Tie line system

بهره‌برداري سیستم‌هاي به هم پیوسته

اگر به دلایلی بار سیستم تغییر یابد مشخصات بار سیستم پارالل با مشخصات قبلی خواهد بود که موجب کاهش فرکانس خواهد شد. برای آنکه سیستم را در همان فرکانس قبلی بکار ببریم باید مشخصات G را پارالل با حالت قبلی تغییر دهیم در این حالت مشخصات سیستم نیز پارالل تغییر خواهد کرد.



$$P_{G1} - P_{load} = P_{G0} + 10\beta_1(f_{act} - f_0) - 10\beta_2(f_{act} - f_0) - P_{L0}$$

این برای يك واحد است.

حال اگر در بار تقاضا به اندازه dp_L تغییر حاصل شود. با افزایش dp_G سعی می‌شود این تغییرات به صفر رسد حال اگر با تغییرات در تولید نتوان در تغییرات بار تقاضا را به صفر رساند در آن صورت به اندازه dp در سیستم نامتعادلی به وجود می‌آید.

$$-dP = dP_D - dP_G = dP_D \pm dP_{tie} \quad (+ \text{exit from region}) (-\text{enter to region})$$

$$-\frac{dP}{df} = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df} \left[\frac{\text{MW}}{\text{Hz}} \right]$$

این نسبت Stiffness یا سفتی نامیده می‌شود. اگر به اندازه ۱۰٪ در تغییرات بار داشته باشیم به اندازه ۱٪ تغییرات در فرکانس باشد سیستم نرمال است.

$$\frac{dP_G}{df} \text{ به وسیله منحنی } GG' \text{ یا } G'G' \text{ بدست می‌آید}$$

$$\frac{dP_D}{df} \text{ به وسیله منحنی } LL' \text{ یا } L'L' \text{ بدست می‌آید}$$

پس داریم:

$$dP = dP_G - dP_D \quad K = -\frac{dP}{df} \rightarrow df = -\frac{dP}{K}$$

df بخاطر افت فرکانس در اثر نامتعادلی می‌باشد.

دو ناحیه را به صورت پیوسته به هم در نظر بگیریم و تحت این شرایط بایستی نواحی و علت بهم پیوسته بودن را اشاره کنیم. هر ناحیه از واحد تولیدی و بارهای مخصوص بخود تشکیل می‌شود.

$$A_{KA} \text{ tie line } dp \quad dp_D \quad B \quad dp_G \quad K_B$$

$$dp_{tie}$$

$$dp_{AB}$$

$$dp_{12}$$

هر ناحیه بایستی Reserve مخصوص بخود داشته باشد توسط خط مشترك این دو سیستم به صورت بهم پیوسته مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند این می‌تواند اطمینان سیستم را بالا ببرد. سیستم قوی می‌شود انرژی KE ذخیره شده در سیستم افزایش می‌یابد برای تغییرات جز بار فرکانس بدان صورت تغییرات ندارد. هر چه سیستم بزرگ باشد بر سیستم بی‌نهایت بیشتر نزدیک می‌شویم سیستم‌ها به صورت پیوسته بهم مورد مصرف قرار می‌گیرند.

ظرفیت انتقال این خط نسبت به ظرفیت انتقال هر کدام از نواحی کمتر است.

توان از ناحیه خارج شود + توان به ناحیه داده شود-

در ناحیه B به اندازه dP_D تغییراتی در بار مصرفی بطور ناگهانی رخ می‌دهد. ابتدا خود ناحیه این مقدار تغییرات ناگهانی بار را تامین می‌کند. حال اگر خودش نتواند این ناحیه باندازه dP نامتعادلی دارد که می‌تواند از A کمک بگیرد چون این دو ناحیه بصورت بهم پیوسته مورد بهره‌برداری هستند دارای فرکانس مشخص هستند اگر این ناحیه به اندازه dP کمبود داشته باشد بایستی قدرت از A بگیرد.

تغییرات در قدرت ارسالی dP_{tie} (از A بر B) وقتی از ناحیه خارج می‌شود + و وقتی به ناحیه وارد می‌شود - است این dP_{tie} که از ناحیه A گرفته شود و به B وارد بشود - است.

$$df_B = -\left(\frac{dP_D - \Delta(dP_{tie})}{K_B}\right) = -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A} = df_A \quad \text{تغییرات فرکانس}$$

چون توان از ناحیه A به سمت ناحیه B است پس در ناحیه A توان تبدیلی بصورت $dP_{tie} +$ و در ناحیه B بصورت $dP_{tie} -$ می باشد.

اگر ناحیه ضریب سفتی هر ناحیه و نامتعادلی ناحیه B در دست باشد مقدار قدرت ارسالی tie line را بدست آورده و فرکانس جدید سیستم را بدست می آوریم.

$$dP_{tie} = \left(\frac{K_A}{K_A + K_B}\right)dP \Rightarrow f$$

در دو ناحیه متصل و بهم پیوسته داریم. $df_A = df_B$

مثال - دو سیستم بهم پیوسته قدرت که دارای فرکانس 50Hz می‌باشد بوسیله B و A مشخص شده‌اند و به ترتیب دارای ضریب سفتی (stiffness) $500 \frac{MW}{HZ}$, $750 \frac{MW}{HZ}$ می‌باشند که به وسیله tie line بهم پیوسته‌اند اگر بار سیستم B بطور ناگهانی 300MW افزایش یابد: الف - مقدار قدرت انتقالی از tie line به فرکانس جدید بهم پیوسته را پیدا کنید

حل - چون دو ناحیه بهم پیوسته هستند، با وجود تغییرات بار در ناحیه B، توان انتقالی از ناحیه A خارج و به ناحیه B وارد می‌شود و برای این دو ناحیه به هم پیوسته $\Delta f_A = \Delta f_B$.

$$\begin{aligned} -\frac{(dP - dP_{tie})}{K_B} &= -\frac{(0 + dP_{tie})}{K_A} \\ -\frac{300 - dP_{tie}}{500} &= -\frac{dP_{tie}}{750} \rightarrow dP_{tie} = 180MW \\ \Delta f_A &= \frac{0 + \Delta P_{tie}}{K_A} = \frac{180}{750} = 0.24Hz \end{aligned}$$

$$\Delta f_B = \frac{\Delta P - \Delta P_{tie}}{K_B} = \frac{300 - 180}{500} = 0.24 \text{ Hz}$$

$$f_{act} = f_0 - \Delta f = 50 - 0.24 = 49.76 \text{ Hz}$$

هر دو سیستم در فرکانس مشترک f در حال کار هستند.

هر گاه خط ارتباطی tie بین دو سیستم قطع شود. فرکانس هر کدام از سیستمها به صورت زیر خواهد بود:

$$f_A = f + \frac{dP_{tie}}{K_A} \quad \text{افزایش فرکانس به خاطر افزایش تولید توان در ناحیه A}$$

$$f_B = f - \frac{dp_{tie}}{K_B} \quad \text{کاهش فرکانس به خاطر کاهش تولید توان در ناحیه B}$$

$$\frac{dP_{tie}}{f_A - f_B} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \quad \text{در این صورت}$$

$$dP_{tie} = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} (f_A - f_B) = \frac{K_A K_B}{K_A + K_B} \Delta f_{AB}$$

بنابراین با قطع خط ارتباطی و اندازه‌گیری فرکانسهای f_A و f_B مرتبط به هر ناحیه مقادیر ضرایب سفتی K_A و K_B بر ناحیه محاسبه می‌شود.

ب- در قسمت بعد فرض می‌شود که این دو ناحیه بصورت بهم پیوسته کار می‌کنند و فرکانس سیستم f است حال اگر بطور ناگهانی این tie line باز می‌شود حال باید دید فرکانس هر ناحیه چقدر می‌شود.

$$f_A = f + \frac{\Delta P_{tie}}{K_A} = 49.76 + \frac{180}{750} = 50 \text{ Hz}$$

$$f_B = f - \frac{\Delta P_{tie}}{K_B} = 49.76 + \frac{180}{500} = 49.4 \text{ Hz}$$

$$K = \frac{dP_D}{df} - \frac{dP_G}{df}$$

تأثیر مشخصه فرکانس بروی بار مصرفی را اندازه گیری می کند

$\frac{dP_D}{df}$ ظرفیت توان توربین متصل به شبکه توان خروجی از ژنراتورها

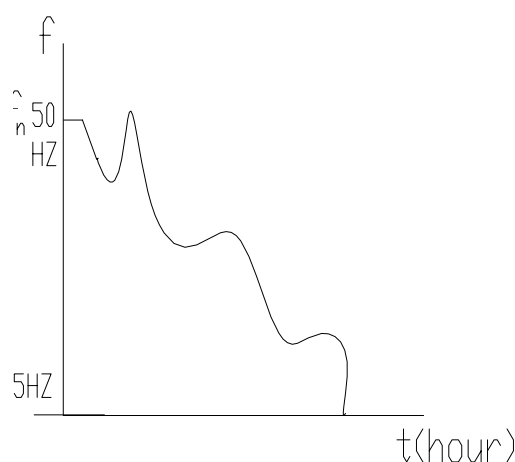
با صرف نظر کردن از تلفات، در شرایط ماندگار SS دوباره $P_D = P_G$

بنابراین $K = K_1 P_T - K_2 P_L$

در اینجا برای هر شبکه مقدار K بصورت آزمایشی و در رنج قدرت مناسبی (حداقل و حداکثر قدرت انتقالی) برای دو سیستم مجزای بزرگ که توسط یک لینک بهم متصل شده اند مشخص می شود. در این آزمایش اتصال بین دو سیستم قطع شده تغییرات فرکانس اندازه گیری می شود.

در سیستمهای کوچک تغییرات بار باعث بوجود آمدن تغییرات زیاد در فرکانس می شوند بنابراین در اینگونه سیستمها لازم است گاورنرهای الکتریکی مشخصه بار - فرکانس را بهبود بخشند.

ناشی از تغییرات بار شدید در سیستم شامل صاعقه، ممکن است این سیستم اصلی قطع شود در آن صورت تولید داخلی سیستم جوابگوی مصرف داخلی نبوده و فرکانس بشدت افت می کند.



مدل سازي خط رابط بين دو ناحيه ۱ و ۲

در کارکرد عادي شبکه، توان عبوري از خط رابط توان عبوري از ۱ به ۲ مثبت است.

$$P_{12}^0 = \frac{|V_1^0| |V_2^0|}{X} \sin(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

$$\bar{V}_1 = |V_1^0| < \delta_1^0$$

ولتاژ ابتدای خط رابط

$$\bar{V}_2 = |V_2^0| < \delta_2^0$$

تغییرات توان خط رابط به ازای تغییرات بسیار کوچک δ_1 و δ_2

$$\delta_1 = \delta_1^0 + \Delta\delta_1, \quad \delta_2 = \delta_2^0 + \Delta\delta_2$$

$$\Delta P_{12} \approx \frac{|V_1^0| |V_2^0|}{X} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2)$$

ضریب هم گاهی = ضریب سنکرونیزه کننده

$$T_{12}^0 \triangleq \frac{|V_1^0| |V_2^0|}{X} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0)$$

رابطه تغییرات فرکانس با تغییرات زاویه بار

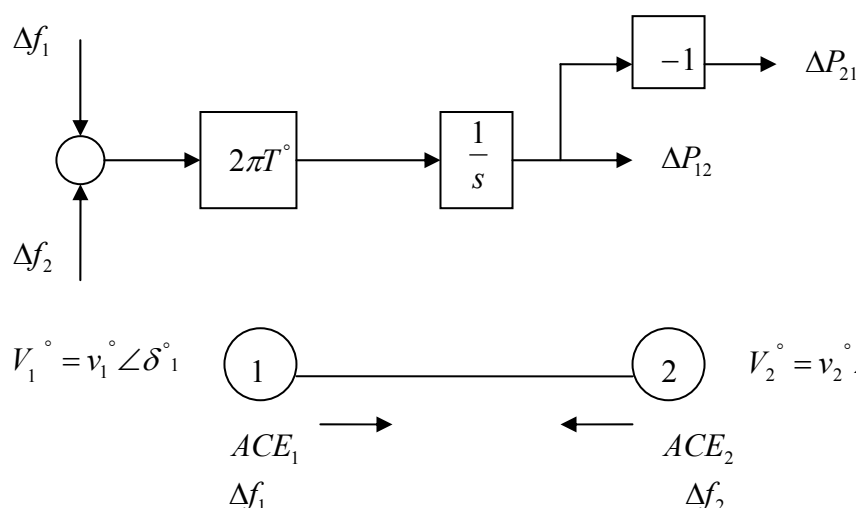
$$\omega = 2\pi f \Rightarrow \Delta\omega = 2\pi\Delta f \Rightarrow \begin{cases} \Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}(\Delta\delta) \Rightarrow \Delta\delta = 2\pi \int \Delta f dt \\ \Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt}(\delta_0 + \Delta\delta) \end{cases}$$

$$\Delta P_{12} \approx 2\pi T_{12}^0 (\int \Delta f_1 dt - \int \Delta f_2 dt)$$

$$\Delta P_{12}(s) = \frac{2\pi T_{12}^0}{s} (\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s))$$

$$\Delta P_{12} + \Delta P_{21} = \Delta P_{LOSS} \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta P_{21} = -\Delta P_{12}$$

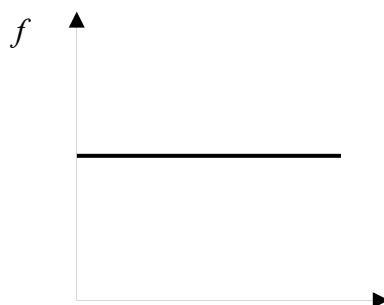
نمایش مدل خطي دو ناحیه با یک خط رابط Tie Line



انواع بهره‌برداري از سيستم‌هاي بهم پيوسته

۱- در اين حالت سيستم‌ها طوري بهره‌برداري مي‌شوند كه تكتك سيستم‌ها فقط فرکانس خود را كنترل مي‌كنند.

Flat frequency control (infinite Bias)



۲- هر سيستم قدرت tie line را بدون توجه به فرکانس سيستم كنترل مي‌كند. هر ناحيه سعي دارد مقدار قدرت لازم براي فرستادن به نواحي ديگر را بدون توجه به فرکانس تهيه كند.

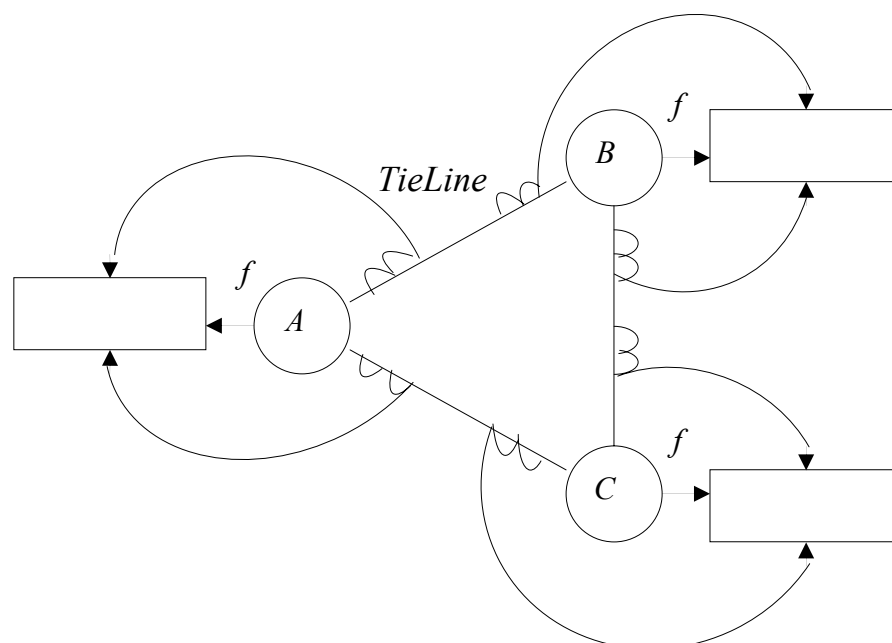
Flat tie line control (zero bias)



۳- هيچ كدام از اين كنترل‌ها براي بهره‌برداري مناسب نيستند.

Tie Line with frequency Bias

براي ۳ ناحيه بهم پيوسته هر ناحيه بايستي قدرت فرستاده شده از tie line را اندازه‌گيري کرده و به سيستم مقايسه كننده بدهد تا قدرت انتقالی از يك ناحيه بر ناحيه مقايسه مي‌شود، قدرتي كه بايستي دريافت مي‌شد و در اينجا يك Tie Line error داريم و همچنين فرکانس بايستي به يك مقايسه كننده داده شود تا خطاي فرکانس نيز مشخص شود.



B یا قبلي عبارت است از :

$$\begin{cases} ACE = (P_0 - P_{act}) - 10\beta(f_0 - f_{act}) \\ ACE = \Delta P_{AB} + K_A \Delta f \end{cases}$$

و مقداري منفي است.

$$\beta : \text{Area Bias} \frac{\text{MW}}{0.1\text{Hz}}$$

ACE : Area Control Error

P_0 , f : Programmed Power and Frequency

P_{act} , f_{act} : Actual Power and Frequency

براي نواح ديگر نيز همچون کاري بايستي انجام شود.

مثال - در دو سيستم بهم پيوسته A و B تبادل خالص قدرت براساس برنامه ريزي قبلي 200MW در سيستم A و B مي باشد اگر مقدار حقيقي تبادل از سيستم A و B 150MW و فرکانس 50HZ و فرکانس حقيقي 50.05HZ در منطقه B باشد خطاي کنترل منطقه B را پيدا کنيد.

$$\frac{-50\text{MW}}{0.1\text{HZ}} \text{ مقدار باياس برابر است با}$$

$$ACB_B = (-200 - (-150)) - 10(-50)(50 - 50.05) = -75\text{MW}$$

اين نشانگر اين است که چون اين خطاي منطقه منفي است پس در ناحيه B بيش از مورد نياز قدرت وجود دارد و لازم است قدرت ناحيه B به اندازه 75MW پائين آورده شود.

کنترل بایاس فرکانس سیستم دوناحیه‌ای Frequency Control

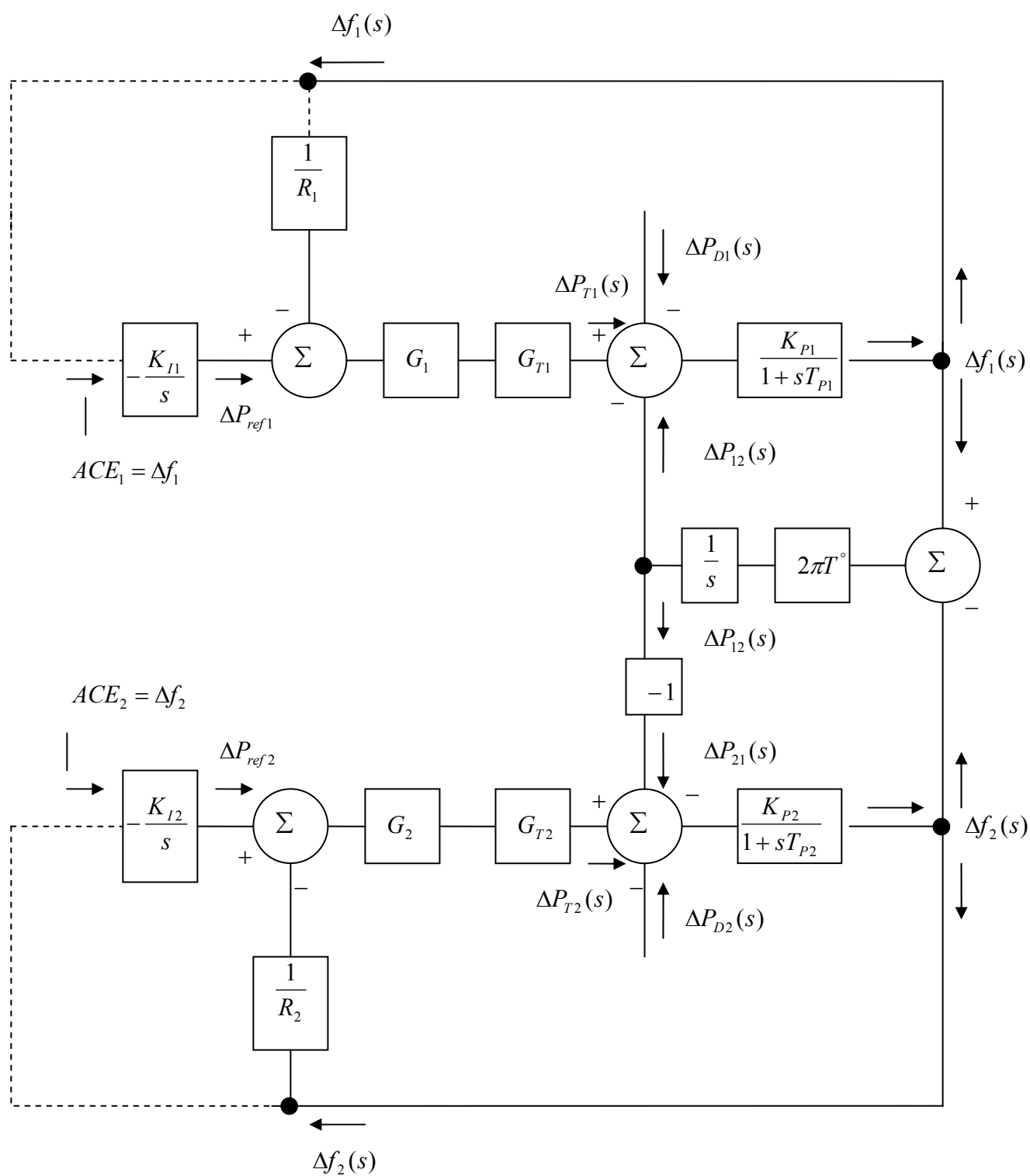
در کنترل انتگرالی یا کنترل کامل سیستم کنترل بار - فرکانس حلقه بسته با مطالعه منحنی‌های پاسخ در می‌یابیم که برای بازگرداندن فرکانس به مقدار اولیه خود باید نوعی کنترل کننده انتگرالی باز نشاننده به سیستم دو ناحیه‌ای مورد بحث افزوده شود. خطای ایستای فرکانس بطور دیرپا، به همان دلیلی که برای حالت تک ناحیه‌ای گفته شد، در اینجا نیز غیرقابل تحمل است. همچنین، یک خطای ایستای دیرپا یا شارش توان خط رابط - یا به عبارت دیگر «مبادله سهوی» به معنی پشتیبانی دائمی یک ناحیه بوسیله ناحیه دیگر است. یکی از اصول اساسی همیاری آن است که هر ناحیه باید قادر به تامین بار خود باشد.

در طی سالهای گذشته روش‌های گوناگون کنترل انتگرالی در مورد سیستم‌های چند ناحیه‌ای آزمایش شده‌اند و پیوسته جای خود را به روش‌های جدیدتری داده‌اند. برای مثال، در سیستم دو ناحیه‌ای مورد بحث می‌توانستیم فرض کنیم که ناحیه ۱ عهده‌دار بازگرداندن فرکانس به مقدار اولیه باشد و ناحیه ۲ شارش توان خط ارتباط را کنترل کند. در این صورت خطای کنترل ناحیه‌ها به صورت زیر می‌بودند:

$$ACE_1 \triangleq \Delta f_1$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta f_2$$

این خطاها (ACE) ها از طریق انتگرال‌گیرهای کند به تغییر دهنده‌های سرعت مربوطه وارد می‌شدند. چنین طرحی ممکن است عملی باشد ولی کارکرد خوبی نخواهد داشت. در واقع در سالهای اولیه هم یاری بین ناحیه‌ها، یک ناحیه عهده‌دار تنظیم فرکانس سیستم و وظیفه ناحیه‌های دیگر آن بود که هر یک «مبادلات خالص توان» خود را در حد صفر نگه دارند. مشکل این طرح آن بود که ناحیه مرکزی مسئول کنترل فرکانس سعی در تنظیم فرکانس هر ناحیه داشت در حالی که خود آن ناحیه‌ها در حال تنظیم مبادلات توان با نواحی دیگر بودند. در نتیجه نوسان گسترده‌ای در محدوده‌های توان تولیدی ناحیه مرکزی به چشم می‌خورد. در نتیجه تحقیقات اولیه‌ای که توسط کوهن صورت گرفت، استاندارد برای کنترل سیستم بنام «کنترل بایاس خط رابط» ارائه شد و بر این اصل استوار است که تمامی اعضای همیاری افزون بر کنترل مبادله خالص خود، بایستی در کنترل فرکانس نیز مشارکت داشته باشند.



کنترل بایاس توان خط رابط و فرکانس در سیستم دو ناحیه‌ای Tie Line with Frequency Bias

به منظور اعمال کنترل بایاس خط رابط به سیستم دوناحیه‌ای، در شکل زیر حلقه‌های خط چین را به نمودار قبلی می‌افزاییم. در این حالت خطای کنترل هر ناحیه به صورت یک ترکیب خطی فرکانس و خط رابط خواهد بود:

$$ACE_1 \triangleq \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1 \rightarrow 0$$

$$ACE_2 \triangleq \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2 \rightarrow 0$$

در این صورت خروجی‌های تغییر دهنده‌های سرعت نیز به صورت زیر خواهند بود:

$$\Delta P_{ref,1} = -K_{11} \int (\Delta P_{12} + B_1 \Delta F_1) dt$$

$$\Delta P_{ref,2} = -K_{12} \int (\Delta P_{21} + B_2 \Delta F_2) dt$$

ثابت‌های K_{11} و K_{12} بهره‌های انتگرال‌گیرها هستند و ثابت‌های B_1 و B_2 پرامترهای بایاس فرکانس می‌باشند. علامت منفی بدان خاطر است که اگر در هر ناحیه هر کدام از کمیت‌های خطای فرکانس و یا نمی‌توان خط رابط منفی شوند، باید به میزان تولید آن ناحیه افزوده شود.

پاسخ ایستای سیستم

بنابه دلائلی که در زیر خواهد آمد، راهبرد کنترلی بالا انحرافات حالت دائم فرکانس و توان خط رابط را حذف خواهد کرد.

به دنبال تغییر پله‌ای بار در هر ناحیه، تنها هنگامی تعادل ایستای جدید – اگر چنین تعادلی وجود داشته باشد - حاصل خواهد شد که خروجی تغییر دهنده‌ای سرعت به مقادیر ثابتی رسیده باشند. ولی این شرط لازم می‌دارد که انتگرال‌دهای معادله صفر باشند، یعنی

$$\Delta P_{12,0} + B_1 \Delta f_0 = 0$$

$$\Delta P_{21,0} + B_2 \Delta f_0 = 0$$

$$\Delta f_1^0 = \Delta f_2^0 = \Delta f^0$$

$$\Delta P_{21} = -\Delta P_{12} MW$$

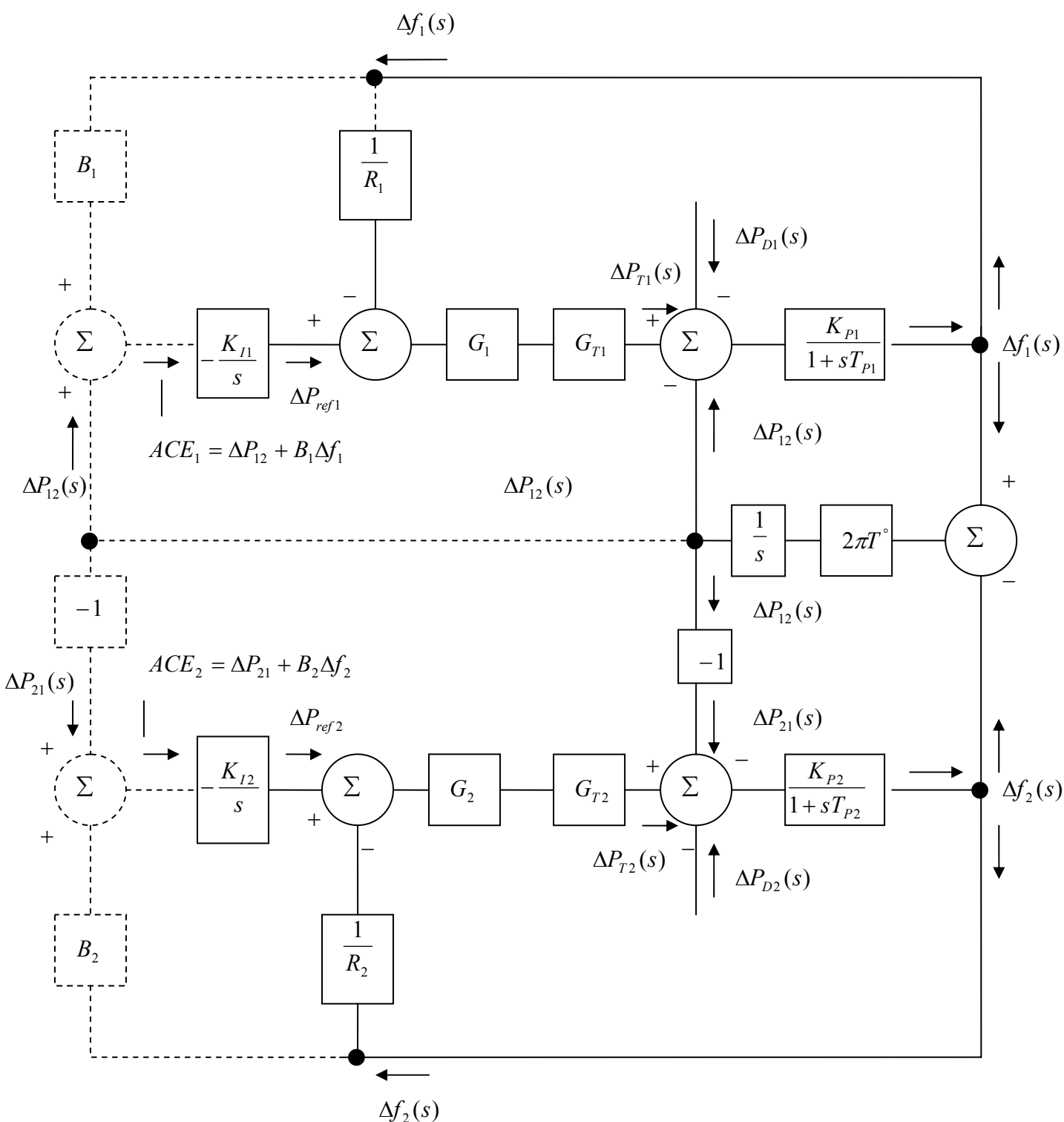
$$(\Delta P_{loss} = 0)$$

از دید معادله، این شرایط تنها وقتی برقرار خواهند بود که:

$$(B_1 + B_2) \Delta f^0 = 0 \rightarrow \Delta f_0 = \Delta P_{12,0} = \Delta P_{21,0} = 0$$

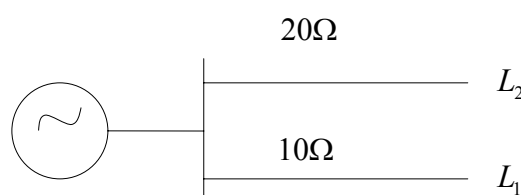
کنترل بایاس توان خط رابط و فرکانس در سیستم‌های چند ناحیه‌ای

$$ACE_i = \sum \Delta P_{ij} + B_i \Delta f_i$$

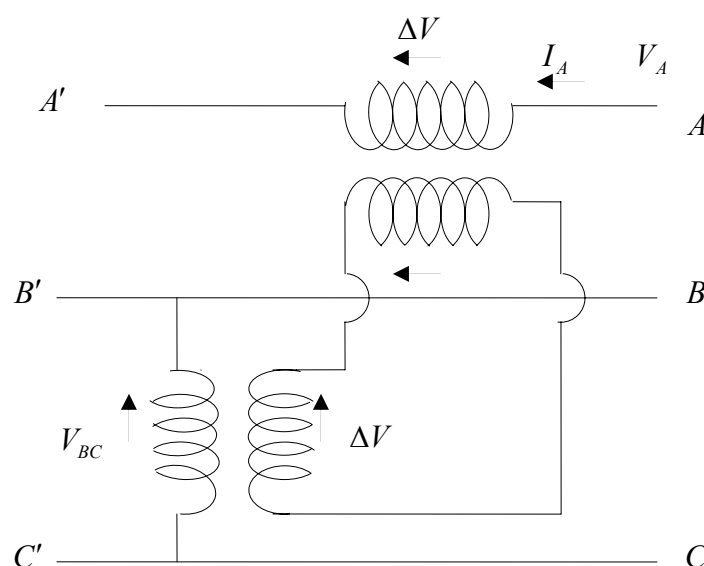


کنترل قدرت به وسیله ترانسفورماتورهای شیفیت فاز

وقتی قدرتی از طریق دو خط موازی هم عبور دهیم مقدار قدرت به اندازه عکس امپدانس‌ها تقسیم می‌شود A_2 قدرت کمتری نسبت به L_1 انتقال می‌دهد و امکان این که خط L_1 زودتر Overload بشود بیشتر است.

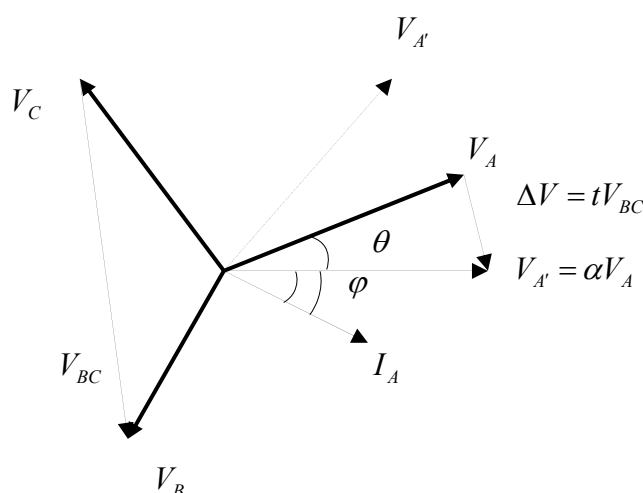


با استفاده از خازنهای سری می‌توان راکتانس خط را پائین آورد. راه حل دیگر استفاده از ترانسفورماتورهای شیفیت فاز است (برای پایین آوردن Overload خط) سیستم تحریک این ترانسفورماتور موازی با دو فاز دیگر است تا بتواند از دو فاز دیگر تحریک شود.



$$V_{A'N} = V_{AN} + \Delta V = V_{AN} + tV_{BC} = (1 - j\sqrt{3}t)V_{AN} = \alpha V_{AN}$$

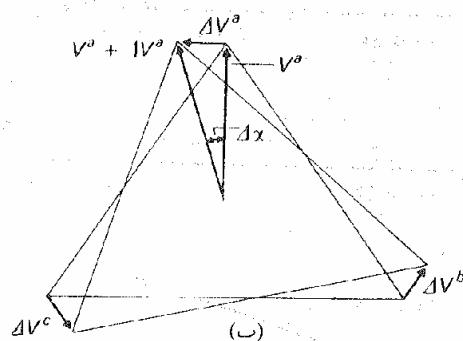
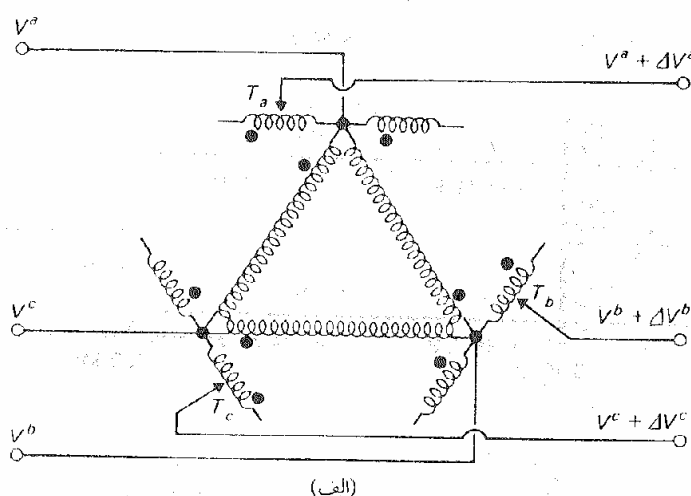
$V_{A'}$ و V_A از لحاظ مقدار تقریباً باهم برابر هستند فقط $V_{A'}$ شیفیت فاز داده شده است. این کار عیناً برای دو فاز دیگر نیز بایستی تکرار شود.



پس به وسیله این ترانسفورماتورها می‌توان در فازها تغییر طولی نداد و فقط تغییر عرضی (تغییر شیفت فاز) داد پس در خطی که می‌خواهیم قدرت انتقال بیشتری داشته باشیم اختلاف فازی بیشتری نسبت به دو فاز به وجود می‌آید، پس برای کنترل جریان اکتیو در بای‌ها می‌توان از ترانس فاز شیفت استفاده کرد. هر چقدر در يك خط اختلاف فاز V و I را کمتر کنیم P بیشتری از آن خط می‌گذرد.

$$P = VI \cos \varphi$$

در نوع دیگری از ترانسفورماتور شیفت فاز، سیم پیچ سری هر فاز به وسیله سیم‌پیچ تحریک متصل به دوفاز دیگر تحریک می‌شود.



ترانسفورماتور تنظیم زاویه فاز ولتاژ

$$\Delta V_{an} = \begin{cases} 0 \\ 180^\circ \parallel V_{bc} \end{cases}$$

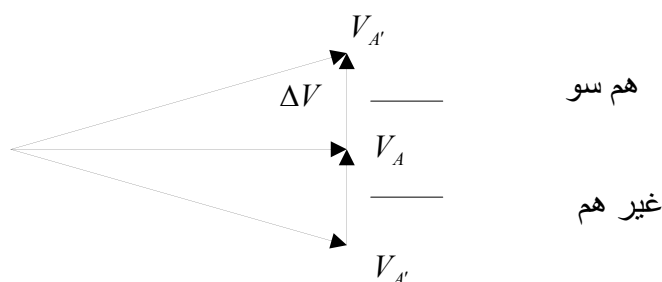
اگر سیم پیچ سری با سیم پیچ تحریک هم سو باشد ΔV به صورت تقدم فاز نسبت به ولتاژ خودش خواهد بود.

$$|V_A| \cong |V_{A'}| \quad |V_C| \cong |V_{C'}|$$

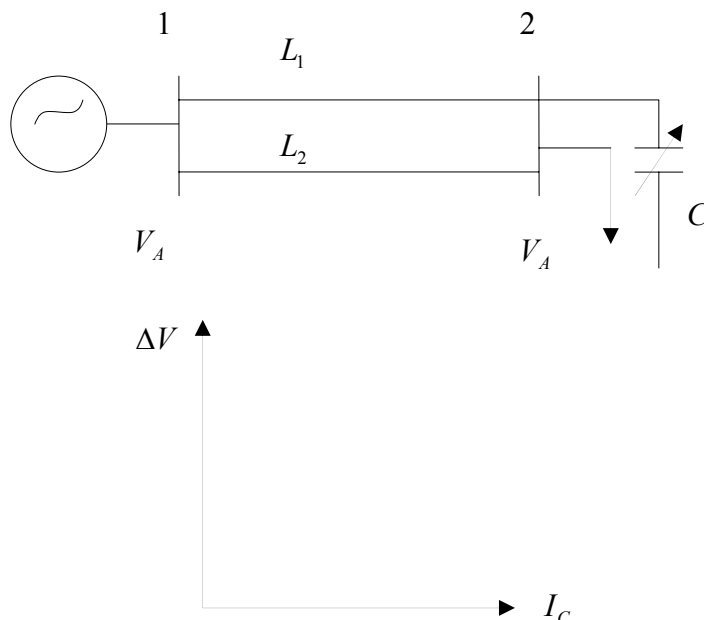
$$|V_B| \cong |V_{B'}|$$

تقدم فاز اگر سیم پیچ سری با سیم پیچ تحریک غیر هم سو باشد ΔV نسبت به فاز 90° اختلاف فاز داشته و 90° تاخیر فاز دارد.

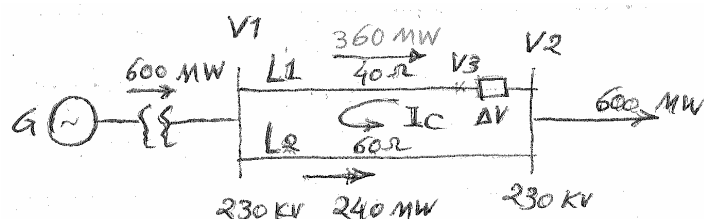
تقدم فاز یا تاخیر فاز بودن ΔV بستگی به هم سو یا غیر هم سو بودن سیم پیچ سری با سیم پیچ تحریک دارد. پس در این سیستم $|V|$ تقریباً ثابت می ماند $|V_A| \cong |V_{A'}|$ و اختلاف فاز ایجاد می شود که در سیستم پارالل که می خواستیم قدرت بیشتری به وسیله خط انتقال دهیم اختلاف فاز بیشتری بین دو باست برای آن خط را بیشتر کرده و جریان اکتیو خط را بالا ببرد.



کنترل ولتاژ و ضریب قدرت (و فرکانس) در مصرف کننده ها و خطوط انتقال با تزریق قدرت راکتیو نیز انجام می شود. این کار با تزریق قدرت راکتیو در حالت پس فاز و پیش فاز امکان پذیر می باشد. در متیج این عمل سطوح ولتاژ بالا یا پائین رفته و ضریب قدرت اصلاح می گردد.



مثال - در شکل زیر دو خط انتقال 230kv موازي 600MW قدرت را از باس نیروگاه 1 به باس 2 که باس بار است انتقال مي دهد خط L_1 داراي راکتانس $40 \frac{\Omega}{\text{phase}}$ و خط L_2 داراي راکتانس $60 \frac{\Omega}{\text{phase}}$ مي باشد به وسيله کنترل ژنراتور باس 1 روي 230kv نگه داشته مي شود و يك خازن متغير به باس بار 2 وصل شده براي ثابت نگه داشتن قدر مطلق باس شماره 2 به 230kv به وسيله نصب ترانس تنظيم کننده زاويه فاز به خط L_1 در باس 2 مي خواهيم قدرت بين L_1 و L_2 را به طور مساوي انتقال يابد پيدا كنيد. همچنين زاويه فاز جديد ولتاژهاي شين هاي 1 و 2 را محاسبه نماييد.



حل تقريبي

$$p = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta \quad |V_1| \approx |V_2|$$

$$p_1 = \frac{230^2}{40} \sin \delta$$

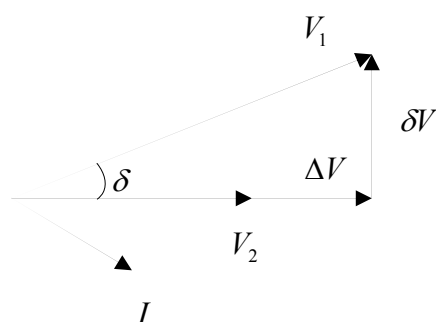
$$|V_1||V_2|$$

$$p_2 = \frac{230^2}{60} \sin \delta \quad p_1 + p_2 = 600 \quad \delta = 15.796^\circ \quad \begin{cases} p_1 = 360 \text{ MW} \\ p_2 = 240 \text{ MW} \end{cases} \quad \Delta p_{3\phi} = 60 \text{ MW}$$

$$p_1 = 300 = \frac{230^2}{40} \sin(\delta - \alpha) \quad |V_2| \approx |V_3|$$

$$p_2 = 300 = \frac{230^2}{60} \sin(\delta)$$

$$\delta = 19.893^\circ, \alpha = 6.78^\circ$$



پس قدرتهای راکتیو برای حالت ۲ و یا حالت قبل می‌شود پیدا کرد.
 ترانس بایستی یک شدت جریان دورانی در حلقه ایجاد کند و از شدت جریان مولفه اکتیو ۱ بکاهد (به اندازه $\Delta P_{3\phi}$)
 هم جهت با شدت جریان ۲ باشد شدت جریان I_c هم فاز V_2 و 90° اختلاف با ΔV دارد (چون جریان تقریباً سلفی است نسبت به ΔV) و این I_c فقط مولفه راکتیو دارد این جریان به مولفه اکتیو I_2 و از مولفه اکتیو I_1 کم می‌کند.



$$\Delta V = 27.344 \text{ kv / line}$$

$$I_c = \frac{\Delta V}{Z_{loop}} \quad \tan \alpha = \frac{\Delta V}{V_2} \Rightarrow \Delta V = 15.78 \text{ kv / phase} \quad \text{راه حل تقریبی}$$

$$I_c = \frac{j15.78}{j100} = 0.1578 \angle 0^\circ \text{ KA / phase}$$

$$\Delta P_{1\phi} = |V_2| |I_c| = \frac{230}{\sqrt{3}} \times 0.1578 = 20.45 \text{ MW / phase} \simeq 20 \text{ MW} \quad \text{برای هر فاز}$$

$$\Delta P_{3\phi} = 3 \Delta P_{1\phi} \simeq 60 \text{ MW}$$

فصل ششم

کنترل توان راکتیو و ولتاژ

Reactive Power & Voltage Control

در سیستم دوباس زیر افت ولتاژ مابین آنها بصورت زیر نوشته می‌شود :

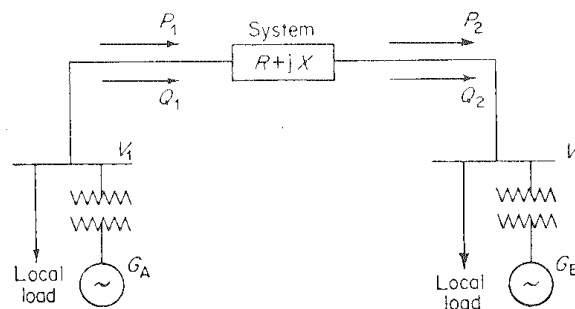
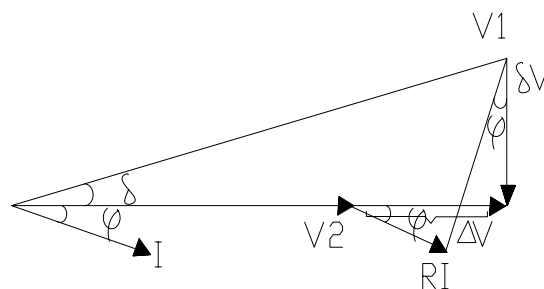


Figure 4.7 Two generating stations linked by an interconnector of impedance $(R + jX)\Omega$. The rotor of A is in phase advance of B and $V_1 > V_2$.



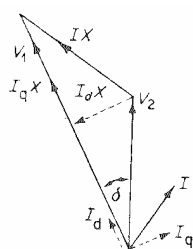
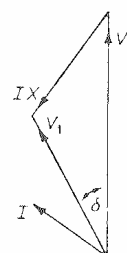


Figure 5.1 Phasor diagram for system shown in Figure 4.7; $V_1 > V_2$. Resistance of line zero, inductive reactance X ohms. I_d and I_q in-phase and quadrature components of the current I .



Phasor diagram for system in Figure 4.7. $V_2 > V_1$.

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \delta V^2 = (V + RI \cos \varphi + I \sin \varphi)^2 + (XI \cos \varphi - RI \sin \varphi)^2$$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2} \quad , \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V_2}$$

$$\text{If } \delta V \ll V_2 + \Delta V \text{ then } V_1^2 = \left(V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right)^2$$

$$\text{and } V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} = \Delta V$$

بنابراین اختلاف ولتاژ بین دو شین V_2, V_1 توسط رابطه تقریبی ΔV بیان می‌شود.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2}$$

$$Q = \frac{V_2 \Delta V}{X} - \frac{R}{X} P$$

اگر X, V ثابت باشند و رابطه بین قدرت اکتیو و راکتیو

$$Q = K - \frac{R}{X}P$$

$$Q' = K - \frac{R}{Y} P' \quad \Rightarrow \quad Q - Q' = \frac{R}{Y} (P' - P)$$

تغییرات در توان اکتیو باعث تغییرات در توان راکتیو می‌شود. اما مقدار R بخاطر بزرگ بودن X مقدار کوچکی است و می‌توان در قسمت دوم صرف‌نظر کرد. پس می‌توان نتیجه گرفت که تغییرات اندازه ولتاژ بیشتر در ارتباط با تغییرات توان راکتیو است.

$$Q \propto V,$$

$$\left\{ \begin{array}{l} > 0 \\ < 0 \end{array} \right. \text{ در مولد}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} < 0 \\ > 0 \end{array} \right. \text{ در بار (ترانسفورماتورها، خطوط، کابلها)}$$

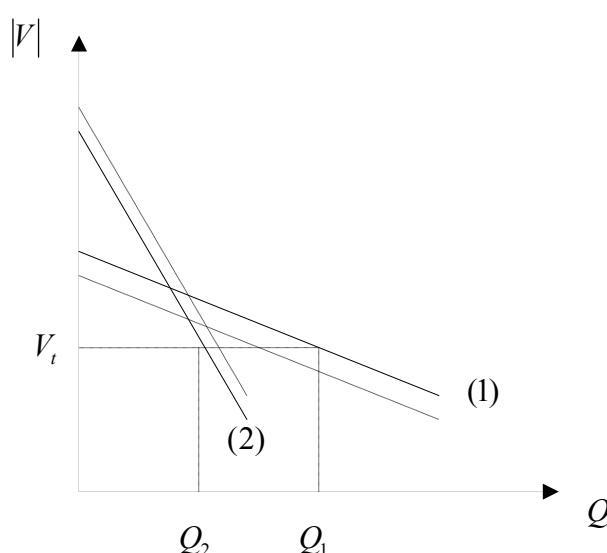
ارتباط بین این دو کانال تولید مشابه هم هستند این دو موضوع را موضوع دوگانه گویند.

dual concept applying to P' V.S. f and $|V|$ V. S. Var

در بحث پارالل بار بین دو ژنراتور در اینجا نیز قابل بحث است.

$$\left\{ \begin{array}{l} P, F \\ Q, V \end{array} \right\} \text{ رابطه دوگانه}$$

برای کم کردن قدرت واحد ۱ و زیاد کردن قدرت واحد ۲ با کم کردن قدرت واحد ۱ برای ثابت بودن فرکانس بایستی مشخصه آن به پائین آمده و به يك V دیگر افت پیدا خواهد کرد. برای رساندن V به V_t بایستی تحریک ژنراتور ۲ را زیاد کنیم که با اینکار مشخصه ۲ به بالا می‌رود.



میزان قدرت راکتیو در ژنراتور بوسیله نسبت اتصال کوتاه (عکس راکتانس سنکرون) مشخص می‌شود. در اینصورت میزان جذب یا تولید قدرت راکتیو در ژنراتور بستگی به پیش فاز (زیرتحریک Under excited) یا پس فاز (فوق تحریک Over excited) بودن ژنراتور دارد. برای يك ژنراتور ۲۰۰ MW و ضریب قدرت ۰/۸۵ با میزان پایداری ۱۰ درصد ظرفیت قدرت راکتیو برابر ۴۵ MVAR است.

مقدار قدرت راکتیو جذب شده در بار نیز به میزان $I^2 X$ ارتباط دارد.

در برخی از بارها که در آنها خازن وجود دارد (در خطوط طویل) تبدیل به تولیدکننده قدرت راکتیو می‌شوند. در ترانسفورماتورها اغلب قدرت راکتیو جذب می‌شود.

راکتانس ترانسفورماتور $X_{T(pu)}$

قدرت تولید توان نامی $3VI_{rated}$

$$X_{T(pu)} = X_{Base} X_T = \frac{V}{I_{rated}} X_T$$

$$3I_{rated}^2 \frac{VX_T}{I_{rated}} = 3 \frac{I^2 V^2}{(IV)_{rated}} X_T = \frac{(VA_{load})^2}{VA_{rated}} X_T$$

کابل‌ها با ظرفیت بالا به مثابه ژنراتورهای تولید قدرت راکتیو هستند.

در یک کابل $270KV$ و $240MVA$ مقدار قدرت راکتیو تولیدی $\frac{MVAR}{Km} = 7/5 - 6/25$ است.

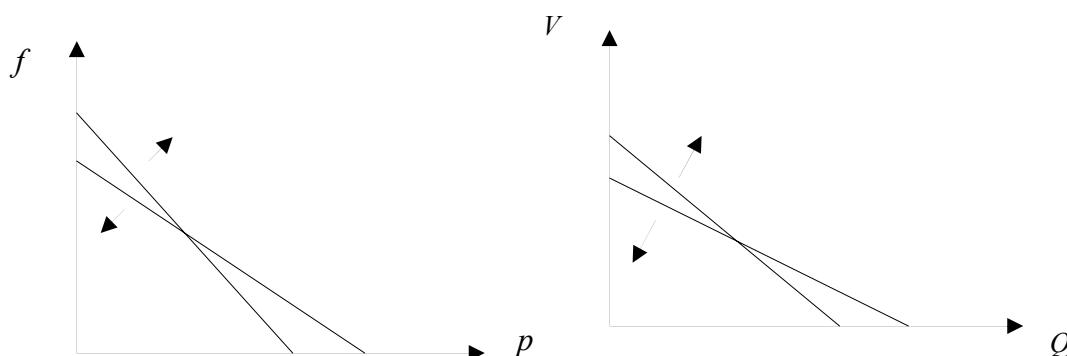
$$1/9$$

$$132 KV$$

$$0/125$$

$$33 KV$$

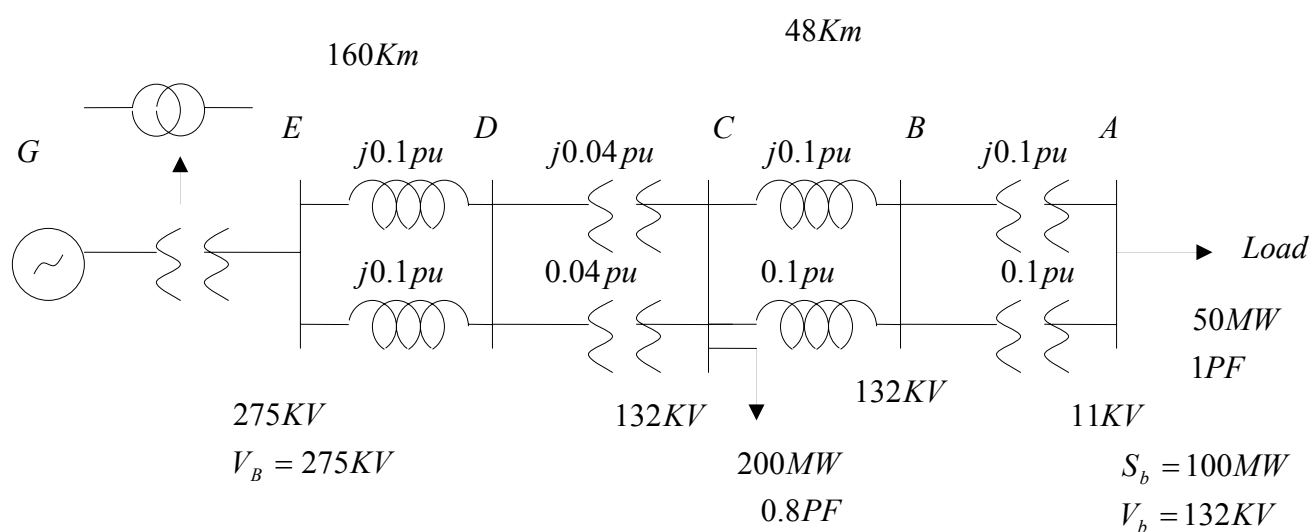
P	V.S	f	V	V.S	Var
۱- کنترل سرعت محرکه اصلی			۱- کنترل میدان تحریک ژنراتور		
۲- فرکانس			۲- ولتاژ ترمینال		
۳- $P_L = P_1 + P_2$			۳- $Q_L = Q_1 + Q_2$		
۴- f V.S P			۴- $ V $ V.S Q		
۵- بوسیله افزایش سرعت نیروی محرکه فرکانس تنظیم $f \propto P \propto$			۵- بوسیله افزایش تحریک یکی از ژنراتورها ولتاژ ترمینال تنظیم $Q - V \propto AVR$		
۶- برای کنترل فرکانس کنترل نیروی محرکه دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل می‌کنند.			۶- برای کنترل ولتاژ ترمینال تحریک دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل می‌کنند.		



پس بین این دو سیستم يك دوگانگي دیده مي‌شود. پس ژنراتور خودش يك عامل جذب براي كنترل بار است فقط عيب آن اين است كه قابليت و ظرفيت آن بحد كافي نيست و نمي‌توان تمامي بار شبکه را بوسيلة ژنراتور تنظيم نماييم.

المانهاي موجود در شبکه ترانسفورمرها كه همواره قدرت راكتيو جذب مي‌كنند خطوط انتقال مخصوصاً خطوط انتقال طولاني و كابل‌ها كه قدرت راكتيو ايجاد مي‌كنند مخصوصاً در بار كه ژنراتورها خود مي‌توانند توليد و يا جذب قدرت راكتيو كنند و يا موتورهاي سنكرون بعنوان كمپانزاتور كه با دست زدن به تحريك آنها مي‌شود كه آنرا بعنوان مولد قدرت راكتيو بكار برد.

مثال : يك بار با ظرفيت 50MW با ضريب قدرت واحد در شين A در شبکه زیر مفروض است. در اين شبکه براي تنظيم ولتاژ چقدر قدرت راكتيو احتياج است تا ژنراتور توليد نمايد كه بايد آيا به تنهائي كافي است يا نه؟



$$V \propto Q \begin{cases} Q_G \\ Q_C \\ Q_L \end{cases}$$

از انتهاي خط شروع کرده و جلو مي‌رويم و مقدار قدرت اکتیو و راكتیو موردنیاز را در بارها بدست آوریم.

در شين A $P = 0.5 Pu$ $Q = 0$

$$X_{AB} = X_{BC} = 0.05$$

در شين B

$$X_{CA} = 0.05 + 0.05 = 0.1$$

افت قدرت راکتیو خط (فقط سلفی است) $I^2 X_{CA} = ?$

$$|I|^2 = \frac{Q^2 + P^2}{V_2} = \frac{0^2 + 0.5^2}{1}$$

$$I^2 X_{CA} = \frac{0.5^2}{1} \times 0.025 = Q_{CA}$$

$$\cos \varphi = 0.8 \rightarrow Q = \tan \varphi \times P = 1.5$$

$$P_C = 2 + 0.5 = 2.5 \text{ pu} \quad Q_c = 0.025 + 1.5 = 1.525 \quad \text{در شین C}$$

$$X_{EC} = X_{ED} + X_{DC} = 0.05 + 0.02 = 0.07$$

$$I^2 X_{EC} = \frac{1.525^2 + 2.5^2}{1} \times 0.07 = 0.6$$

اگر از تلفات ترانس و ژنراتور صرفنظر شود

$$\begin{cases} P_E = P_{EC} + P_C \\ P = 2.5 \text{ pu} \end{cases} \quad \begin{cases} Q_E = Q_{EC} + Q_C \\ Q = 1.525 + .6 = 2.125 \text{ pu} \end{cases} \rightarrow \cos \varphi = .7619$$

حال باید دید ژنراتور تحت این PF و قدرت می تواند ظرفیت تولید داشته باشد یا نه؟

رابطه بین ولتاژ و قدرت اکتیو و راکتیو در يك نقطه (باس)

در يك نقطه ولتاژ تابع قدرت اکتیو و راکتیو است.

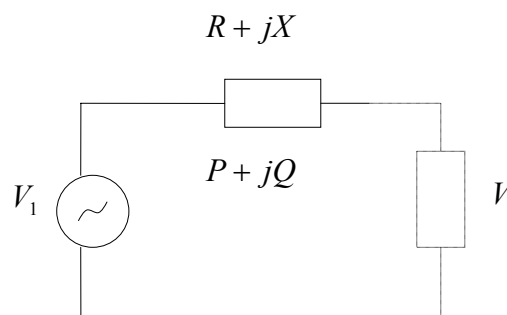
$$V = f(P, Q)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} = 1 \quad \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} = 1$$

$$(۱) \quad dV = \frac{dP}{\frac{\partial P}{\partial V}} + \frac{dQ}{\frac{\partial Q}{\partial V}}$$

تغییرات ولتاژ در يك نقطه بستگی به تغییرات قدرت اکتیو و راکتیو نسبت به ولتاژ دارد که این تغییرات می تواند قبلاً مشخص شود. برای پیدا کردن این تغییرات در يك مدار ساده بصورت زیر اقدام می شود.



$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$$

$$(V_1 - V) V = RP + XQ$$

حال اگر V_1 ثابت باشد V بستگی به مقدار قدرت انتقالی اکتیو و راکتیو دارد. این معادله را نسبت به P حل می‌کنیم :

$$P = \frac{(V_1 - V)}{R} V - \frac{XQ}{R}$$

$$Q = \frac{(V_1 - V)}{X} V - \frac{RP}{X}$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{R}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

با جایگزین کردن این دو معادله در بالا داریم : (۱)

$$dV = \frac{dP.R + dQ.X}{V_1 - 2V}$$

هرگاه $dV = 0$ ثابت باشند V_1, dV

$$R dP + X dQ = 0 \rightarrow dQ = -\frac{R}{X} dP$$

تغییرات قدرت اکتیو نسبت به تغییرات قدرت اکتیو

$$V \propto Q \propto P \propto f$$

ضریب سفتی یا stiffness يك ناحیه که قبلاً اشاره شد :

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = K$$

هرگاه $\frac{\Delta Q}{\Delta V} \propto \frac{V}{X}$ برای يك شبکه یا يك باس در دست داشته باشیم می‌توان از روی این نسبت مقدار قدرت

راکتیو تزریق شده به آن منطقه برای ترمیم افت و ولتاژ مشخص ساخت و از روی آزمایش بدست می‌آید.

در حالتی می‌دانیم که وقتی قدرت راکتیو مثلاً Q_{before} و ولتاژ در آن نقطه V_{before} (قبل از موقعی که به آن نقطه

قدرت راکتیو تزریق کنیم حالت معمولی before)

حال يك قدرت راکتیو معلوم به آن نقطه تزریق می‌کنیم و می‌توان ولتاژ را در آن نقطه اندازه گرفت.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q_{after} - Q_{before}}{V_{after} - V_{before}}$$

تغییرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ نیز قبلاً بدست آمده است هرچه راکتانس آن نقطه کمتر باشد این نسبت بزرگتر خواهد بود. وقتی چند خط در يك باس تلاقی کنند X كوچك بوده و این نسبت بزرگ خواهد بود پس این نسبت بستگی به شرایط شبکه دارد و مقدار آن بطور متوسط $10 - 15 \frac{\text{MVar}}{1 \text{KV}}$ می باشد.

مثال : اگر افت طبیعی در يك نقطه بدون تزریق وار مصنوعی 5KV باشد و تغییرات $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ در آن نقطه برابر $15 \frac{\text{KVAR}}{\text{KV}}$ باشد برای ترمیم 5KV افت ولتاژ چقدر قدرت راکتیو بایستی بدان نقطه تزریق گردد؟

نتیجه مهم : $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$ برابر شدت جریان اتصالی در همان نقطه (باس) است.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

حال اگر شکل قبل ولتاژ خروجی اتصال کوتاه شود $V = 0$ از روی مدار مشخص است که

$$I_{S.C} = \frac{V_1}{X} \text{ [A]} \quad R \ll X$$

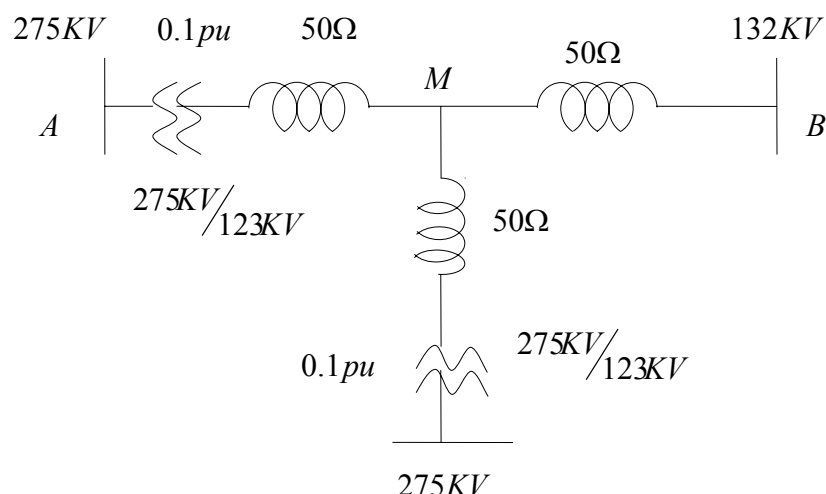
در حالت بی باری که مدار باز است.

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V_1}{X} \quad (V = V_1)$$

$\frac{\partial Q}{\partial V}$ از نظر قدر مطلق برابر شدت جریان اتصال کوتاه است.

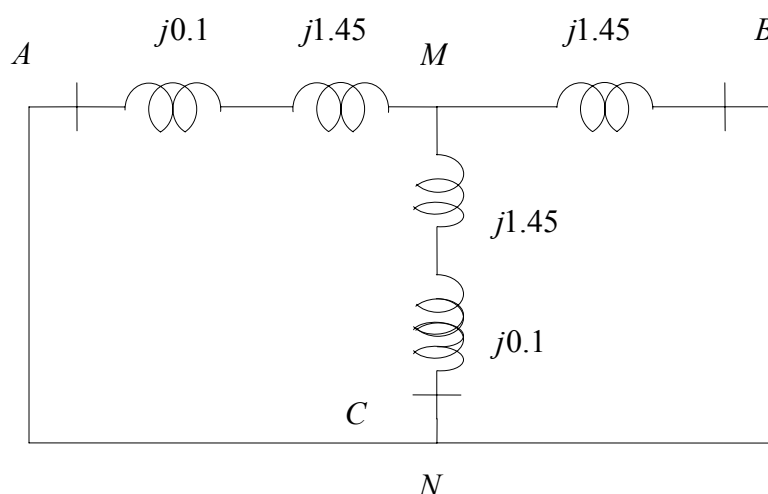
$$\left| \frac{\partial Q_P}{\partial V_{Phase}} \right| = I_{S.C, Phase}$$

مثال : سه نقطه تغذیه CBA به يك باس مشترك m وصل شده اند نقطه تقذیه A روی 275KV ثابت نگه داشته شده و از طریق ترانس 275/132KV به نقطه m وصل شده اند. راکتانس ترانسفورماتورها $0.1 pu$ می باشد.



راکتانس خط 132KV برابر 50Ω است. نقطه تغذیه B دارای ولتاژ اسمی 132KV بوده و از طریق خط 132KV با راکتانس 50Ω به نقطه m اتصال داده شده است. نقطه تغذیه C دارای ولتاژ اسمی 275KV است و از طریق ترانسفورماتور 275/132KV که دارای راکتانس 0.1 pu و خط 132KV با راکتانس 50Ω به نقطه m وصل شده است. اگر در یک بار معینی ولتاژ خط در نقطه m، 5KV از مقدار اسمی افت پیدا کند حساب کنید قدرمطلق ظرفیت جبران ساز راکتیو (خازن) را که به نقطه m تزریق نمود تا ولتاژ اولیه بدست آید. مقادیر پریونیت در مقدار 500MVA داده شده و از مقاومت خطوط صرف نظر شده است.

مدار معادل حالت اتصال کوتاه



$$Z_b = \frac{132^2}{500} = 34.85\Omega$$

$$X_{MN} = 0.505057\text{pu} \cong 0.5 \text{ pu}$$

شدت جریان اتصال کوتاه سه فاز

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z(\text{pu}) = \left(\frac{V}{I_{Full Load}} \right) \times Z(\text{pu})$$

$$I_{S.C.} = \frac{V}{Z_{S.C.}(\Omega)} = \frac{V}{Z_{base} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{V}{\frac{V}{I_{Full Load}} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{I_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})}$$

$$S_{3\text{phase } S.C.} = \sqrt{3} V_{Line} I_{S.C.Line} = \sqrt{3} V \frac{I_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{S_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})}$$

$$S_{3\text{phase } S.C.} = \frac{500}{0.5} = 1000 \text{MVA}$$

$$I_{S.C.,Line} = \frac{S_{3\text{phase } S.C.}}{\sqrt{3} V} = \frac{1000 \text{M}}{\sqrt{3} \times 132 \text{K}} = 4373.86 \text{ A}$$

$$\frac{\partial Q_{3\text{phase}}}{\sqrt{3} \partial V_L} = I_{S.C.,Line} \rightarrow \frac{\partial Q_{\text{phase}}}{\partial V_{\text{phase}}} = \frac{\frac{\partial Q_{3\text{phase}}}{3}}{\frac{\partial V_L}{\sqrt{3}}} = \frac{\partial Q_{3\text{phase}}}{\sqrt{3} \partial V_L} \quad \text{در بحث سه فاز}$$

$$\Delta Q_M = \sqrt{3} I_{S.C.,Line} V_L = \sqrt{3} \times 5 \text{KV} \times 4.37386 \text{KA} = 37.88 \text{ MVAR} \quad \text{کل قدرت اکتیو سه فاز در نقطه M}$$

جبران سازها

قدرت انتقالی در یک شبکه غیر واحد بصورت زیر است.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \quad \text{از رابطه}$$

مشخص است که افت فشار بشدت به مقدار توان راکتیو Q وابسته است.

افزایش عبور جریان خط باعث ایجاد افت $I^2 R$ و کاهش ظرفیت حرارتی خط خواهد بود.

یکی از بهترین محلها برای تزریق قدرت راکتیو در محل بار می باشد. برای تزریق قدرت راکتیو سه روش زیر وجود دارد :

1. Static shunt Capacitors and Reactors

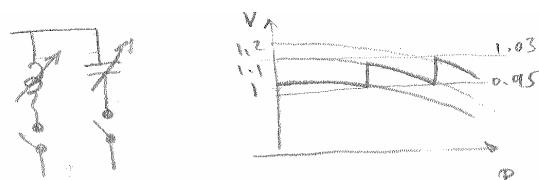
در سیستم های توزیع و فوق توزیع (بهمراه ترانسفورماتورهای تپ چنجر)

خازنهای موازی برای پیش فاز نمودن ضریب قدرت مدارات استفاده می شود. (در مدارات پس فاز بکار می روند) تولیدکننده توان اکتیو

سلفهای موازی پس فاز (در مدارات پیش فاز مثل کابل ها بکار می روند) مصرف کننده توان راکتیو هستند. در هر دو حالت هدف تأمین توان راکتیو Q روی تثبیت مقدار ولتاژ می باشد.

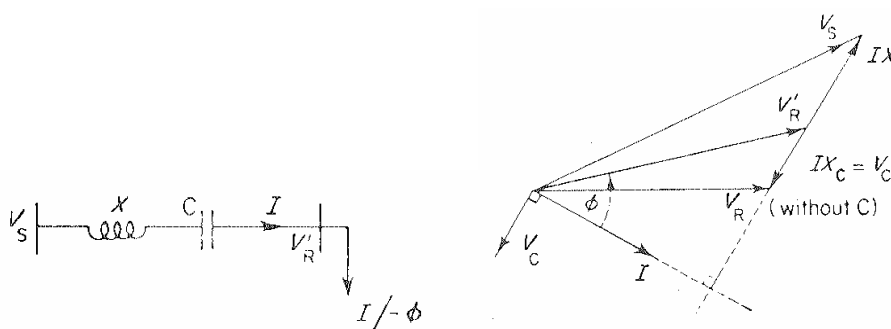
خازنها بصورت مستقیم و یا از طریق سیمپیچ ثالثیه يك ترانسفورماتور به شین متصل شده و مقدار تلفات و افت ولتاژ را کاهش می‌دهند.

بدبختانه با کاهش ولتاژ شین، توان راکتیو تولید شده توسط خازن یا سلف (راکتور) نیز کاهش می‌یابد. همینطور در بارهای روشنایی با افزایش ولتاژ به سمت مقادیر غیرمجاز خروجی خازن موازی نیز افزایش می‌یابد. کنترل ولتاژ در چند مرحله (پله) انجام می‌شود. پس ΔV توسط تولید محلی Q در شین بار با افزایش ولتاژ دو طرف خط کاهش می‌یابد.



2. Series Capacitors

این خازنها بصورت سری با خط انتقال متصل می‌شوند و برای کاهش میزان راکتانس سلفی خط بین شین تولید و مصرف بکار می‌روند. یکی از شرایط خطرناک، وجود اضافه ولتاژ تولیدی در حین عبور جریان اتصال کوتاه از خازن سری خواهد بود که توسط جرعه‌گیرها باتی حفاظت شوند.



(خازنهای سری در خلال خطاها، اتصال کوتاه می‌شوند تا به آنها آسیبی نرسد). (کلیدهای اتصال کوتاه‌کننده معمولاً تریسقردی است).

اختلافات اساسی بین تأثیر خازنهای سری و موازی :

- ۱- در صورتیکه میزان وار موردنیاز بار کم باشد خازنهای سری به تعداد کم استفاده می‌شوند.
- ۲- تأثیر خازن سری در کاهش جریان خط کم است. در صورتیکه شرایط ظرفیت حرارتی خط در نظر گرفته شود خازن موازی تأثیر بیشتری بر جریان خط می‌گذارد.
- ۳- هر گاه افت ولتاژ عامل محدودکننده می‌باشد در آنصورت تأثیر خازنهای سری در اینمورد بیشتر خواهد بود.
- ۴- هرگاه راکتانس کل خط بزرگ باشد خازنهای سری بسیار سودمند بوده و حتی پایداری را نیز بهبود می‌بخشند.

در حقیقت نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط بلند است.

وقتي در خطوط بسيار بلند خازن سري استفاده مي شود از راکتور موازي نيز براي کنترل ولتاژ حاليهاي کمبار و بي بار استفاده مي شود.

نتايج در نصب خازنهاي سري

۱- افزايش قدرت انتقالي ماکزيمم و بهبود پايداري ماندگار

۲- افزايش بار طبيعي خط $SIL \uparrow = P_C = \frac{V^2}{Z_C \downarrow}$ بار طبيعي

۳- کاهش زاويه انتقال δ در قدرت ثابت $P = \frac{|V_1||V_2|}{X \downarrow} \sin \delta \downarrow \Rightarrow \delta \downarrow$ ثابت

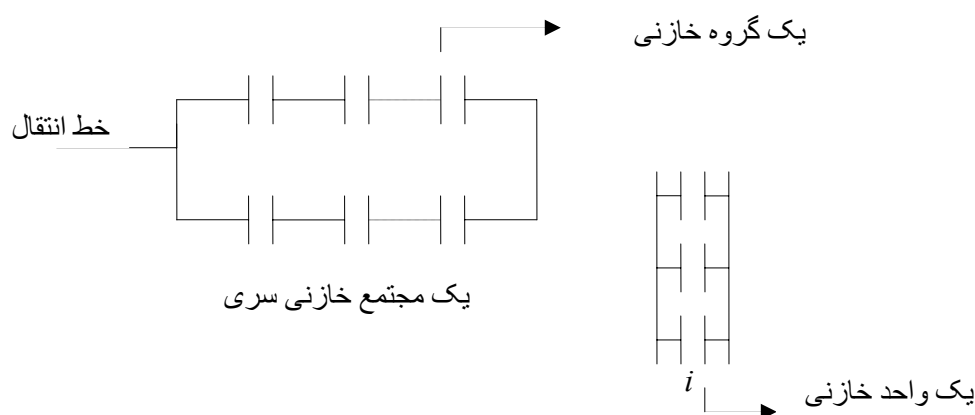
۴- کاهش تلفات خط

۵- کاهش افت ولتاژ و ايجاد پروفيل ولتاژ بهتر در طول خط

۶- بهبود پايداري گذرا

۷- کاهش حساسيت ولتاژ به اختلالات گذرا

محل نصب خازنهاي سري (بسته به عوامل اقتصادي) در يك يا در محل در ابتدا، انتها و وسط خط انتقال است.



3. Synchronous Compensators

جبران سازهای سنکرون

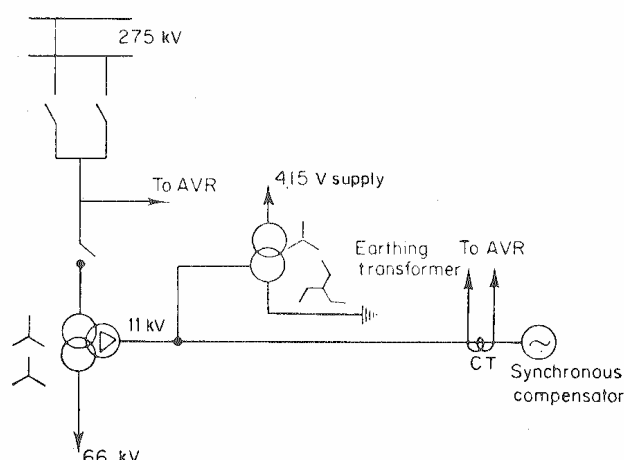
(هم در سيستم فوق توزیع و هم انتقال)

جبران کننده سنکرون در واقع يك موتور سنکرون بي بار است و جذب يا توليد توان راکتیو در آن به مقدار تحريك بستگي دارد.

تلفات آن قابل مقايسه با خازنهاي استاتيک است در حالیکه ضريب قدرت آن غير صفر مي باشد.

در حالت high load بصورت overexcited بعنوان جبران و تنظیم‌کننده ولتاژ بکار می‌رود (بصورت اتوماتیکی).

در حالت light load بصورت underexcited



سیستم AVR مربوط به کمپانزاتور توسط ولتاژ خط 275kV و جریان کمپانزاتور کنترل می‌شود.

این کار باعث ایجاد تغییرات لازم در مشخصه V-Q مربوط به سیستم خواهد شد.

از ویژگی‌های مهم این روش انعطاف عملکرد آن در شرایط بارداري مختلف است. هزینه نصف چینین تاسیساتی نیز بالاست.

برای خطوط بلند HV در انتهای بار با ضریب قدرت کمتر از ۱ این تجهیزات توجیه نمی‌شوند و بجای آنها در قسمت LV از خازن موازی استفاده می‌شود.

۱- کنترل ولتاژ در يك نقطه

۲- تنظیم خط و در نتیجه افزایش قدرت اکتانس و بهبود پایداری سیستم

۳- تأمین قدرت راکتیو در شرایط اضطراری

۴- کاهش نوسانات

4. Static Compensators

جبران‌کننده‌های استاتیک

۱- راکتیو کنترل‌شده با تریستور TCR

۲- TCR و خازن‌های ثابت موازی TCR/FC

۳- خازن سویچ شده با تریستور TSC

۴- راکتور اشباع شده SR

بررسی اقتصادی میزان ترمیم قدرت راکتیو

مثال : قدرت راکتیو می تواند در محل یا نزدیکتر به بار تولید شود و اینکار به سود و نفع مصرف کننده و هم به تولید کننده است. تولید کننده می خواهد فقط قدرت اکتیو انتقال دهد چون در موارد مصارف خانگی و تجاری فقط به قدرت اکتیو تعرفه پرداخت می شود در این محل برای قدرت راکتیو کشیده شده در شبکه پولی داده نمی شود تلفات خط و سیستم را افزایش می یابد بخاطر وجود مدرک راکتیو و شدت جریان نامی خط افزایش می یابد تول گیس در مصارف که دارای ضریب قدرت پائین تر هستند می خواهد تا ضریب قدرت خودش را بالا ببرد و یا تعرفه الکتریکی مصرف را دو قسمت کند که برای بارهای صنعتی صورت می گیرد.

$$f A \times KVA + B \times KWh \quad \text{يك تعرفه براي KVA موردنظر براي مصرف محل}$$

و يك تعرفه براي انرژی مصرف شده KWA می تواند هم مؤلفه اکتیو دهم مؤلفه راکتیو داشته باشد. حال اگر مصرف کننده بخواهد VAR مورد نیاز خود را تأمین کند KVA پائین می آید و هر ماه یا سال و یا در هر پریود بازای هر KVA پرداخت کسری خواهد داشت و این کار برای کارخانه بطور جسمانی صورت نمی گیرد بلکه آنها بایستی سرمایه گذاری روی کمپاتورها داشته باشد. اگر این سرمایه گذاری انجام نشود بایستی تعرفه بپردازد باید دید چقدر باید مصرف کننده ضریب قدرت خود را بالا برد تا برایش اقتصادی تر باشد؟

$$P_1 : \text{قدرت قبل از اصلاح} \quad \theta_1 : \text{ضریب قدرت تأخیری}$$

$$P_1, \theta_2 : \text{ضریب قدرت بعد از اصلاح}$$

$$KVA = \frac{P_1}{\cos \theta_1} \quad \text{مورد نیاز کارخانه} \quad KVA = \frac{P_1}{\cos \theta_2}$$

$$KVA \text{ در صرفه جویی} = \left(\frac{P_1}{\cos \theta_1} - \frac{P_1}{\cos \theta_2} \right) \cdot A$$

خازنهای موجود در بازار بازای هر KVAR ظرفیت خازن مطرح می شود.

$$P_1 \tan \theta_1 \quad \cos \theta_0^0 \quad \text{قدرت راکتیو مورد نیاز قبل از اصلاح}$$

$$P_1 \tan \theta_2 \quad \text{بعد از اصلاح}$$

$$KVAR = P_1 \tan \theta_1 - P_1 \tan \theta_2 \quad \text{KVAR مورد احتیاج بوسیله کمپاتورها}$$

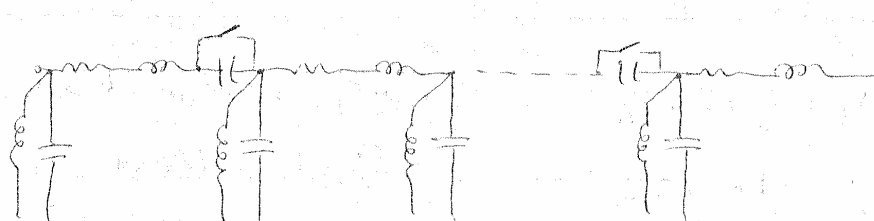
هزینه سالانه مسئله اگر برابر هر KVAR $C' f / KVAR$ سرمایه گذاری شود اگر به بالا ضرب شود کل هزینه سرمایه گذاری است این هزینه در طی عمر خازنها استهلاک دارد برای هر سال استهلاکهای فراوان از جمله استهلاک ارزش پول و نرخ بهره بوجود می آید.

$$C' f / KVAR = \text{هزینه سالانه سرمایه گذاری}$$

$$KVA \text{ خالص} = \left[AP_1 \left(\frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{1}{\cos \theta_2} \right) - C' P_1 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \right]$$

θ_2 متغیر است. می‌توان از این صرفه‌جویی نسبت به θ_2 مشتق گرفته و مساوی صفر قرار دهیم.

$$\sin \theta_2 = \frac{C'}{A} \quad \theta_2 \text{ بیشتر بستگی به هزینه سرمایه‌گذاری سالانه و تعرفه KVA دارد.}$$



خازنهای سری و کاهش افت ولتاژ، یا اتصال کوتاه کردن این خازنهای سری می‌توان فقط بارهای راکتور (سلف) را به مدار آورد. خازنهای سری در مواقع بار زیاد که افت ولتاژ بیشتر مطرح است مورد استفاده است و راکتورها در مواقع بار سبک خازنهای موازی عمده/ کاهش تلفات می‌تواند قابلیت انتقال خط را به حد قابل معینی افزای دهد در خازنهای سری افت ولتاژی را می‌تواند جبران کند از خازنهای موازی برای تقسیم بار بین خطوط استفاده می‌شود چون بار بصورت عکس امپدانس بین خطوط تقسیم می‌شود.

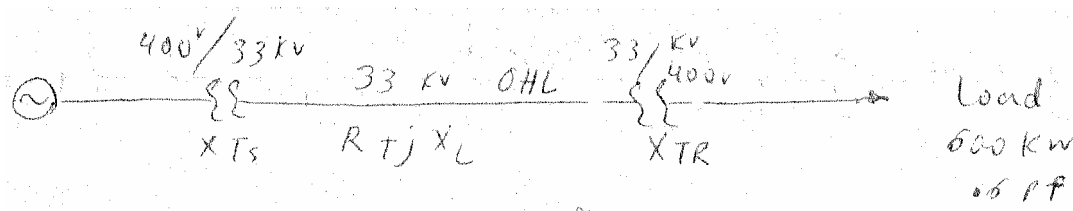
مثال : در شکل زیر می‌خواهیم ضریب قدرت را ابتدا توسط خازن موازی و سپس توسط خازن سری برابر 1 نمائیم. مقدار بار 600KW PF = 0.6 ترانسفورماتور 33KV/400V خط 33KV overhead $R_L + jX_L$ و ترانسفورماتور دیگر 400V/33KV است.

$$X_{TS} = 87 \Omega / \text{pu}$$

$$X_{TR} = 87 \Omega / \text{pu}$$

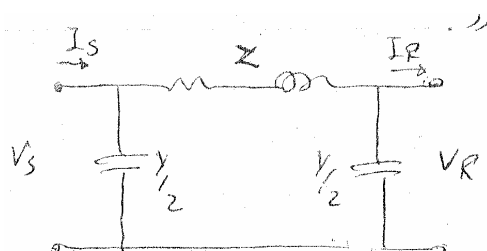
$$R = 6 \mu \Omega / \text{pu}$$

$$X_L = 22 \Omega / \text{pu}$$



قدرت راکتیو لازم برای کنترل ولتاژ یک خط طولانی

خط طولانی را می‌توان بصورت مدار معادل π معادل‌سازی کرد.



بازای این‌که V_R چه مقداری از V_S باشد مقدار قدرت راکتیو لازم برای انتقال یک قدرت معینی را بررسی کنیم. A , B به مشخصات خط مربوط هستند.

$$V_S = (V_R \frac{Y}{Z} + I_R)Z + V_R$$

$$A = \frac{ZY}{2} + 1 = |A| < \alpha$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1)V_R + Z I_R$$

$$B = Z = |B| < \beta$$

$$V_r = |V_r| < 0, \quad I_r = |I_r| < -\phi_r$$

طرف دریافتی

$$V_s = |V_s| < \delta_s$$

طرف ارسالی

$$|V_S|^2 = |A|^2 |V_r|^2 + |B|^2 + |I_r|^2 + |A||B||V_r||I_r| [\cos(\alpha - \beta) \cos \phi_r - \sin(\alpha - \beta) \sin \phi_r]$$

ایجاد نول بایستی برحسب قدرت انتقالی نوشته شود تا پارامترها قابل اندازه‌گیری باشند.

$$P_r = V_r I_r \cos \phi_r$$

$$Q_r = V_r I_r \sin \phi_r$$

$$I_r = I_p + j I_q$$

$$I_r^2 = I_p^2 + I_q^2$$

$$I_p = \frac{P_r}{V_r} \quad \text{مؤلفه اکتیو شدت جریان دریافتی}$$

$$I_q = \frac{Q_r}{V_r}$$

$$V_S^2 = A^2 V_r^2 + B^2 \left(\frac{P_r^2}{V_r^2} + \frac{Q_r^2}{V_r^2} \right) + 2AB P_r \cos(\alpha - \beta) - 2AB Q_r \sin(\alpha - \beta)$$

برای یک شبکه قدرت اکتیو و راکتیو انتقالی Q_r, P_r در دست باشد، بازای این‌که V_r دارای چه نسبتی با V_S

باشد Q_r را می‌توان مشخص ساخت و از روی آن می‌توان دید چقدر کمپاتر نمودن در پایان خط لازم است.

اقتصادی و راحت‌ترین راه برای کنترل ولتاژ ترانس‌های مجهز به tap changing هستند.

کنترل ولتاژ می‌تواند بصورت استفاده از خازنهای سری و موازی یا با استفاده از راکتور نیز باشد که قبلاً

بحث آن رفت. این ترانس‌ها به ترتیبات مختلف می‌توانند در خط استفاده شوند : دو عدد ترانسفور مانند

تپ‌چنجر در دو طرف خط

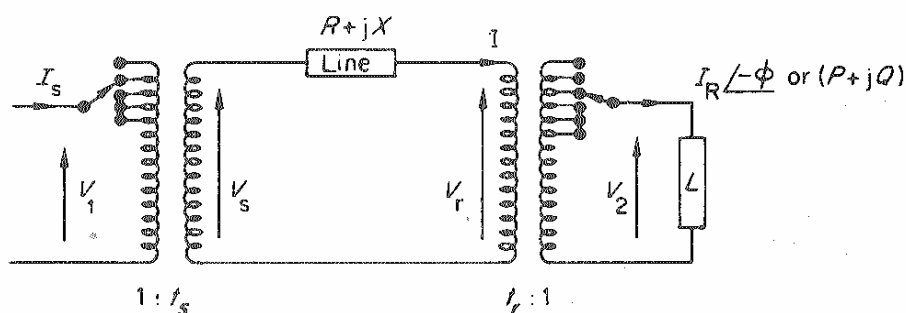
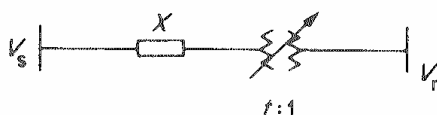
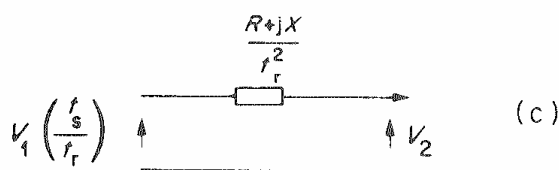
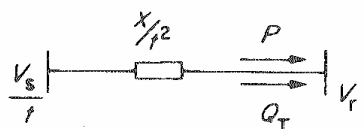


Figure 5.10 (a) Coordination of two tap-changing transformers in a radial transmission link.



(b)



(c)

Figure 5.10 (b) and (c) Equivalent circuits for dealing with off-nominal tap ratio. (b) single transformer (c) two transformers.

تنظیم واحد

V_1 ولتاژ اسمی nominal voltage

t_s تنظیم off- nominal

V_s ولتاژ حقیقی actual voltage

t_r تنظیم off- nominal

V_r actual voltage

تنظیم واحد

V_2 actual voltage

t = of nominal tap ratio Or perunit tap setting نسبت ترانس ها

t_s, t_r نسبتی از نسبتهای اسمی ترانسفورماتورها fraction of nominal transformation ratio

نسبت ترانس ها وقتی تپینگ صورت می گیرد به نسبت ترانس وقتی که تپ صورت نمی گیرد یعنی (در حالت عادی)

$$t_s = \frac{\text{tap ratio}}{\text{no min alratio}}$$

$$t_s = \frac{\left(\frac{T}{P}\right)_{\text{tap}}}{\left(\frac{T}{P}\right)_{\text{nominal}}}$$

مثلاً اگر نسبت اسمی ترانس ۱ و ۲ $6.6/33^{\text{KV}}$ باشد و وقتی که تیپینگ انجام می‌شود نسبت ترانس به $6.6/36$ تبدیل می‌شود (تیپینگ در step های مختلف صورت می‌گیرد).

$$t_s = \frac{36/6.6}{33/6.6} = \frac{36}{33} = 1.09 \quad t_s.t_r = 1 \rightarrow t_r = 0.917$$

$$\text{اگر } t_s.t_r = 1$$

$$V_s = V_1 t_s \quad V_r = t_r V_2$$

برای جبران کامل افت ولتاژ و برای داشتن حداقل tap cho در کنترل ولتاژ بایستی داشته باشیم :

$$t_r.t_s = 1$$

$$\bar{V}_s = \Delta \bar{V} + \bar{V}_r \quad t_s V_1 = I_2 t_r V_2 \quad I_2 = \Delta V = \frac{RP + XQ}{V_r = t_r V_2}$$

$$\Delta \bar{V} = V_1 \left(\frac{t_s}{t_r}\right) - \bar{V}_2 \equiv \frac{\frac{R}{t_r^2} P + \frac{x}{t_r^2} Q}{\bar{V}_2}$$

$$\begin{cases} t_s V_1 = t_r V_2 + \frac{RP + XQ}{t_r V_2} \rightarrow t_s V_1 = \frac{V_2}{t_s} + \frac{RP + XQ}{\frac{V_2}{t_s}} \\ t_r.t_s = 1 \end{cases} \quad \text{طرفین در } \frac{t_s}{V_1} \text{ ضرب}$$

$$t_s^2 = \frac{V_2}{V_1} + \frac{RP + XQ}{V_1 V_2} . t_s^2 \quad \frac{V_2}{V_1} = t_s^2 \left(1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}\right)$$

$$t_s^2 V_1 V_2 - V_2^2 = (RP + XQ) t_s^2$$

بازای یک مقدار قدرت انتقالی از خط و بازای اینکه V_2 چه نسبتی از V_1 باشد t_r, t_s را مشخص سازیم و خواهیم افت ولتاژ متوسط ترانس مجهز به tapch کمپانزه باشد یعنی $V_1 = V_2$ باشد خواهیم داشت :

$$t_s = \sqrt{\frac{V_2/V_1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}}} \xrightarrow{V_1=V_2} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1^2}}}$$

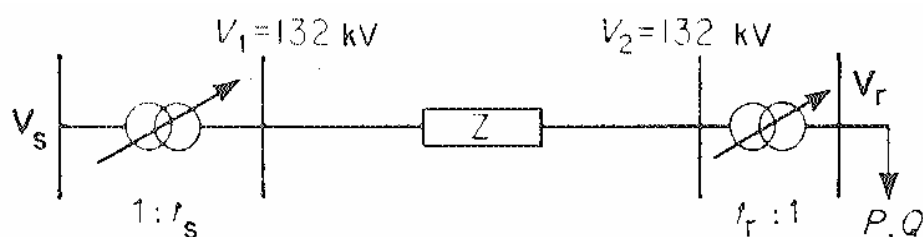
$$V_2 = \frac{1}{2} \left(t_s^2 V_1 \pm t_s \sqrt{t_s^2 V_1^2 - 4(RP + XQ)} \right)$$

برای یک مشخصه معینی از خط و برای یک اتصال یک قدرت معینی و یک تصحیح معینی با داشتن V_1 می‌توان ولتاژ V_2 را مشخص ساخت.

مثال- يك خط انتقال ۱۳۲KV از طريق ترانسفورماتور 11/132 KV تغذيه مي شود. در طرف ديگر خط (طرف بار) اين ولتاژ توسط ترانسفورماتور ديگر 132/11 KV کاهش مي يابد. امپدانس كل خط و ترانسفورماتورها در طرف 132 KV برابر $25 + j66\Omega$ است.

هر دو ترانسفورماتور، داراي سيستم تپ چنجر هستند كه در آنها حاصل ضرب تنظيمات طرف off-nominal برابر واحد است.

اگر بار انتهاي خط برابر 100MW در ضريب قدرت ۰/۹ پس فاز باشد در آنصورت تنظيمات $t_s.t_r = 1$ تپ چنجرها را براي ثابت نگه داشتن ولتاژ شين بار در 11KV محاسبه كنيد (توان مثبت 100MW).



$$V_s = V_r = 132KV = 1pu$$

حالت جبران كامل مي باشد (طبق شرايط مسئله)

$$t_s \times t_r = 1$$

$$Z_{un} = 25 + j66\Omega = 0.014 + j0.38 pu$$

$$\text{load} = P + jQ = 100MW + j48.3MVAR = 1 + j0.483 Pu$$

از معادله كلي

$$1 = \frac{1}{2} \left[(t_s^2 \cdot 1) \pm t_s \sqrt{(t_s^2 \cdot 1^2 - 4(0.014 \times 0.38 \times 0.483))} \right]$$

$$2 = t_s^2 \pm t_s \sqrt{t_s^2 - 1.28}$$

$$(2 - t_s^2)^2 = t_s^2 (t_s^2 - 1.28) \rightarrow t_s = 1.21 \rightarrow t_r = \frac{1}{1.21} = 0.83$$

شرايط عادي براي تپ چنجر بيش از ۲۰ درصد نمي باشد و مقادير بدست آمده كمتر از حالت معمول است. بنابراين لازم است براي تثبيت ولتاژ در شين بار از تزريق وار نیز استفاده شود.

دقت شود كه اين ترانسفورماتورها مقدار قدرت راكتيو را تغيير نمي دهند بلكه با افزايش نسبت تنظيم t_s (با کاهش t_r) جريان خط افزايش مي يابد.

$$I = 100A \quad \text{قبل از تپ چنجر}$$

$$\text{ratio } 1:1$$

$$\frac{I'}{100} = \frac{1.1}{1} \rightarrow I' = 100 \times 1.1 \quad \text{بعد از تپ چنجر}$$

$$\Delta V_L' = 1.1 \Delta V_L$$

از طرف ديگر افزايش ولتاژ ثانويه (كاهش t_r) نیز باعث افزايش اين افت ولتاژ (افزايش جريان) خواهد بود.

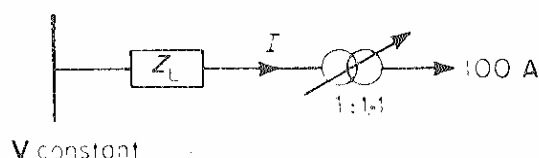


Figure 5.12 Effect of tap changing on line current and voltage drop.

ترکیب ترانسفورماتورهای تنظیم Tap-changing و تزریق توان راکتیو

در بعضی از منابع $t_r = a_2$, $t_s = a_1$ per unit tap setting

در طرف دریافتی وقتی t_r را کاهش می‌دهیم شدت جریان در این قسمت افزایش می‌یابد و لذا با کاهش t_r که می‌خواهیم افت ولتاژ را جبران کنیم از طرف دیگر شدت جریان را افزایش داده‌ایم. پس بایستی توجه داشت این ترانس‌ها را در خطوطی بکار برد که دارای امپدانس کمتری باشند.

این ترانس‌ها حداکثر تا 20% ولتاژ را کنترل کنند اگر ترمیم ولتاژ بیشتر از آن مورد احتیاج باشد لازم است ترانسفورماتورها را همراه با سایر کمپانزاتورها مثل خازنها یا موتورهای سنکرون استفاده کنیم که آنها به ثالثیه ترانسفورماتورهای سه‌سیم‌پیچه اتصال پیدا می‌کنند.

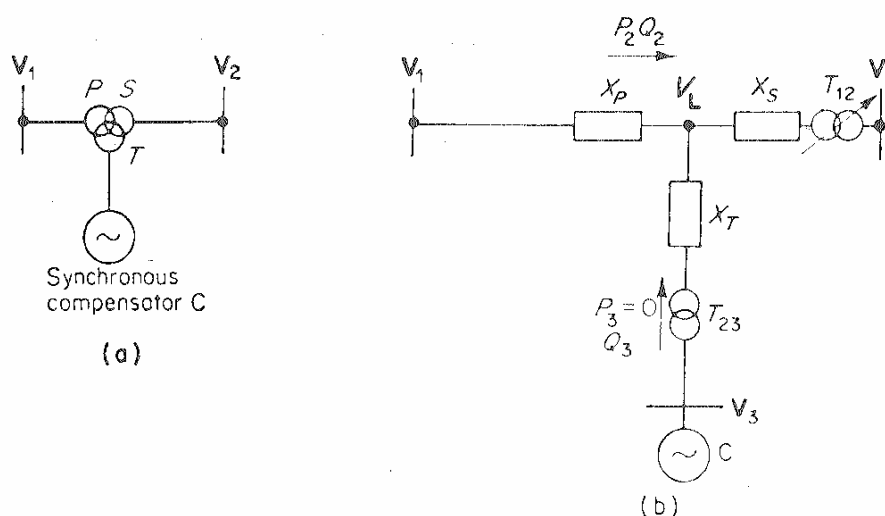


Figure 5.13 (a) Schematic diagram with combined tap changing and synchronous compensation. (b) Equivalent network.

برای انتقال یک قدرت معینی و بازای اینکه ولتاژ ثانویه چه نسبتی با ولتاژ اولیه داشته باشد و با توجه به محدود بودن tap , setting این ترانس مقدار قدرت راکتیوی که این کمپانزاتور بایستی بدهد چقدر باید باشد؟

در طرف ثالثیه $P_3 = 0$, Q_3 افت ولتاژ در نقطه V_1 تا V_n با صرفنظر از R

$$\Delta V = \frac{X_P Q_2 / 3}{V_n} = X_P \frac{Q_2}{\sqrt{3} V_b} \quad V_L = \sqrt{3} V_n$$

$$\delta V = X_P \frac{P_2}{\sqrt{3}V_L}$$

$$(V_n + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 = V_1^2$$

$$(V_L^2 + X_P Q_2)^2 + (X_P P_2)^2 = 3V_1^2 V_L^2$$

$$V_{1L} = \sqrt{3}V_1$$

$$V_L^4 + X_P^2 Q_2^2 + 2X_P Q_2 V_L^2 + X_P^2 P_2^2 = V_{1L}^2 V_L^2 = 0$$

$$V_L^4 + (2X_P Q_2 - V_{1L}^2)V_L^2 + (X_P^2 Q_2^2 + X_P^2 P_2^2) = 0$$

$$V_L^2 = \frac{(V_{1L}^2 - 2X_P Q_2)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{V_{1L}^2 (V_{1L}^2 - 4X_P Q_2) - 4X_P^2 P_2^2}$$

190

Example 5.4 A three-winding grid transformer has windings rated as follows: 132 kV (line), 75 MVA, star connected; 33 kV (line), 60 MVA, star connected; 11 kV (line), 45 MVA, delta connected. A synchronous compensator is available for connexion to the 11-kV winding.

The equivalent circuit of the transformer may be expressed in the form of three windings, star connected, with an equivalent 132 kV primary reactance of 0.12 p.u., negligible secondary reactance, and an 11 kV tertiary reactance of 0.08 p.u., both values expressed on a 75 MVA base.

In operation, the transformer must deal with the following extremes of loading:

- Load of 60 MW, 30 MVA_r with primary and secondary voltages governed by the limits 120 kV and 34 kV; synchronous compensator disconnected.
- No load. Primary and secondary voltage limits 143 kV and 30 kV; synchronous compensator in operation and absorbing 20 MVA_r.

Calculate the range of tap changing required. Ignore all losses.

روش دیگر مورد استفاده از ترانس‌های مجهز به tap chan در خطوط برای کنترل جریان قدرت راکتیو است

VAR

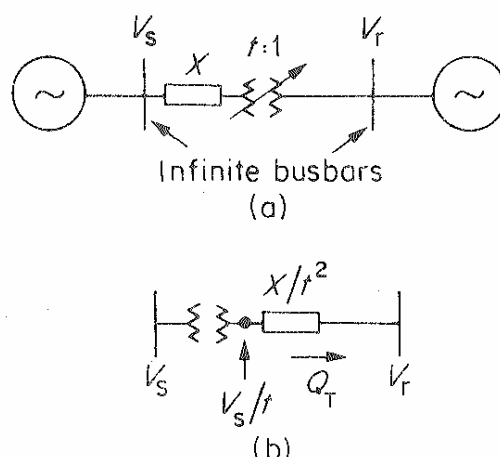


Figure 5.15 (a) Two power systems connected via a tap-change transformer. (b) Equivalent circuit with impedance transferred to receiver side.

اگر V_r, V_s ثابت باشند و ترانس مجهز به t.ch با nominal ratio t باشد می‌توان مدار را بصورت زیر در نظر گرفت :

تمام پارامترها را به سمت راست ترانس می‌توان انتقال داد.

$$\Delta V = \frac{V_s}{t} - V_r = \frac{X}{t^2} \frac{Q_r}{V_r} \quad \text{افت ولتاژ در خط}$$

$$Q_r = (V_s v_r t - V_r^2 t^2) \frac{1}{X} \quad \text{اگر طرفین به } \frac{V_r \cdot t^2}{X} \text{ ضرب شود.}$$

تحت این شرایط داریم :

$$V_s = V_r = V$$

$$tV^2(1-t) \frac{1}{X} = Q_T \quad \text{قدرت اتصال کوتاه} \quad S = \frac{V^2}{X}$$

$$St(1-t) = Q_T$$

Q_T مثبت است. V_s بزرگتر از V_r بوده و جریان از باس V_s بطرف V_r است. $t < 1$

Q_T منفی است. V_s کمتر از V_r بوده و جهت جریان قدرت راکتیو از V_r به طرف V_s است. $t > 1$

بنابراین با تنظیم مناسب ترانسفورماتور تبدیل مقدار توان راکتیو بین دو ناحیه کنترل می‌شود. در حالت پیشرفته می‌توان از تعداد دو ترانسفورماتور تنظیم تبدیل موازی بین دو ناحیه استفاده نمود. هرگاه یکی از ترانسفورماتورها در نسبت تبدیل off-nominal برابر 1:1.1 و دیگری در جهت مخالف یعنی 1:0.8 تنظیم

شوند در آن صورت جریان گردشی متناسب با توان راکتیو در حلقه بین دو ترانسفورماتور ظاهر می شود. این روش بنام Tap Stagger یا اتصال قابل تغییر نامیده شده و راه حل مناسبی برای جذب توان راکتیو می باشد.

ترانسفورماتور تقویت

Booster Transformers

Booster transformer = دو نوع هستند و ترانس های تنظیم کننده یا regulating trans هستند که ولتاژ را در جهت طولی تغییر می دهند (که قبلاً توضیح داده شده است) ترتیب سیم پیچ های سری و تحریک که در مدار قرار می گیرند صورت می گرفت در این ترانس ها سیم پیچ تحریک و سری از یک باس گرفته می شود. افزایش ولتاژ خواهیم داشت بدون Phase shift

تحریک سیم پیچ سری از خود همان فاز است. در حالیکه در حالت قبل تحریک سیم پیچ سری از دو فاز دیگر گرفته می شد که 90 نسبت به ولتاژ دیگر فاز اختلاف فاز دارند.

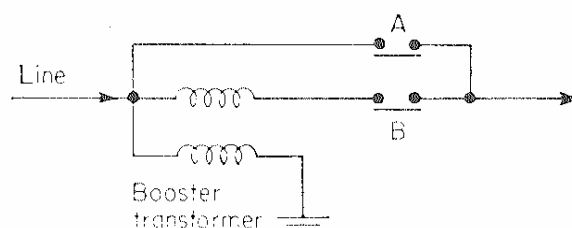
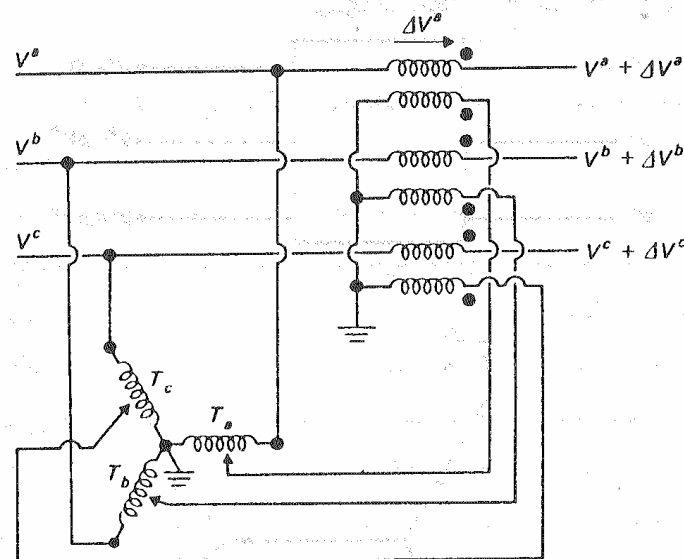


Figure 5.16 Connexion of in-phase booster transformer. One phase only shown.



(الف)



(ب)

ترانسفورماتور تنظیم مخصوص تنظیم دامنه ولتاژ

Example 5.5 In the system shown by the line diagram in Figure 5.17 each transformer T_A and T_B have tap ranges of ± 10 per cent in 14 steps of 1.43 per

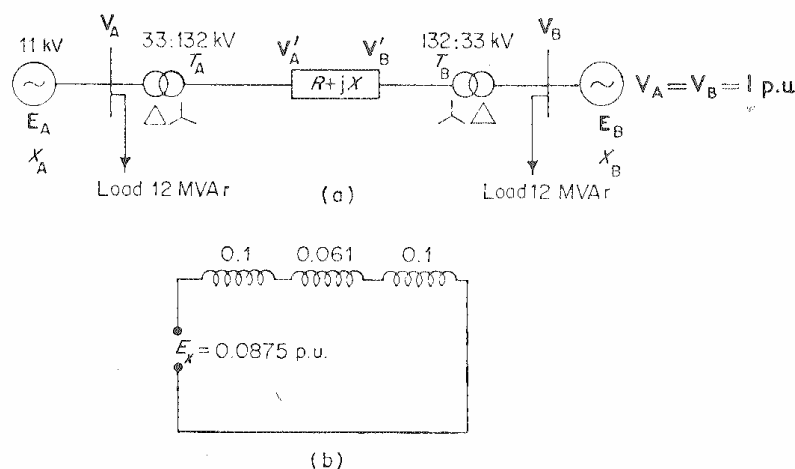
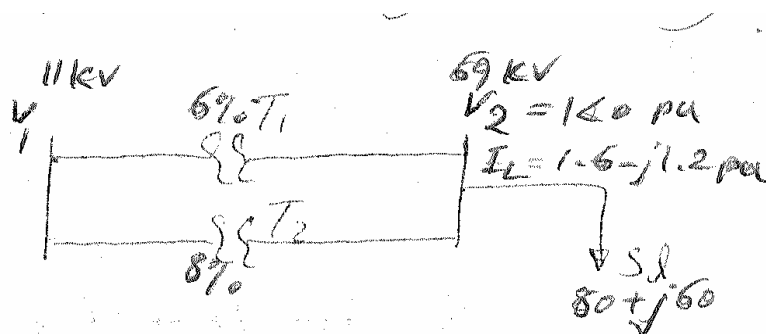


Figure 5.17 (a) Line diagram of system for Example 5.5. (b) Equivalent network with voltage boost E_x acting.

cent. Initially $V'_A = V'_B$ and hence no power or var transfer takes place through the line. It is required to calculate the magnitude of the circulating current resulting from an in-phase boost of 8.75 per cent on T_A , with the busbar voltages maintained constant by automatic voltage regulators on generators A and B. The plant data are as follows expressed on a 20 MVA base, resistance ignored. Generators A and B: 20 MVA, $X = 0.2$ p.u. Transformers T_A and T_B : 20 MVA, 132/33, $X = 0.1$ p.u.; 132 kV line, 8 km, $X = 3.85 \Omega = 0.061$ p.u.

مثال - در شکل زیر 2 ترانسفورماتور بطور موازي مورد بهره‌برداري قرار گرفته و قدرت را بين باس $V_1 = 11\text{KV}$ و باس $V_2 = 69\text{KV}$ انتقال مي‌دهند. S_L قدرت بار دريافتي $80\text{MW} + j60\text{MVAR}$ و تحت ولتاژ 50MVA تغذيه مي‌شود دو ترانسفورماتور داراي قدرت 50MVA مساوي هم بوده و ولتاژ نامي آنها $11/69\text{KV}$ است. دو ترانس قدرت 100MVA را تغذيه مي‌نمايند.



حال اگر امپدانس این ترانس ها با هم برابر بودند قدرت بطور مساوي بين دو ترانس تقسيم مي شد مسئله اي نبود اما امپدانس ترانس ها متفاوت است. $X_{T1} = j.06$, $X_{T2} = j.08$ است،

وقتي نسبت ترانس ها $\frac{1}{1}$ است يعني بدون تغيير دادن t.ch بار بطور مساوي بين آنها تقسيم نخواهد شد چون امپدانس ترانس 1 کمتر است Overload مي شود ولي T_2 تحت شرايط under load مورد استفاده قرار مي گيرد حال اگر بوسيله تغييرات نسبت ترانس ها تا چه اندازه مي توان بارها را بطور مطلوب بين ترانس ها تقسيم نمود. ميدانيم نسبت هر يك از ترانس ها بين 90-110% از نسبت نامي $a^0 = \frac{11}{69KV}$ در 32 مرحله يا پله step بطوريكه در هر مرحله يا پله $\frac{5}{8}\%$ تغيير يابد.

Nominal ratio تغيير پيدا خواهد كرد (هر کدام از اين 32 پله $\frac{5}{8}\%$ ولتاژ را تغيير خواهند داد).

حل : در صورتيكه هيچ اصلاحي صورت نمي گيرد حل مي كنيم پس بررسي مي كنيم كه با تغييرات مناسب بار را به شكل مطلوب مي توان بين دو خط تقسيم نمود :

$$S_b = 50MVA$$

$$V_b = 11KV, 69KV$$

چون 69KV ولتاژ V_2 را 1 پريونيت در نظر گرفته ايم.

$$I_L = 1.6 - j1.2 \quad S = VI_L^*$$

با داشتن شدت جريان مي توان شدت جريان هر خط را بدست آورد به نسبت عكس امپدانس ها.

$$I_{L1} = \frac{j.08}{j.08 + j.06} I_L = .914 - j.686 \text{ Pu}$$

$$I_{L2} = \frac{j.06}{j.08 + j.06} I_L = .686 - j.514 \text{ Pu} \quad \frac{|I_{L2}|}{|I_{L1}|} = \frac{6}{8} = .75$$

$$|I_{L1}| = 1.14$$

طرف 1 14 درصد Over load كار مي كند

$$|I_{L2}| = .86$$

طرف 2 14 درصد Under load كار مي كند

اختلاف ولتاژي كه مي خواهيم ايجاد كنيم فرض مي كنيم اختلاف ولتاژ ΔV در بين ثانويه ترانس 1 و ثانويه ترانس 2 وجود مي آوريم و اين اختلاف ولتاژ بايستي موجب ايجاد يك شدت جريان دوراني V_{I_L} كه از شدت جريان خط L_1 كم و به شدت جريان خط L_2 اضافه نمايد.

$$\Delta V \text{ اختلاف ولتاژ بين ثانويه } T_1 \text{ و ثانويه } T_2 \text{ شدت جريان دوراني } I_C = \frac{\Delta V}{Z_{\text{Loop}}} \text{ فرض مي شود تغييرات 1tap}$$

را فقط در يك ترانس انجام مي دهيم tap هاي T_2 را ثابت نگه داشته و tap ترانس 1 را مقداري افزايش مي دهيم

پس نسبت ترانس 2 روی مقدار نامی ثابت نگه می‌داریم روی ترانس 1 به اندازه Δa افزایش می‌دهیم :

$$a^0 = 11/69 \text{ KV}$$

$$T_2 : a^0 \rightarrow t_2 = \frac{a^0}{a^0} = 1$$

$$T_1 : a^0 + \Delta a \rightarrow t_1 = \frac{a^0 + \Delta a}{a^0} = 1 + \frac{\Delta a}{a^0}$$

$$T_2 \Delta a^0 = \frac{V_1}{V_2}$$

$\Delta a \cdot a_0 \rightarrow 0$ مقدار کوچکی است پس

اگر صورت و مخرج کسر را به V_2 تقسیم کنیم ΔV بر حسب Pu بدست می‌آید.

$$T_1 a^0 + \Delta a = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\Delta V = \frac{V_1}{a_0} - \frac{V_1}{a_0 + \Delta a} = \frac{V_1(a_0 + \Delta a) - V_1 a_0}{a_0(a_0 + \Delta a)} = \frac{V_1 \Delta a}{a_0^2 + \Delta a \cdot a_0} \cong \frac{V_1 \Delta a}{(a_0)^2}$$

$$\frac{\Delta V}{V_2} \cong \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\Delta a}{a_0^2} \text{ Pu } (\Delta V)_{\text{Pu}} \cong \frac{\Delta a}{a_0} \text{ Pu} \quad \text{به } V_1 = 1 \text{ Pu یا بر حسب پریونیت}$$

با داشتن شدت جریان دورانی می‌توان نسبت ترانس را بدست آورد.

$$I_C = \frac{\Delta a / a_0}{j./4} = \frac{\Delta V}{\Sigma X}$$

بصورت ترسیمی می‌توان

$$\begin{cases} I_1 = I_{L1} - I_C \\ I_2 = I_{L2} + I_C \end{cases} \rightarrow |I_{L1} - I_C| = |I_{L2} + I_C|$$

چون I_C فقط مؤلفه راکتیو دارند لذا $I_C = -jb$ (در کتاب $b \rightarrow a$ نوشته شده است)

$$-ja = \text{قدر مطلق شدت جریان دورانی}$$

$$|914 - j.686 + ja| = |.686 - j.514 - ja| \rightarrow a = .238$$

$$\frac{\Delta a}{a_0} = I_C (j.14) \rightarrow \frac{\Delta a}{a_0} = .0333 \text{ Pu} \rightarrow \begin{cases} t_2 = 1 \\ t_1 = 1 + \frac{\Delta a}{a^0} = \pm .0333 \end{cases} \quad \text{کل تغییرات}$$

در هر مرحله فقط $5/8\%$ این نسبت تغییر پیدا می‌کند.

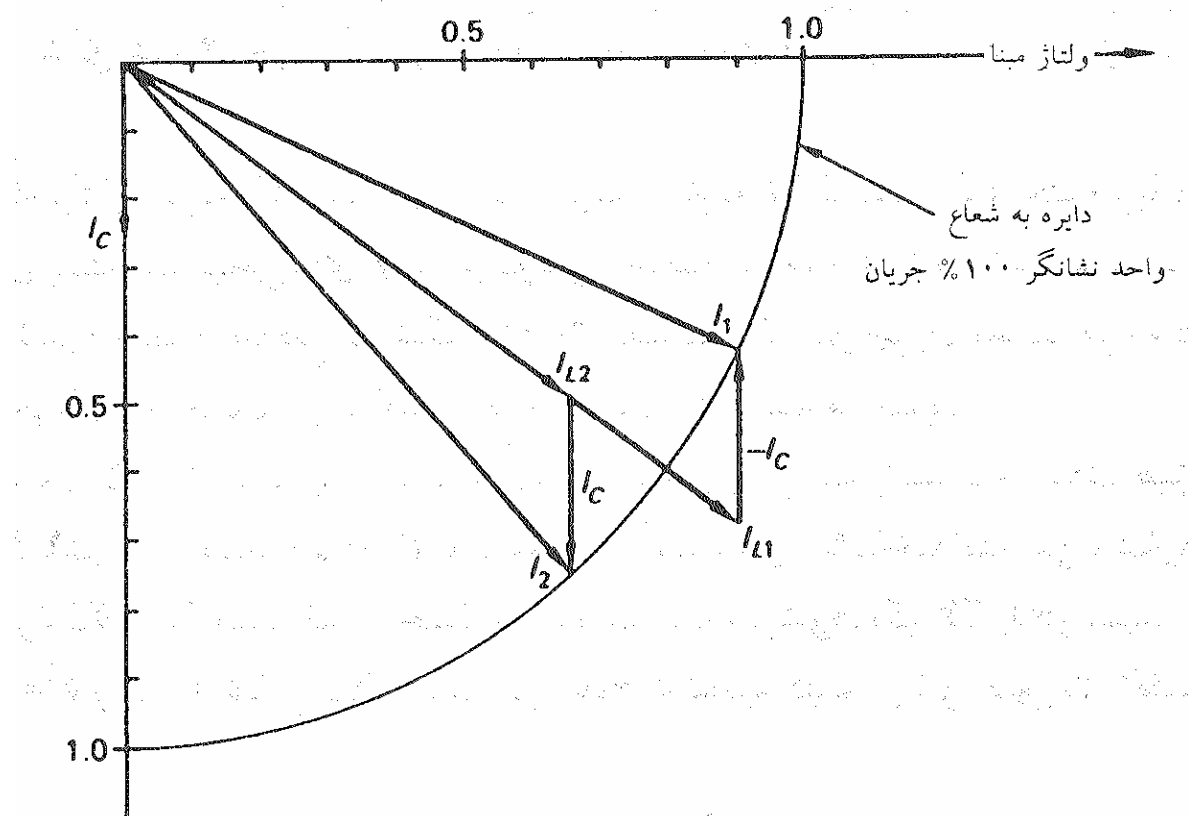
$$\text{تعداد پله} = \frac{t}{\text{تعداد پله}}$$

$$\frac{.0333}{(5/8) \frac{1}{1000}} = 5.33 = \text{تعداد پله}$$

تعداد پله‌ها

اگر ترانسفورماتور T_1 را 6 پله تغییر بدهیم اختلاف ولتاژ باعث می‌شود بار بطور مساوی بین خط تقسیم شود این 6 پله خوب است. اگر 3 پله یکی را افزایش می‌دهیم (T_1) دیگری را 3 پله کاهش دهیم (T_2) و بدین ترتیب به 6 پله برسیم.

روش ترسیم آموزنده است. I_C در خلاف جهت I_{L1} است. مقدار I_C بایستی طوری انتخاب شود که I_{L1} بعد از I_C روی دایره بیفتد و I_C روی شدت جریان I_{L2} اضافه شده و آنرا روی دایره بیندازد.



محاسبه جریان گردشی به روش ترسیمی

Voltage Stability

Voltage Control in Distribution Networks

Voltage Control in Long Lines

فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

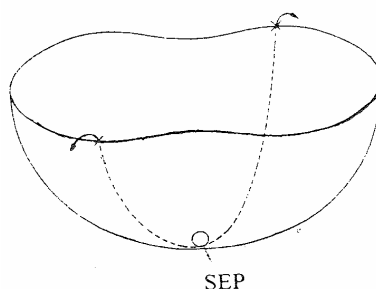
Power System Stability & Control

۱-۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا

روش های مستقیم پایداری را بدون حل صریح معادلات دیفرانسیل سیستم تعیین می کنند. این روش، از نظر اکادمیک جذاب است و از زمان کارهای اولیه ماگنوسن و آیلر، که انرژی گذرا را برای ارزیابی پایداری گذرا به کار گرفتند، تاکنون توجه زیادی را به خود جلب کرده است. روشهای مبتنی بر انرژی، حالت خاصی از روش کلی دوم لیاپانوف یا روش مستقیم است و تابع انرژی، یک تابع مناسب لیاپانوف است. این بخش مفاهیم اساسی را توضیح می دهد که روشهای مستقیم بر آنها استوار شده است.

۲-۷ توصیف روش تابع انرژی گذرا

همانطور که در شکل زیر نشان داده شده است، روش انرژی گذرا را میتوان با در نظر گرفتن تویی که بر روی سطح داخلی یک کاسه می چرخد توصیف کرد. محدوده داخل کاسه نشان دهنده ناحیه پایداری است و محدوده خارج آن ناپایداری را نشان می دهد. لبه کاسه، صورت نامنظمی دارد و از این رو نقاط مختلف روی لبه دارای ارتفاعات متفاوتی هستند.



نمایش توپ چرخان بر روی سطح داخلی یک کاسه

در آغاز توپ در پایین کاسه در حالت سکون است، این حالت را نقطه تعادل پایدار (Stable Equilibrium Point) می نامند. هنگامی که مقداری انرژی جنبشی به توپ وارد شود، توپ در جهت خاصی حرکت می کند و بر روی سطح داخلی کاسه بر روی مسیری که با جهت حرکت اولیه تعیین می گردد به طرف بالا غلت خواهد زد. نقطه ای که توپ از حرکت باز خواهد ایستاد با مقدار اولیه انرژی پتانسیل وارد شده به سیستم تعیین میشود. اگر توپ قبل از آنکه به لبه کاسه برسد تمامی انرژی جنبشی خود را به انرژی پتانسیل تبدیل کند، به طرف پایین غلت می خورد و در نهایت بعد از مقداری رفت و برگشت در نقطه تعادل پایدار، مستقر خواهد شد. لیکن اگر انرژی جنبشی وارد بر سیستم به اندازه کافی بزرگ باشد، توپ به لبه کاسه رسیده و از آن بیرون می افتد. در این صورت توپ به محدوده ناپایداری وارد می شود و به نقطه تعادل پایدار، باز نخواهد گشت. سطح داخل کاسه، سطح انرژی پتانسیل و لبه کاسه، سطح مرزی انرژی پتانسیل (Potential Energy Boundary Surface) را نشان می دهند.

برای تعیین اینکه آیا توپ وارد محدوده ناپایداری خواهد شد یا نه، دو کمیت لازم است: الف) انرژی اولیه جنبشی وارد شده به سیستم و ب) ارتفاع لبه در نقطه عبور، موقعیت نقطه عبور به جهت حرکت اولیه بستگی دارد.

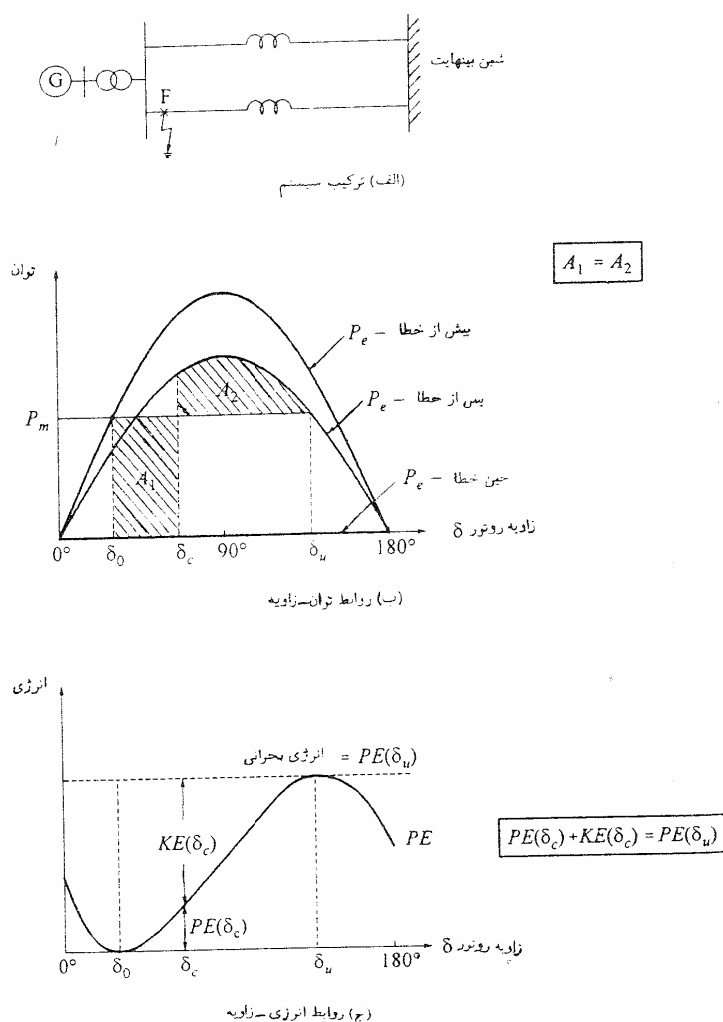
۲-۷ کاربرد در سیستمهای قدرت

اصول لازم برای اعمال روش تابع انرژی گذرا (TEF Transient Energy Function) به تحلیل پایداری سیستم قدرت، به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز، سیستم در یک نقطه تعادل پایدار عمل می نماید؛ اگر خطایی رخ دهد، تعادل دچار اغتشاش می شود و ماشینهای سنکرون شتاب می گیرند. در طول زمان خطا، سیستم قدرت مقداری انرژی جنبشی و پتانسیل می گیرد و از SEP دور می شود. بعد از رفع خطا، سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی به بالای سطح انرژی پتانسیل، به انرژی پتانسیل تبدیل می کند. برای اجتناب از ناپایداری در زمانیکه نیروهای وارد بر ژنراتور سعی در آوردن آنها به طرف موقعیتهای تعادل جدید دارند، سیستم باید توانایی جذب انرژی جنبشی را داشته باشد. این موضوع به توانایی جذب انرژی پتانسیل به وسیله سیستم بعد از اغتشاش، بستگی دارد. در یک ترکیب مشخص و پس از بروز اغتشاش در شبکه، مقدار انرژی گذرای حداکثری وجود دارد که سیستم توانایی جذب آنرا دارد. در نتیجه، ارزیابی پایداری گذرا مستلزم موارد ذیل است:

الف) توابعی که بطور کافی انرژی گذرای مسبب جداسازی یک یا چند ماشین سنکرون از باقیمانده سیستم را توصیف می کنند.

ب) تخمینی از انرژی بحرانی مورد نیاز برای از دست دادن سنکرونیسم.

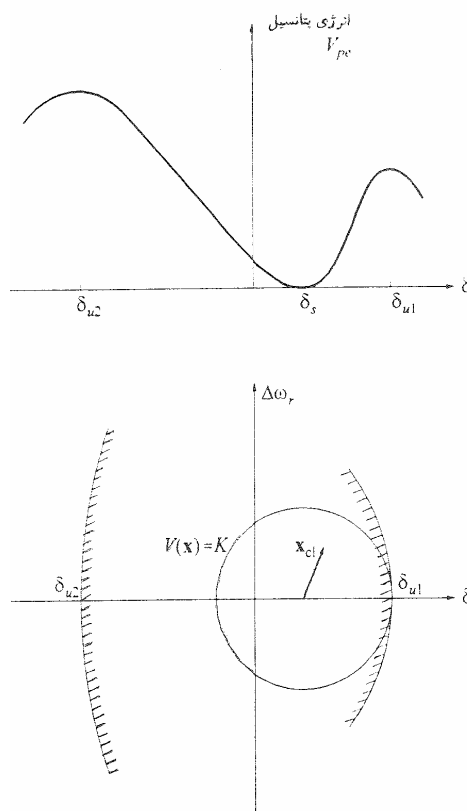
برای یک سیستم دو ماشینیه، انرژی بحرانی به طور منحصر به فردی تعریف میشود و تحلیل TEF معادل با معیار سطوح مساوی توضیح داده شده در فصل پایداری گذرا است. این موضوع در شکل زیر نمایش داده شده است، که دو نمودار را با زاویه روتور (δ) بعنوان محور افقی نشان می دهد. نمودار بالا معیار سطوح مساوی را نشان می دهد، که در آن زاویه بحرانی رفع (δ_c) از تساوی سطوح A_1 و A_2 به دست می آید. نمودار پایین روش انرژی گذرا را نمایش می دهد که از آن می توان برای مشخص کردن زاویه بحرانی رفع بر حسب انرژی جنبشی و پتانسیل استفاده کرد. انرژی جنبشی به دست آمده در طول دوره وجود خطا با انرژی پتانسیل در زاویه روتور متناظر جمع می شود و برای تعیین پایداری، با انرژی پتانسیل بحرانی مقایسه می گردد.



نمایش معادل بودن روش انرژی گذرا و معیار سطوح معادل

با بروز اغتشاش، نقطه تعادل پایداری برای سیستم پس از خطا وجود خواهد داشت. می توان برای این SEP پس از خطا ناحیه جذبی را مطابق شکل زیر تعریف کرد. بطوریکه هر مسیر سیستم پس از خطا در حالتی

که حالت سیستم در رفع خطا (x_d) در راخل این ناحیه جذب قرار داشته باشد، در نهایت به سمت SEP همگرا خواهد شد و سیستم پایدار می ماند. از طرف دیگر، اگر x_d خارج از ناحیه جذب قرار داشته باشد، سیستم پس از خطا به نقطه تعادل پایدار همگرا نمی شود و آنرا ناپایدار می نامند.



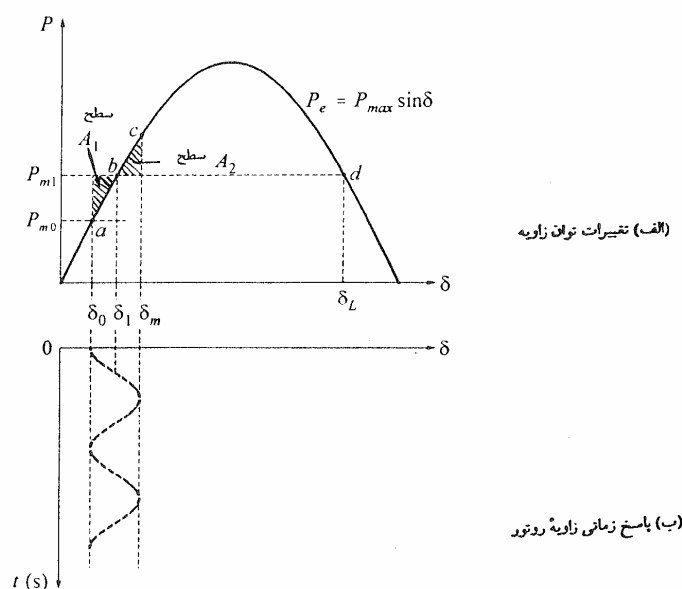
ناحیه پایدار و تقریب محلی فن

حالت سیستم در رفع خطا (x_d) را می توان با مقدار تابع انرژی محاسبه شده در x_d ، به عبارت دیگر $V(x_d)$ توصیف کرد. از این رو روش مستقیم، مساله پایداری را با مقایسه $V(x_{cl})$ با انرژی بحرانی V_{cr} حل می کند. سیستم پایدار است اگر $V(x_{cl})$ کمتر از V_{cr} باشد و کمیت $V_{cr} - V(x_{cl})$ معیار خوبی از پایداری نسبی سیستم است. این کمیت بعنوان حاشیه انرژی گذرا تعریف می شود.

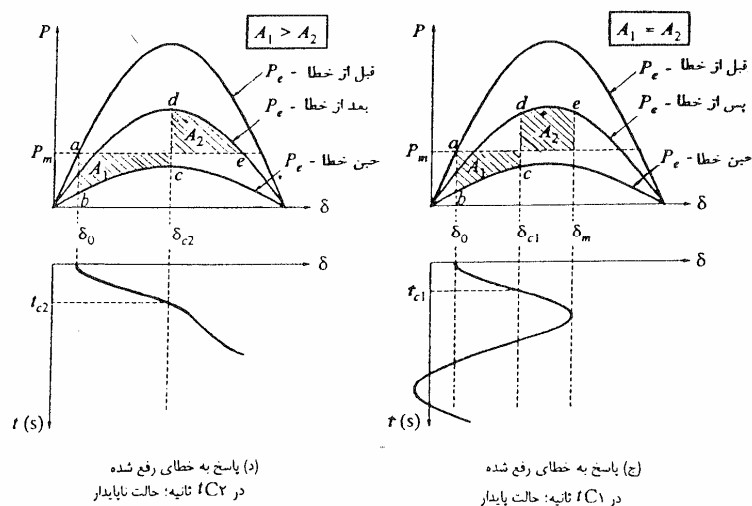
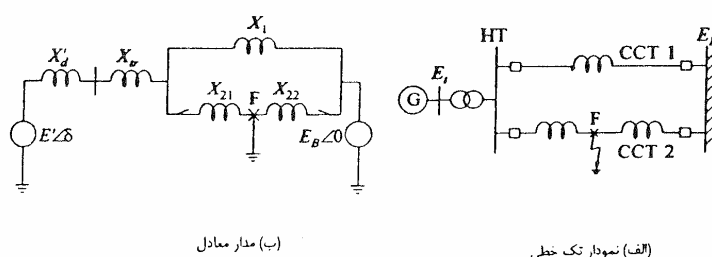
کمیت $V(x_{cl})$ ، مقدار انرژی گذرای وارد به سیستم به وسیله خطا را اندازه گیری می کند. حال آنکه انرژی بحرانی، قدرت سیستم را پس از خطا اندازه گیری می کند. به طور دقیق تر، انرژی بحرانی توانایی سیستم را در جذب انرژی پس از خطا، اندازه گیری می کند.

با مراجعه به شکل فوق ملاحظه می شود اگر روتور در گستره δ_{u1} تا δ_{u2} نوسان کند، سیستم پایدار گذرا باقی می ماند و اگر فراتر از این نوسان کند سیستم ناپایدار خواهد شد. از این رو نقاط δ_{u1} و δ_{u2} بر روی

منحنی انرژی پتانسیل، مرزی را برای کلیه مسیرهای زاویه روتور پایدار تشکیل می دهند. این مرز را سطح مرزی انرژی پتانسیل (PEBS) می نامند و نقاط روی این مرز اوجهای محلی انرژی پتانسیل هستند. مرز ناحیه پایداری، همانطور که در شکل فوق نشان داده شده است، معمولا با یک سطح انرژی ثابت $\{V(x)=k\}$ تقریب زده میشود که در آن k نشاندهنده انرژی بحرانی V_{CR} سیستم پس از خطا می باشد.



پاسخ به تغییر پله ای در ورودی توان مکانیکی



ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

مقدمه ای بر مساله پایداری سیستم های قدرت

در این فصل به معرفی کلی مساله پایداری قدرت شامل مفاهیم فیزیکی، طبقه بندی و تعارف واژه های مربوطه پرداخته می شود. بررسی ساختار های ابتدایی سیستم قدرت با استفاده از مدلسازی ایده آل، ویژگی های اساسی پایداری سیستم قدرت را نشان می دهد. به علاوه، بر پیدایش انواع مسائل پایداری که در حین تکامل سیستم های قدرت شکل گرفته، ضروری شده، بسط و توسعه روش های مطالعه آنها شرح داده خواهد شد. هدف این است که دیدگاه کلی از پدیده پایداری سیستم قدرت عرضه شود و پایه لازم بر اساس دلایل فیزیکی نسبتاً ساده بنیانگذاری گردد. این موضوع کمک خواهد کرد که در فصول آینده به بررسی جامع موضوع از جنبه های مختلف پرداخته شود.

۲ - ۱ مفاهیم اولیه و تعاریف

پایداری سیستم قدرت را می توان به طور کلی آن ویژگی از سیستم قدرت دانست که آن را قادر می سازد تا تحت وضع عادی، در حالت تعادل باقی بماند و در صورتی که تحت تاثیر اغتشاشی قرار گیرد، مجدداً حالت قابل قبول متفاوتی را به دست آورد. ناپایداری در یک سیستم قدرت ممکن است بستگی به ترکیب سیستم و حالت کاری آن به شکل های مختلفی بروز کند. معمول بوده است که مساله پایداری را به عنوان مساله حفظ عملکرد سنکرون ژنراتور ها بشناسند. از آنجا که تولید در سیستم قدرت بر پایه ماشین های سنکرون (ژنراتور ها) استوار است، شرط لازم برای عملکرد قابل قبول سیستم این است که همه ماشین های مزبور با یکدیگر در حالت سنکرون یا هماهنگ باقی بمانند. این جنبه پایداری تحت تاثیر دینامیک روابط زاویه روتور و توان حقیقی - زاویه ژنراتور قرار دارد.

همچنین ممکن است سیستم بدون آنکه سنکرون از دست برود، ناپایدار شود. به عنوان مثال ممکن است سیستمی شامل یک ماشین سنکرون که از طریق یک خط انتقال، یک موتور القائی را تغذیه می کند، در اثر

فروپاشی ولتاژ بار، ناپایدار شود. حفظ عملکرد سنکرون در این حالت مطرح نیست بلکه مسأله، پایداری و حفظ ولتاژ است. این نوع ناپایداری می تواند در مورد بارهایی که در یک محدوده وسیع قرار دارند و از یک سیستم بزرگ تغذیه می شوند نیز اتفاق افتد.

در ارزیابی پایداری، مسأله مهم رفتار سیستم در زمانی است که تحت تأثیر یک اغتشاش گذرا قرار گیرد. اغتشاش ممکن است کوچک یا بزرگ باشد. اغتشاش های کوچک به شکل تغییرات بار دائما اتفاق می افتد و سیستم خود را با وضعیت متغیر حاصل، تنظیم می کند. سیستم باید قادر باشد که تحت این حالت، عملکرد قابل قبولی داشته باشد و بتواند حداکثر مقدار بار را تأمین نماید. نیز باید بتواند در مقابل اغتشاش های سخت از قبیل اتصال کوتاه یک خط انتقال، از دست دادن یک ژنراتور یا بار بزرگ و یا از دست دادن خط ارتباطی بیت دو زیرسیستم، مقاوم باقی بماند. عملکرد سیستم در مقابل اغتشاش عمدتاً ناشی از نحوه عملکرد تجهیزات تشکیل دهنده آن است. به عنوان مثال، اتصال کوتاهی که بر یک جزء حساس واقع می شود و آن جزء به وسیله رله های محافظ از سیستم جدا می گردد، باعث می شود که تغییراتی را در توان های انتقالی خطوط ارتباطی، سرعت های روتور ژنراتورها و ولتاژ شینها داشته باشیم. تغییرات ولتاژ خود باعث عملکرد تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتورها و سیستم انتقال می شود، حال آنکه تغییرات سرعت روتور ژنراتورها، گاورنر محرکها (توربین ها) را به عکس العمل و می دارد. تغییرات در توان های انتقالی خطوط ارتباطی ممکن است سیستم های کنترل تولید را به کار اندازد. تغییرات ولتاژ و فرکانس باعث می شود که بستگی به مشخصات آنها، بارهای سیستم به درجات متفاوتی تغییر نماید. به علاوه، سیستم های محافظ اجرا ممکن است نسبت به تغییرات در متغیرهای سیستم، عکس العمل نشان دهد و بدینگونه بر عملکرد سیستم تأثیر بگذارد. با وجود این، در هر وضع بخصوص، عکس العمل تعداد محدودی از تجهیزات ممکن است قابل توجه باشد. از این رو معمولاً فرضیات زیادی انجام می پذیرد تا مسأله، ساده شود و بتوان کار را بر روی عواملی که بر روی یک مسأله پایداری بخصوص تأثیر می گذارند، متمرکز کرد. درک مسأله پایداری را می توان تا حد زیادی با طبقه بندی آن به انواع مختلف، تسهیل کرد.

بخش هایی که به دنبال می آید انواع مختلف ناپایداری سیستم های قدرت به همراه مفاهیم مربوط و نیز در موارد لازم، ترکیب ساده سیستم قدرت را مطرح می نماید. بررسی چنین سیستم هایی با استفاده از مدل های ایده آل کمک می نماید تا ویژگی های اساسی هر شکل از شکل های پایداری را تشخیص داد.

۱-۱-۲ پایداری زاویه ای روتور

پایداری زاویه ای روتور توانایی ماشین های به هم پیوسته سنکرون یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون با یکدیگر باقی بمانند. مسأله پایداری در این حالت شامل مطالعه نوسان های الکترومکانیکی است که به طور ذاتی در سیستم های قدرت وجود دارد. عامل مهم در این مسأله، نحوه رفتار توان های خروجی ماشین های سنکرون در مقابل نوسان های روتور آنهاست. در گام اول، بحث کوتاهی در خصوص مشخصه های ماشین های سنکرون می تواند درک مفاهیم اولیه مربوطه، مفید واقع شود.

مشخصه های ماشین های سنکرون

مشخصه ها و مدلسازی ماشین های سنکرون به طور مفصل در فصل سوم، چهارم و پنجم مطرح خواهد شد. در این جا بحث به مشخصه های اولیه مربوط به عملکرد سنکرون محدود می شود.

یک ماشین سنکرون دو جزء اساسی شامل تحریک و آرمچر دارد. معمولاً، تحریک روی روتور و آرمچر روی استاتور واقع است. سیم پیچ تحریک با استفاده از جریان مستقیم تغذیه می شود. زمانی که روتور را با یک تحریک (توربین) بچرخانیم، میدان مغناطیسی دوار سیم پیچ تحریک، ولتاژهای متناوبی در سه فاز سیم پیچ های آرمچر استاتور، القا می نماید. فرکانس ولتاژ متناوب القا شده و جریان های حاصل در سیم پیچ های استاتور (زمانی که بار به آن متصل است) بستگی به سرعت روتور دارد. از این رو مشاهده می شود که فرکانس متغیرهای الکتریکی استاتور با سرعت مکانیکی روتور، سنکرون یا هماهنگ شده اند. از این روست که واژه ماشین سنکرون به کار می رود.

زمانی که دو یا چند ماشین سنکرون به یکدیگر متصل می شوند، باید ولتاژ و جریان استاتور همه ماشین ها دارای فرکانس باشند و سرعت مکانیکی هر یک از این فرکانس، هماهنگ باشند. از این رو روتور تمام ماشین های سنکرون به هم پیوسته، باید با یکدیگر سنکرونیزه باشند.

ترکیب فیزیکی (توزیع فضایی) سیم پیچ های آرمچر استاتور به گونه ای است که جریان های متغیر با زمان که از سیم پیچهای سه فاز عبور می کنند، در حالت ماندگار میدان مغناطیسی دوار را ایجاد می کنند که با سرعت روتور می چرخد (به فصل سوم بخش ۳-۱-۳ مراجعه شود). میدان های روتور و استاتور بر یکدیگر تأثیر می گذارند و از اینکه دو میدان سعی می کنند در یک جهت قرار گیرند، گشتاور الکترومغناطیسی ایجاد می شود. در یک ژنراتور، این گشتاور با جهت حرکت روتور مقابله می کند به گونه ای که لازم است گشتاور مکانیکی به وسیله توربین اعمال شود تا چرخش روتور همچنان حفظ گردد. گشتاور (یا توان) الکتریکی خروجی ژنراتور تنها زمانی تغییر می کند که گشتاور ورودی مکانیکی که به وسیله محرک اعمال می شود، تغییر نماید. تأثیر افزایش گشتاور مکانیکی آن است که روتور را در وضعیت جدیدی قرار می دهد که نسبت به میدان دوار مغناطیسی استاتور جلوتر واقع می شود. یا برعکس، کاهش گشتاور یا توان مکانیکی ورودی، روتور را عقب تر از میدان دوار مغناطیسی استاتور قرار می دهد. در حالت ماندگار، میدان روتور و میدان دوار حاصل از جریان های استاتور دارای سرعت مشابه هستند. با وجود این، مقداری اختلاف زاویه ای بین آنها وجود دارد که بستگی به گشتاور (توان) خروجی الکتریکی ژنراتور دارد. در یک موتور سنکرون نقش گشتاور های الکتریکی و مکانیکی نسبت به آنچه که در ژنراتور وجود دارد، جابجا می شود. گشتاور الکتریکی چرخش حفظ می کند حال آنکه بار مکانیکی با چرخش، مخالفت می کند. افزایش بار مکانیکی باعث عقب افتادن موقعیت روتور نسبت به میدان دوار استاتور می شود.

در بحث فوق دو واژه توان و گشتاور توأماً استفاده شد. این مسأله در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت رایج است زیرا که سرعت چرخشی متوسط ماشین ها ثابت است هر چند که ممکن است تغییرات زود گذری،

بالا و پایین سرعت سنکرون اتفاق افتد. در حقیقت مقادیر توان و گشتاور در مبنای واحد، تقریباً با هم مساوی است.

رابطه توان – زاویه

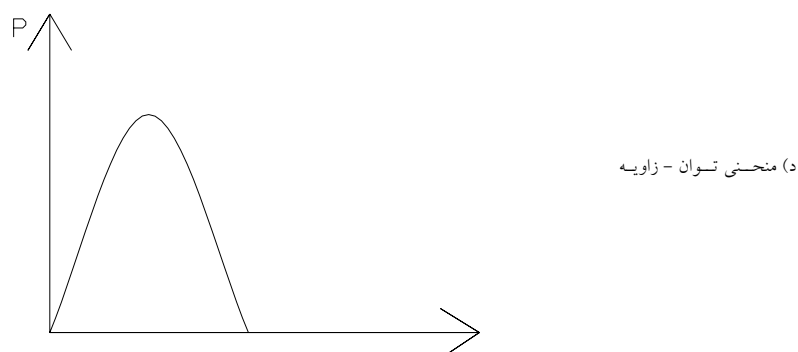
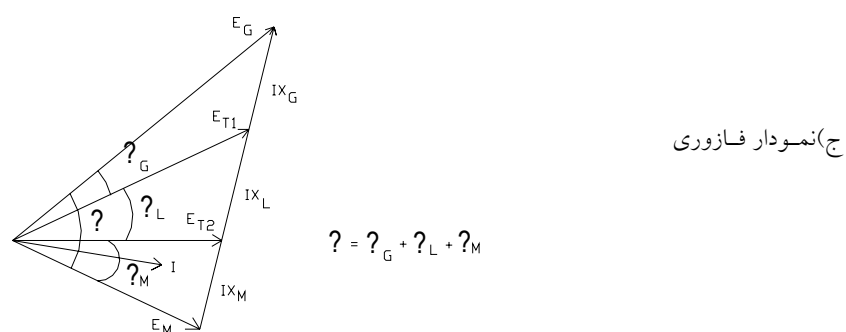
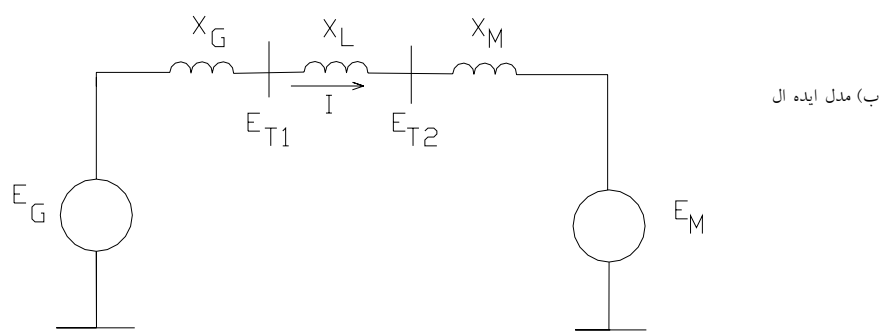
مشخصه مهمی که در خصوص پایداری سیستم قدرت اهمیت دارد رابطه بین توان مبادله شده و موقعیت زاویه ای روتور ماشین سنکرون است. این رابطه به شدت غیر خطی است. برای نشان دادن موضوع، سیستم ساده شکل ۱-۲ "الف" را در نظر بگیرید. این سیستم شامل دو ماشین سنکرون است که از طریق خط انتقالی با راکتانس X_L به یکدیگر متصل شده اند. از مقاومت و ظرفیت خازنی خط صرف نظر شده است. فرض کنید که ماشین شماره ۱ ژنراتور سنکرونی است که ماشین شماره ۲ را، که یک موتور سنکرون است، تغذیه می کند. توان انتقال یافته از ژنراتور به موتور تابعی از زاویه δ است که اختلاف زاویه بین روتورهای دو ماشین را نشان می دهد. زاویه δ

خود از سه مولفه تشکیل شده است: یکی زاویه داخلی ژنراتور به نام δ_G (که زاویه ای است که روتور ژنراتور نسبت به میدان حاصل از استاتور آن جلوتر است)، دیگری δ_L . اختلاف زاویه بین ولتاژهای پایانه ژنراتور و موتور (یعنی زاویه ای که میدان استاتور ژنراتور از میدان استاتور موتور جلوتر است) و دیگری δ_M ، زاویه داخلی موتور (که زاویه ای است که روتور موتور نسبت به میدان حاصل از استاتور عقبتر است). شکل ۱-۲ "ب" مدلی از سیستم را نشان می دهد که به کمک آن می توان رابطه توان – زاویه را به دست آورد. برای هر ماشین، مدل ساده ای شامل یک منبع داخلی ولتاژ و یک راکتانس موثر فرض شده است. مقدار راکتانس ماشین، بستگی به نوع مطالعه ای دارد که در پی آن هستیم. برای مطالعات حالت ماندگار، کافی است که راکتانس سنکرون ماشین را به همراه ولتاژ تحریک به عنوان منبع داخلی ولتاژ به کار برد. اساس لازم برای چنین مدلی و تقریبهایی را که در آن به کار رفته در فصل سوم بیان خواهیم کرد. نمودار فازوری که ارتباط بین ولتاژها را نشان می دهد در شکل ۱-۲ "ج" نشان داده شده است. توان انتقالی از ژنراتور به موتور برابر است با:

$$P = \frac{E_G E_M}{X_T} \sin \delta \quad (1-2)$$

$$X_T = X_G + X_L + X_M \quad \text{که:}$$

رابطه توان – زاویه در شکل ۱-۲ "د" رسم شده است. با مدل های نسبتاً ایده آلی که برای ماشین ها فرض شد، رابطه بدست آمده به صورت سینوسی است که رابطه کاملاً غیر خطی را نشان می دهد. با مدل های دقیق تر ماشین، که تأثیر سیستم های تحریک (تنظیم کننده های خود کار ولتاژ) را نیز در نظر گرفته، رابطه توان – زاویه به میزان زیادی از حالت سینوسی خارج می شود اما به هر حال شکل کلی آن باز هم مشابه است.



شکل ۱-۲ مشخصه انتقال توان یک سیستم دو ماشین

زمانی که زاویه صفر است هیچ توانی مبادله نمی شود. هر چه زاویه افزایش داده شود توان نیز افزایش می یابد تا به حداکثر خود برسد. اگر زاویه از 90° بیشتر شود، توان، کاهش می یابد. از این رو در حالت مانگار می توان حداکثر توانی مشخص را از ژنراتور به موتور منتقل کرد. مقدار این توان مستقیماً با ولتاژهای داخلی ژنراتور. موتور به طور معکوس با مجموع راکتانس های هر دو ماشین و خط انتقال، متناسب است.

زمانی که بیش از دو ماشین وجود داشته باشد، موقعیت نسبی روتورها نسبت به هم بر تبادیل توان به طور مشابهی تأثیر می‌گذارد. با وجود این، مقادیر حداکثر توان‌های مبادله شده و اختلاف زوایا تابعی پیچیده از توزیع، تولید و بار است. اختلاف زاویه 90° بین هر دو ماشین (که در مورد حالت دو ماشین محدود کننده بود) به خودی خود هیچ اهمیت مشخصی ندارد.

پدیده پایداری

پایداری حالت تعادل بین نیروهای متضاد را نشان می‌دهد. مکانیزمی که به وسیله آن ماشین‌های سنکرون به هم پیوسته، حالت سنکرون را بین یکدیگر حفظ می‌کنند از طریق نیروهای باز یافت است که، زمانی عمل می‌نماید که نیروهایی وجود داشته باشند یا چند ماشین را نسبت به سایر ماشین‌ها شتاب مثبت یا منفی دهد. در حالت ماندگار، تعادل بین گشتاور میکائیکی ورودی و گشتاور الکتریکی خروجی وجود دارد و سرعت، ثابت باقی می‌ماند. اگر سیستم دستخوش تغییر شود این تعادل از بین می‌رود و در نتیجه روتور ماشین‌ها بر اساس قوانین حرکت اجسام دوار، شتاب مثبت یا منفی پیدا می‌کند. اگر به طور موقت ژنراتوری نسبت به دیگری سریعتر بچرخد، موقعیت زاویه ای روتور آن نسبت به ماشین‌های کندتر، جلوتر قرار می‌گیرد. بسته به رابطه توان - زاویه، اختلاف زاویه بین روتور بین دو ماشین باعث می‌شود تا بخشی از بار ماشین‌ها به ماشین‌ها منتقل شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف سرعت و در نتیجه اختلاف زاویه روتورها کاهش یابد. همچنان که ذکر شد، رابطه توان - زاویه شدت غیر خطی است. بالاتر از حد مشخصی، افزایش در اختلاف زاویه، باعث کاهش در توان مبادله شده می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که اختلاف زاویه باز هم بیشتر شود و منجر به ناپایداری گردد. در هر وضعیت بخصوص، پایداری سیستم به این بستگی دارد که آیا انحراف زوایای روتور ماشین‌ها منجر به گشتاورهای باز یافت کافی می‌شود یا خیر. زمانی که یک ماشین سنکرون، حالت سنکرونیزه یا هماهنگ خود با سایر ماشین‌ها را از دست داد، روتور آن در سرعتی بالاتر یا پایین‌تر از سرعتی که برای تولید ولتاژ در فرکانس سیستم لازم است، می‌چرخد. اغزش بین میدان دوار استاتور (مربوط به فرمانس سیستم) و تحریک روتور منجر به تغییرات بزرگی در توان خروجی، جریان و ولتاژ ماشین می‌شود. این موضوع باعث می‌شود که سیستم‌های حفاظتی، ماشین‌های ناپایدار را از سیستم جدا کنند.

از دست رفتن حالت سنکرونیزه ممکن است بین یک ماشین و بقیه سیستم یا بین گروهی از ماشین‌ها اتفاق افتد. در حالت دوم، ممکن است بعد از جدائی گروه‌ها از یکدیگر، حالت سنکرونیزه بین ماشین‌های هر گروه را حفظ کرد.

عملکرد سنکرونیزه ماشین‌های سنکرون به هم پیوسته را می‌توان به مجموعه‌ای از خودروهای تشبیه کرد که به کمک تسمه‌های لاستیکی به یکدیگر متصل شده‌اند و در یک مسیر دایره‌وار می‌چرخند. روتور ماشین‌های سنکرون به خودرو و خطوط انتقال به تسمه تشبیه شده است. زمانی که خودروها با یکدیگر هم نوا و هم سرعت باشند تسمه‌های لاستیکی دست نخورده باقی می‌مانند. زمانی که نیروی یکی از خودروها

افزایش یابد، سرعت آن نیز موقتاً افزایش می یابد. این موضوع باعث می شود که تسمه متصل به آن کش بیابد که در نتیجه سرعت آن کاهش و سرعت سایر خودروها افزایش می یابند. بدین ترتیب عکس العملی زنجیروار اتفاق می افتد تا مجدداً تمام خودروها در سرعت مشابه ادامه طریق دهند. اگر نیروی وارده به یکی از تسمه ها از حد توانایی آن بیستر شود، پاره می شود و باعث می شود که یک یا چندین خودرو از سایر خودروها جدا شوند.

در سیستم های قدرت می توان با بروز اغتشاش، تغییرات گشتاور الکتریکی یک ماشین سنکرون را، به دو مولفه تجزیه کرد:

$$\Delta T_e = T_s \Delta \delta + T_D \Delta \omega \quad (2-2)$$

که $T_s \Delta \delta$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات زاویه روتور، $\Delta \delta$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفه گشتاور سنکرون کننده یاد می شود. T_s ، ضریب گشتاور سنکرون کننده است. $T_D \Delta \omega$ مولفه ای از تغییرات گشتاور است که با تغییرات سرعت، $\Delta \omega$ ، هم فاز است و از آن به نام مولفه گشتاور میرا کننده یاد می شود. T_D ، نیز ضریب گشتاور میرا کننده است.

پایداری سیستم بستگی به وجود هر دو مولفه گشتاور برای هر ماشین سنکرون دارد. کمبود گشتاور سنکرون کننده منجر به ناپایداری از طریق رانش غیر نوسانی زاویه روتور می شود. از طرف دیگر، کمبود گشتاور میرا کننده هم منجر به ناپایداری نوسانی می شود. به منظر سهولت در امر بررسی پایداری و کسب نگرشی مفید بر طبیعت مسائل پایداری، مناسب است که پایداری زاویه روتور را بر حسب دو طبقه بندی ذیل، تقسیم کرد:

(الف) پایدار اغتشاش کوچک یا سیگنال کوچک، توانایی سیستم را برای حفظ حالت سنکرونیزه در اثر اغتشاش های کوچک نشان می دهد. این اغتشاش ها به علت تغییرات کوچک بار و تولید، دائماً اتفاق می افتد. اغتشاش ها را می توان به اندازه کافی کوچک به حساب آورد تا اجازه خطی کردن معادلات سیستم را برای بررسی پایداری داشته باشیم. ناپایداری که ممکن است اتفاق بیفتد به دو صورت باشد: یکی اینکه زاویه روتور به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده دائماً افزایش یابد و دیگری حالتی که به کمبود توان میرا کننده، نوسان های روتور با دامنه در حال افزایش اتفاق افتد. عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های کوچک، به عوامل چندی از جمله: نقطه کار اولیه، قدرت سیستم انتقال و نوع سیستم کنترل تحریک بستگی دارد. برای ژنراتوری که به طور شعاعی به یک سیستم قدرت بزرگ متصل است، ناپایداری در غیاب تنظیم کننده های خودکار ولتاژ (AVR) (یعنی با ولتاژ تحریک ثابت)، به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده، اتفاق می افتد. این مسأله منجر به ناپایداری غیر نوسانی مطابق با شکل ۲-۲-الف می شود. با وجود تنظیم کننده های خودکار ولتاژ، زمانی سیستم در مقابل اغتشاش کوچک پایدار است که اطمینان حاصل شود نوسان های سیستم میرایی کافی دارند. ناپایداری معمولاً خود را به صورت نوسان هایی با دامنه در حال افزایش نشان می دهد. شکل ۲-۲-ب "عکس العمل سیستم را با وجود تنظیم کننده خودکار ولتاژ به تصویر کشیده است.

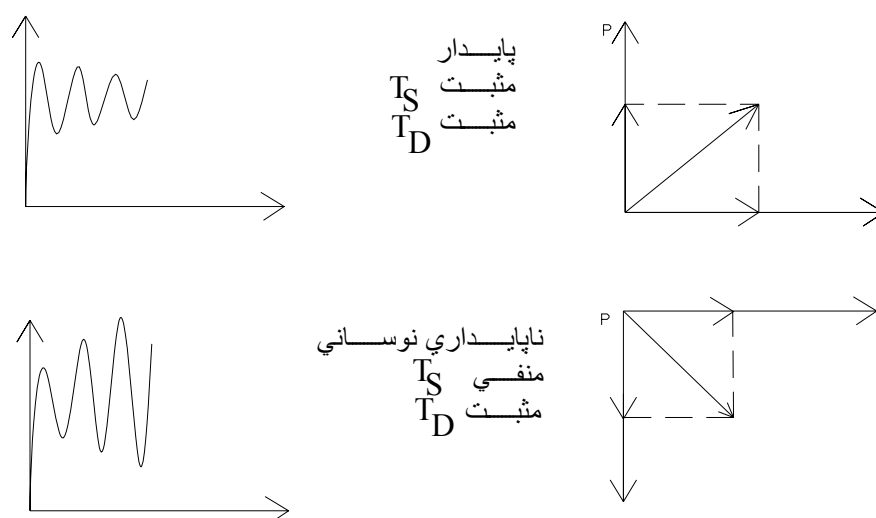
در سیستم های قدرت امروزی، پایداری اغتشاش کوچک، عمدتاً به علت کمبود میرایی نوسان ها اتفاق می افتد. پایداری انواع نوسان های زیر مورد توجه است:

- **مد های محلی یا مد های ماشین** - سیستم که مربوط به نوسان های واحد های یک نیروگاه نسبت به بقیه سیستم قدرت است. واژه محلی به این علت استفاده می شود که نوسان ها به یک نیروگاه یا بخشی کوچک از سیستم قدرت محدود می شود.

- **مد های بین ناحیه ای** - که مربوط به نوسان های تعدادی ماشین سنکرون در یک بخش سیستم نسبت به ماشین های سنکرون سایر بخش هاست. این مدها زمانی اتفاق می افتد که دو یا چند بخش که هر بخش از تعدادی ماشین سنکرون کاملاً نزدیک به هم متصل تشکیل شده است، به وسیله خطوط ارتباطی ضعیف به هم متصل شده باشند.

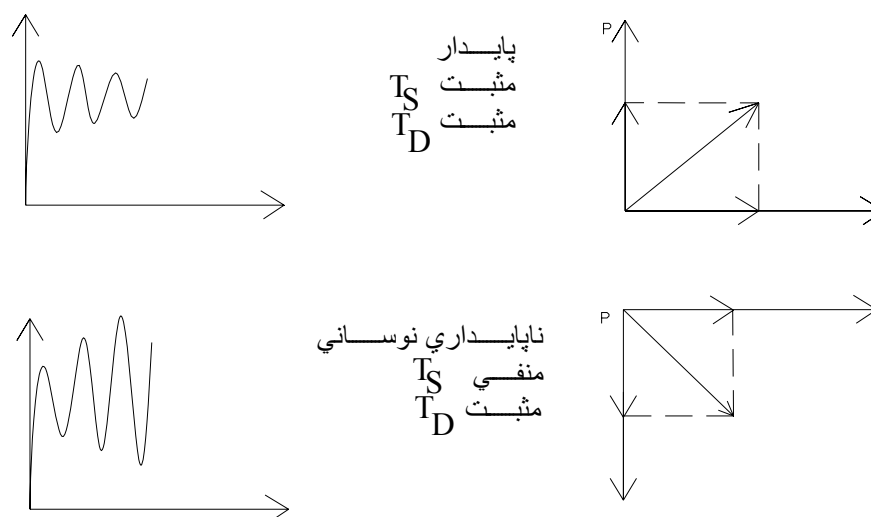
- **مد های کنترلی** - که مربوط به کنترلگرهای نیروگاه، کنورتورهای HVDC و جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو (SVC)، بد تنظیم شده باشد، ناپایداری این گونه مدها اتفاق می افتد.

- **مدهای پیچشی** - که مربوط به اجزای چرخان روی محور توربین - ژنراتور است. ناپایداری این مدها ممکن است به علت تأثیر متقابل اجزای مذکور با سیستم تحریک، گاورنر، کنترلگرهای HVDC و خطوط انتقالی که با خازن سری جبران شده اند، اتفاق افتد.



الف) با

ولتاژ تحریک



(ب) با کنترل تحریک

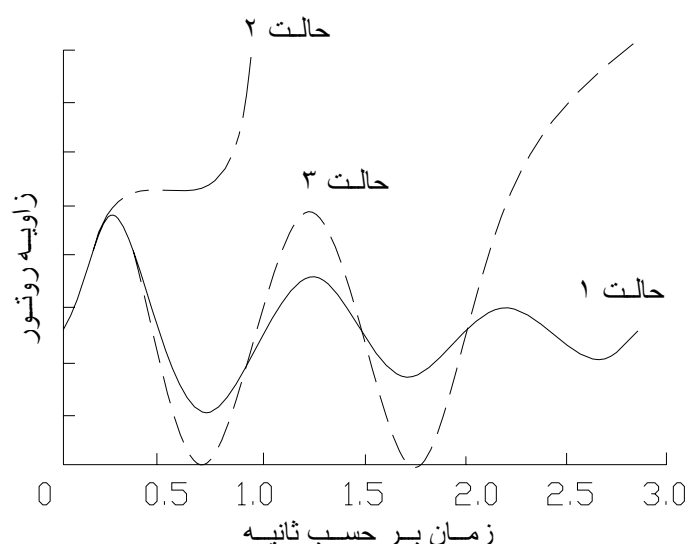
شکل ۲-۲ طبیعت پاسخ اغتشاش کوچک

(ب) پایداری گذرا، توانایی سیستم را به منظور حفظ حالت سنکرونیزه در اثر بروز یک اغتشاش شدید گذرا نشان می دهد. عکس العمل سیستم، شامل بغیرات بزرگ زاویه روتور ژنراتور است و از رابطه غیر خطی توان - زاویه تأثیر می پذیرد. پایداری، هم به نقطه کار اولیه سیستم و هم به شدت اغتشاش بستگی دارد. معمولاً در این حالت، سیستم دستخوش تغییر می شود به گونه ای که نقطه کار حالت ماندگار سیستم بعد از اغتشاش با نقطه کار قبل از اغتشاش متفاوت است.

در سیستم ممکن است اغتشاش هایی با شدت درجات و احتمال وقوع بسیار متفاوت روی دهد. با وجود این، سیستم به گونه ای طراحی می شود که در مقابل مجموعه ای از پیشامدهای برگزیده، پایدار بماند. این پیشامدها، عمدتاً اتصال کوتاه فاز به زمین، فاز به فاز و سه فاز است. معمولاً اتصال کوتاه را روی خطوط انتقال فرض می کنند اما گاهی اتصال کوتاه در شین یا ترانسفورمر نیز در نظر گرفته می شود. فرض می شود که به وسیله کلید زنی لازم، بخشی که تحت تأثیر خطا واقع شده از بقیه سیستم جدا می گردد. در بعضی شرایط، می توان باز بست سریع را فرض کرد.

شکل ۲-۳ رفتار ماشینی سنکرون را در وضعیتهای پایدار و ناپایدار نشان می دهد. این شکل، عکس العمل زاویه روتور را برای یک حالت پایدار و دو حالت ناپایدار نشان می دهد. در حالت پایدار (حالت ۱)، زاویه روتور ابتدا افزایش یافته، به حداکثر خود می رسد و سپس کاهش یافته و با دامنه در حال کاهش به صورت نوسانی در می آید تا اینکه به حالت ماندگار می رسد. در حالت ۲، زاویه روتور به طور پیوسته و یکنوا افزایش می یابد تا اینکه حالت سنکرون از دست برود. این شکل ناپایداری موسوم به ناپایداری اولین

نوسان است و به علت کمبود گشتاور سنکرون کننده ایجاد می شود. در حالت ۳، سیستم ابتدا در اولین نوسان پایدار است اما با افزایش دامنه نوسان ها، تدریجا ناپایدار می شود. این شکل ناپایداری عموما زمانی اتفاق می افتد که شرایط حالت ماندگار سیستم بعد از خطا، خود از دیدگاه "سیگنال کوچک" ناپایدار است و لزوما به علت اغتشاش گذرا اتفاق نمی افتد.



شکل ۲-۳

پاسخ زاویه روتور به یک اغتشاش گذرا

در سیستم های قدرت بزرگ، ممکن است ناپایداری گذرا همیشه به صورت ناپایداری اولین نوسان بروز نکند بلکه می تواند به علت جمع آثار چندین مد نوسانی باشد که باعث تغییرات شدید زاویه روتور بعد از اولین نوسان می شود. در مطالعات پایداری گذرا، زمان مطالعه معمولا محدود به ۳ تا ۵ ثانیه بعد از اغتشاش می شود هر چند که ممکن است برای سیستم های بسیار بزرگ با مد های نوسانی بین ناحیه ای غالب، این زمان به ۱۰ ثانیه هم برسد.

از واژه پایداری دینامیکی نیز در آثار چاپ شده به عنوان نوعی از پایداری زاویه روتور یاد شده است. با وجود این، نویسندگان مختلف از این واژه برای جنبه های متفاوت پدیده استفاده کرده اند. در امریکای شمالی، از این واژه به همان معنای پایداری سیگنال کوچک با وجود تجهیزات کنترل خودکار (عمدتا تنظیم کننده های ولتاژ ژنراتور) در مقابل پایداری بدون وجود این تجهیزات یاد شده است [۱، ۲]. در فرانسه و آلمان، از این واژه به همان معنای پایداری گذرا، که در اینجا استفاده شده است یاد گردیده است. از آنجا که استفاده از این واژه ابهامات زیادی را ایجاد کرده، هم CIGRE و هم IEEE به عدم استفاده از آن توصیه نموده اند [۳، ۴].

۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ

پایداری ولتاژ عبارت است از توانایی سیستم قدرت برای حفظ ولتاژ ماندگار قابل قبول در تمام شین های سیستم در شرایط عادی عملکرد و بعد از اینکه تحت یک اغتشاش قرار گرفت. زمانی که حضور اغتشاش، افزایش تقاضای بار، یا تغییر در وضعیت سیستم باعث افت فزاینده و غیر قابل کنترل در ولتاژ گردد سیستم وارد حالت ناپایداری ولتاژ می شود. دلیل اصلی ناپایداری، عدم توانایی سیستم قدرت در تأمین توان راکتیو مورد تقاضاست. قلب مسأله معمولاً افت ولتاژی است که به هنگام عبور توان حقیقی و راکتیو از راکتانس های خطوط انتقال ایجاد می گردد [۵ تا ۷].

یکی از معیار های پایداری ولتاژ آن است که در وضعیت کاری خاصی، در هر شین سیستم و در زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، دامنه ولتاژ نیز افزایش یابد. سیستم، از دید ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل برای یک شین سیستم، افزایش توان راکتیو تزریقی به آن (Q)، باعث کاهش دامنه ولتاژ آن (V) شود. به عبارت دیگر سیستمی از نظر ولتاژ پایدار است که حساسیت V-Q آن برای هر شین مثبت باشد و ناپایدار است اگر این حساسیت حداقل برای یک شین منفی شود.

افت ولتاژ شین ممکن است به علت از دست رفتن حالت سنکرونیزه و افزایش زاویه روتور نیز صورت پذیرد. به عنوان مثال، از دست دادن تدریجی حالت سنکرونیزه ماشین ها، زمانی که زوایای روتور بین دو گروه از ماشین ها به 180° نزدیک شده یا از آن فراتر رود، منجر به ولتاژ های بسیار پایین در نقاط واسطه ای از شبکه می شود (به فصل سیردهم، بخش ۱۳-۵-۳ مراجعه کنید). در مقابل، کاهش مداوم ولتاژ، که مربوط به ناپایداری ولتاژ است، زمانی اتفاق می افتد که از نظر پایداری پایه روتور مشکلی وجود نداشته باشد. اساساً ناپایداری ولتاژ یک پدیده محلی است. با وجود این، آثار آن ممکن است تأثیر فراگیر داشته باشد. فروپاشی ولتاژ پدیده ای پیچیده تر از ناپایداری ساده ولتاژ است و معمولاً اثر رشته ای از حوادث ناپایداری ولتاژ است که منجر به ولتاژ پایین در بخش عمده ای از سیستم قدرت می شود.

ناپایداری ولتاژ ممکن است به صورت های مختلفی بروز کند. در ساده ترین شکل، موضوع را می توان با توجه به شبکه ساده شکل ۲-۴ نشان داد [۵]. این شبکه، شامل یک منبع ثابت ولتاژ (E_s) است که باری (\bar{Z}_D) را از طریق یک امپدانس سری (\bar{Z}_L) تغذیه می کند. این شبکه نمونه ای از یک سیستم شعاعی است که در آن بار یا ناحیه ای از بارها به وسیله یک خط انتقال از سیستمی بزرگ تغذیه می شود. جریان \bar{I} در شکل ۲-۴ برابر است با:

$$\bar{I} = \frac{\bar{E}_s}{\bar{Z}_L + \bar{Z}_D} \quad (3-2)$$

که \bar{I} و \bar{E}_s مقادیر فازوری هستند و داریم:

$$\bar{Z}_L = Z_L \angle \theta, \quad \bar{Z}_D = Z_D \angle \phi$$

دامنه جریان برابر است با:

$$I = \frac{E_S}{\sqrt{(Z_L \cos \theta + Z_D \cos \varphi)^2 + (Z_L \sin \theta + Z_D \sin \varphi)^2}}$$

که این رابطه را به صورت زیر هم می توان بیان کرد:

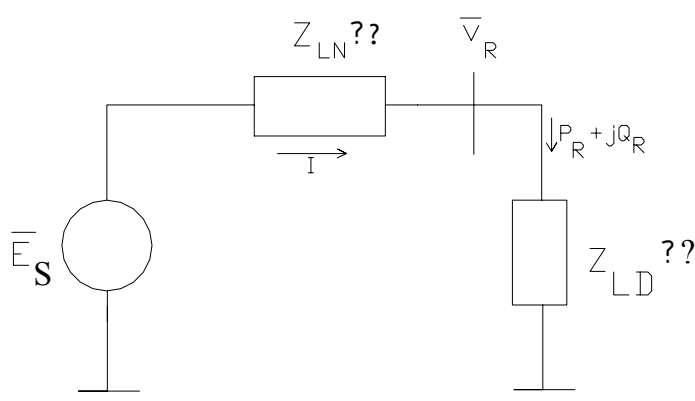
$$I = \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{E_S}{Z_L} \quad (۴-۲)$$

$$A = 1 + \left[\frac{Z_D}{Z_L} \right]^2 + 2 \left[\frac{Z_D}{Z_L} \right] \cos(\theta - \varphi) \quad \text{که:}$$

دامنه ولتاژ طرف گیرنده (بار) برابر است با :

$$\bar{V}_R = \bar{Z}_{LD} \bar{I} \rightarrow V_R = Z_{LD} I$$

$$= \frac{1}{\sqrt{A}} \frac{Z_D}{Z_{LN}} E_S \quad (۵-۲)$$



شکل ۴-۲ یک سیستم ساده شعاعی برای نمایش پدیده پایداری ولتاژ

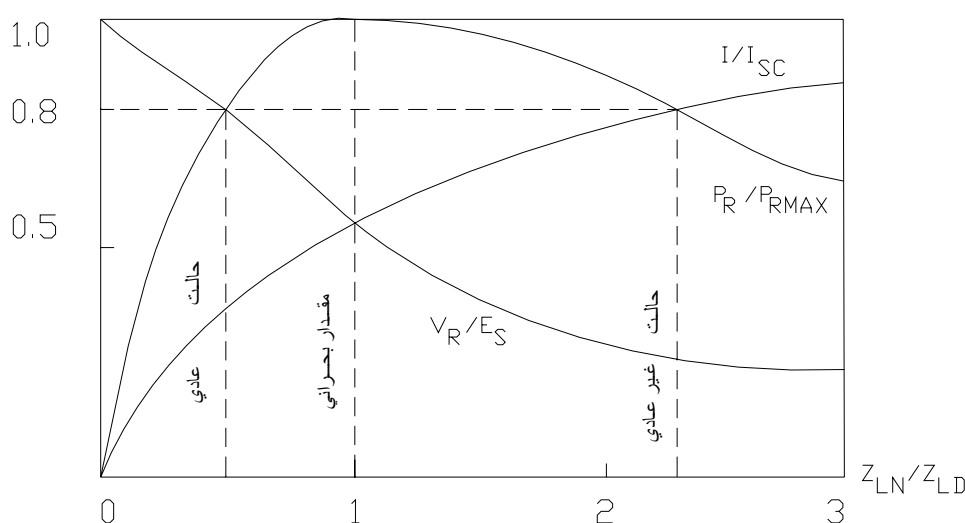
و توان حقیقی برابر است با:

$$P_R = V_R I \cos \varphi$$

$$= \frac{Z_D}{A} \left[\frac{E_S}{Z_L} \right]^2 \cos \varphi \quad (۶-۲)$$

نمودار I ، V_R ، P_R برحسب Z_L/Z_D برای حالتی که $\tan \theta = 0.0$ و $\cos \varphi = 0.95$ است در شکل ۵-۲

رسم شده است. برای اینکه بتوان نتایج را برای هر مقدار Z_L به کاربرد، مقادیر I ، V_R ، P_R به طور مناسبی نرمالیزه شده اند.



شکل ۲-۵ ولتاژ، جریان و توان طرف گیرنده به صورت تابعی از تقاضای جریان بار برای سیستم شکل ۲-۴

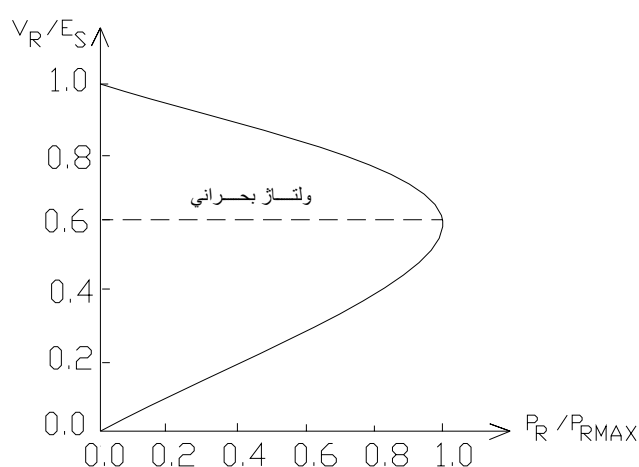
اگر با کاهش Z_D ، بار مورد تقاضا (جریان بار) را افزایش دهیم، P_R قبل از رسیدن به یک حداکثر، ابتدا سریعاً و سپس کندتر افزایش می‌یابد و بعد از آن شروع به کاهش می‌کند. از این رو مقدار حداکثری برای توان حقیقی وجود دارد که می‌توان آن را با منبع ولتاژ ثابتی از طرق یک امپدانس، انتقال داد. توان، زمانی حداکثر است که افت ولتاژ خط، از نظر مقدار مساوی V_R ، باشد یعنی زمانی که $Z_L / Z_D = 1$ است. زمانی که Z_D رفته رفته کاهش یابد، I زیاد می‌شود و V کم می‌گردد. در ابتدا در مقادیر بزرگ Z_{LD} ، افزایش در جریان بر کاهش در ولتاژ غالب است و در نتیجه با کاهش Z_D ، P_R سریعاً افزایش می‌یابد. زمانی که Z_D به Z_L نزدیک شد، تأثیر کاهش I فقط کمی بیشتر از تأثیر کاهش در V_R است. زمانی که Z_D کمتر از Z_L باشد، کاهش در V_R بر افزایش در I غالب می‌شود که در نتیجه تأثیر خالص آن، کاهش P_R است.

حالت بحرانی کاری که در آن توان، حداکثر است، حد بهره‌برداری قابل قبول را نشان می‌دهد. در تقاضاهای بیشتر بار، کنترل توان به وسیله تغییر بار ممکن است به ناپایداری بینجامد یعنی کاهش امپدانس بار منجر به کاهش توان می‌شود. اینکه آیا ولتاژ به طور فزاینده‌ای کاهش یابد و سیستم ناپایدار گردد بستگی به مشخصه‌های بار دارد. با باری با مشخصه استاتیکی امپدانس ثابت، سیستم در توان و ولتاژی کمتر از حدود مطلوب، پایدار می‌شود. از طرفی اگر مشخصه بار به صورت توان ثابت باشد، سیستم با فروپاشی ولتاژ شین بار، ناپایدار می‌شود. با مشخصه‌های دیگر بار، ولتاژ به کمک ترکیب مشخصه‌های خط انتقال و بار، تعیین می‌گردد. اگر بار به وسیله ترانسفورمرهایی با وجود تغییر دهنده‌های خودکار تپ زیربار (ULTC) تغذیه‌شود، تغییر دهنده سعی خواهد کرد که ولتاژ را بالا ببرد. این موضوع باعث می‌شود که Z_D موثر از

دیدگاه سیستم کاهش یابد که خود باعث می شود V_R باز هم کاهش یابد و سرانجام منجر به کاهش فزاینده ولتاژ شود. این موضوع، شکل ساده و خالص ناپایداری ولتاژ است.

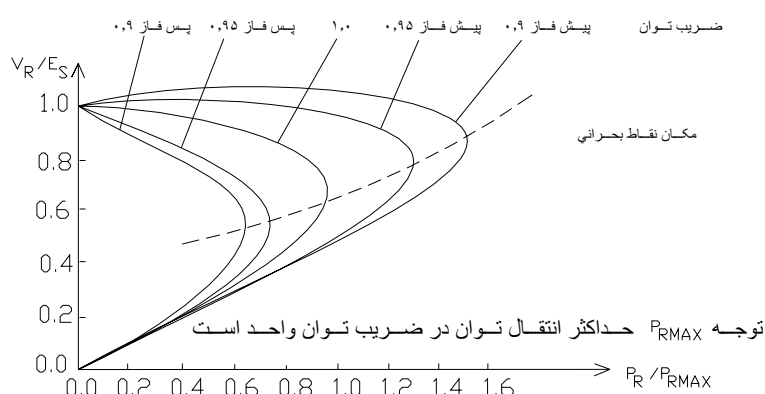
از دیدگاه پایداری ولتاژ، رابطه بین P_R و V_R مورد توجه است. این رابطه در شکل ۶-۲ برای سیستم مورد مطالعه، زمانی که ضریب توان بار مساوی ۰,۹۵، پس فاز است، نشان داده شده است.

با توجه به معادلات ۵-۲ و ۶-۲، ضریب توان تأثیر مهمی بر مشخصه توان - ولتاژ سیستم دارد. این موضوع، منطقی است زیرا افت ولتاژ در خط انتقال تابعی هم از توان حقیقی و هم از توان راکتیو انتقالی است. پایداری ولتاژ در حقیقت به روابط بین Q ، P و V بستگی دارد.



شکل ۶-۲ مشخصه های توان- ولتاژ سیستم شکل ۴-۲

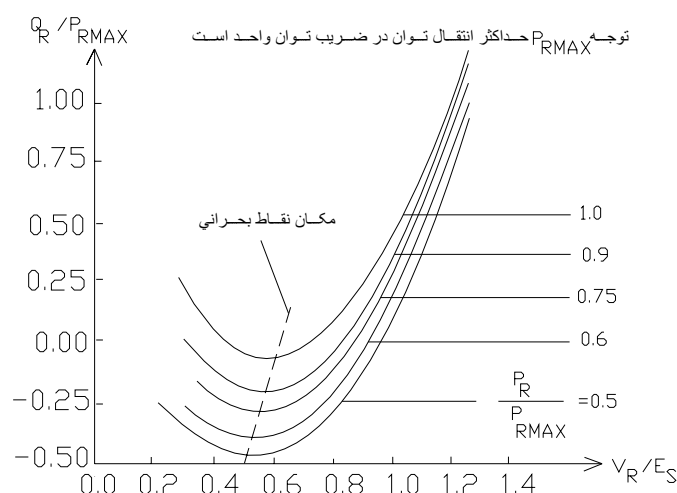
صورت های مرسوم جهت نمایش این ارتباط ها در شکل های ۷-۲ و ۸-۲ نشان داده شده است. شکل ۷-۲ منحنی های V_R-P_R را برای مقادیر مختلف ضریب توان در سیستم قدرت شکل ۴-۲ نشان می دهد. مکان هندسی نقاط بحرانی به صورت نقطه چین در شکل نشان داده شده است. معمولاً تنها نقاط کاری بالای نقاط بحرانی، شرایط کاری قابل قبول را نشان می دهند. کاهش ناگهانی در ضریب توان (افزایش Q_R) می تواند سیستم را از حالت کاری پایدار به یک حالت کاری غیر قابل قبول و احتمالاً ناپایدار (در محدوده پایین منحنی ها) سوق دهد.



شکل ۷-۲ مشخصه های V_R-P_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با ضریبهای مختلف توان بار

تأثیر مشخصه های توان راکتیو تجهیزات و وسایلی که در طرف گیرنده قرار دارند (بار و تجهیزات جبرانگر) بیشتر در شکل ۸-۲ نمایان است. این شکل، مجموعه ای از منحنی ها برای سیستم قدرت ۲-۴ است که هر منحنی رابطه بین V_R و Q_R را برای یک P_R ثابت نشان می دهد. سیستم در محدوده ای که مشتق dQ_R/dV_R مثبت است، پایدار است. حد پایداری ولتاژ (نقطه بحرانی) زمانی فرا می رسد که مشتق، صفر باشد. از این رو بخشی از منحنی ها که در طرف راست نقطه حداقل قرار دارد، نمایانگر محدوده عملکرد پایدار و بخش طرف چپ نمایانگر محدوده ناپایدار است. عملکرد پایدار در محدوده ای که dQ_R/dV_R منفی است، فقط زمانی قابل کسب است که یک جبرانگر قابل تنظیم توان راکتیو با محدوده کافی کنترلی با بهره Q/V بالا و با پلاریته عکس حالت عادی، در دسترس باشد.

شرح فوق در خصوص پدیده پایداری ولتاژ، ابتدایی است و هدف، کمک به طبقه بندی و درک جنبه های متفاوت پایداری سیستم قدرت است. بررسی، محدود به یک سیستم شعاعی شد که تصویری ساده و در عین حال گویا از مسأله پایداری ولتاژ را نشان دهد. در یک سیستم عملی پیچیده قدرت، عوامل زیادی به فرایند فروپاشی ولتاژ سستم در اثر ناپایداری ولتاژ، کمک می کنند؛ از آن جمله، می توان از قوت سیستم انتقال، سطوح توانی انتقالی، مشخصه های بارها، حدود توانایی توان راکتیو ژنراتورها و مشخصه های تجهیزات جبران گر توان راکتیو نام برد. در بعضی حالات، مسأله با عملکرد ناهماهنگ سیستم های گوناگون حفاظتی و کنترل، ترکیب می شود.



شکل ۲-۸ مشخصه های V_R-Q_R مربوط به سیستم شکل ۲-۴ با نسبتهای مختلف P_R/P_{RMAX}

به منظور بررسی، مناسب است که پایداری ولتاژ را به دو طبقه ذیل تقسیم نمود:

الف) پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش ها بزرگ از جمله خطاهای سیستم، از دست دادن تولید یا پیشامدهای خطوط است. این توانایی به وسیله مشخصه های بار سیستم و تأثیر متقابل سیستم های کنترلی و حفاظت پیوسته و گسسته مشخص می شود. تعیین پایداری اغتشاش بزرگ، مستلزم آن است که عملکرد غیر خطی دینامیکی سیستم در محدوده زمانی کافی که تأثیر متقابل تجهیزاتی از قبیل تغییر دهنده های تپ زیر بار (ULTC) و محدود کننده های جریان تحریک ژنراتور مشخص می شود، تعیین گردد. زمان مطالعه ممکن است از چند ثانیه تا چندین دقیقه طول بکشد. از این رو شبیه سازی دینامیکی بلند مدت برای بررسی مسأله، ضروری است. معیاری جهت پایداری اغتشاش بزرگ ولتاژ آن است که به دنبال بروز اغتشاش و بعد از عمل کنترل کننده های سیستم، ولتاژ تمام شین ها به سطوح ماندگار قابل قبول برسند.

ب) پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ، مربوط به توانایی سیستم در کنترل ولتاژ به دنبال وقوع اغتشاش های کوچک، مثلاً تغییرات کوچک در بار سیستم، است. این نوع پایداری به کمک مشخصه های بار، کنترل کننده های پیوسته و کنترل کننده های گسسته در یک لحظه زمانی مشخص، تعیین می گردد. این مفهوم، مشخص می کند که در هر زمان سیستم چگونه در مقابل اغتشاش های کوچک، عکس العمل نشان می دهد. فرایند های اصلی که به پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ کمک می کند اساساً دارای طبیعت حالت ماندگار هستند. از این رو می توان به طور موثر از بررسی استاتیکی برای تعیین حاشیه پایداری، عوامل موثر بر پایداری و مطالعه تأثیر محدوده نسبی از وضعیت های سیستم و تعداد زیادی سناریو که به دنبال پیشامدها و اغتشاشات رخ می دهد، استفاده کرد.

معیاری جهت پایداری اغتشاش کوچک ولتاژ آن است که در یک حالت کاری مشخص، دامنه ولتاژ هر شین سیستم، زمانی که توان راکتیو تزریقی به آن شین افزایش می یابد، زیاد شود. سیستم، از نظر ولتاژ، ناپایدار است اگر حداقل در یک شین سیستم، دامنه ولتاژ (V)، زمانی که توان راکتیو تزریقی (Q) به آن افزایش یابد، کم شود. به عبارت دیگر، سیستم از نظر ولتاژ، پایدار است اگر حساسیت V-Q برای هر شین، مثبت و ناپایدار است اگر حساسیت V-Q حداقل برای یک شین، منفی باشد.

ناپایداری ولتاژ همیشه به شکل خالص خود بروز نمی کند. اغلب، ناپایداری ولتاژ و زاویه با یکدیگر تداخل می کنند. ناپایداری از یک نوع ممکن است به ناپایداری از نوع دیگر منجر شود و تفکیک، واضح و روشن نباشد. با وجود این، تفکیک مهم است زیرا به دنبال درک و تعیین عوامل موثر بر مساله است که می توان روش های مناسب بهره برداری و طراحی را برگزید. شرح مفصل تر پایداری ولتاژ شامل روش های مطالعه و جلوگیری از فرو پاشی ولتاژ در فصل چهاردهم آمده است. بررسی جامع و عمیق مساله در کتاب پایداری ولتاژ سیستم قدرت که قلم تیلور تألیف شده، بیان گردیده است.

۲-۱-۳ پایداری میان مدت و بلند مدت

واژه های پایداری بلند مدت و میان مدت در فرهنگ پایداری سیستم های قدرت نسبتاً جدید هستند. این واژه ها به دنبال نیاز به بررسی عکس العمل دینامیکی سیستم قدرت در حالی که سیستم، دستخوش آشفتگی های شدید می شود، مطرح شده اند. آشفتگی های شدید در سیستم منجر به تغییرات بزرگی در ولتاژ، فرکانس و توان های انتقالی می شود و فرایندها، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی کند را که در مطالعات سنتی پایداری گذرا، مدل نمی شوند به عکس العمل وا می دارد. مشخصه های زمانی ای فرایند ها و تجهیزات، که در اثر تغییرات بزرگ فرکانس و ولتاژ تحریک می شوند و از محدوده چند ثانیه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی ژنراتور) تا چند دقیقه (در خصوص تجهیزاتی از قبیل سیستم های تأمین انرژی چرخاننده ها و تنظیم کننده های بار - ولتاژ) متغیر است.

در پایداری بلند مدت فرض می شود که نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون، میرا شده است و در نتیجه فرکانس یکنواختی در کل سیستم برقرار است. در اینجا تأکید بر پدیده های گذر و بلند مدت تر است که همراه با آشفتگی های شدید سیستم و در نتیجه عدم تطابق زیاد و طولانی بین تولید و مصرف توان های حقیقی و راکتیو است. پدیده ها شامل عکس العمل دینامیکی دیگ های بخار واحد های حرارتی، عکس العمل دینامیکی آبگذر و کانال آب واحدهای آبی، کنترل خودکار تولید، کنترل کننده ها و سیستم های حفاظتی نیروگاه ها و سیستم انتقال، اشباع در ترانسفورمر و تأثیرات فرکانس غیر اسمی بر بار و شبکه است. عکس العمل میان مدت نمایشگر انتقال بین عکس العمل های کوتاه مدت و بلند مدت است. در مطالعات پایداری میان مدت، تأکید بر نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشین های سنکرون و از جمله تأثیر بعضی از پدیده های گذر و احتمالاً تغییرات شدید ولتاژ یا فرکانس است. از نظر زمانی، بازه های نوعی به صورت زیر است:

- کوتاه مدت یا گذرا : صفر تا ۱۰ ثانیه
- میان مدت : ۱۰ ثانیه تا چند دقیقه
- بلند مدت : چندین دقیقه تا چندین ده دقیقه

باید خاطر نشان کرد که تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت عمدتاً بر اساس پدیده های مورد بررسی و مدلسازی مورد استفاده سیستم بخصوص با توجه به نوسان های زودگذر و بین ماشینی و نه با توجه به دوره زمانی مورد نظر، صورت می پذیرد. به طور کلی مسائل پایداری بلند مدت و کوتاه مدت مربوط به نقص در عکس العمل تجهیزات، هماهنگی ضعیف بین سیستم های کنترلی و حفاظتی یا کمبود ذخیره توان های حقیقی و راکتیو اتفاق می افتد.

پایداری بلند مدت معمولاً مربوط به عکس العمل سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگی است که از محدوده معیار های طراحی معمولی سیستم خارج است. این موضوع ممکن است به وقفه های متوالی و پارگی سیستم به چندین زیر سیستم منجر شود که در هر زیر سیستم، ژنراتورها در حالت سنکرونیزه باقی بمانند. مفهوم پایداری در این حالت آن است که " آیا هر زیر سیستم به حالت قابل قبول تعادلی با حداقل بار زدایی می رسد یا خیر ". این موضوع از عکس العملی کلی زیر سیستم با توجه به فرکانس متوسط آن و نه با توجه به حرکت نسبی بین ماشین های سنکرون، تعیین می شود. در بدین وضع، ممکن است عکس العمل تجهیزات حفاظتی سیستم و واحدها وضعیت را باز هم بدتر کند و فروپاشی سیستم یا بخشی از آن رخ دهد.

کاربردهای دیگر بررسی پایداری بلند مدت و کوتاه مدت، در خصوص بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ است که نیازمند بهشویه سازی تأثیر تغییر دهنده های تپ ترانسفورمرها، حفاظت فوق تحریک ژنراتورها، حدود منابع توان راکتیو و بارهای ترموستاتی است. در این حالت، کمتر متحمل است که نوسان های بین ماشین های سنکرون، مهم باشد. با وجود این، باید دقت کرد که از بعضی از عکس العمل های دینامیکی سریع چشم پوشی کرد.

در خصوص بررسی پایداری بلند مدت و میان مدت تجربه م مطالعه به صورت محدود انجام گرفته است. همچنان که بر تجربه ها افزوده گردد و روش های بهبود یافته در خصوص شبیه سازی عکس العمل های دینامیکی گند و سریع مطرح شود، تمایز بین پایداری بلند مدت اهمیت کمتری پیدا می کند.

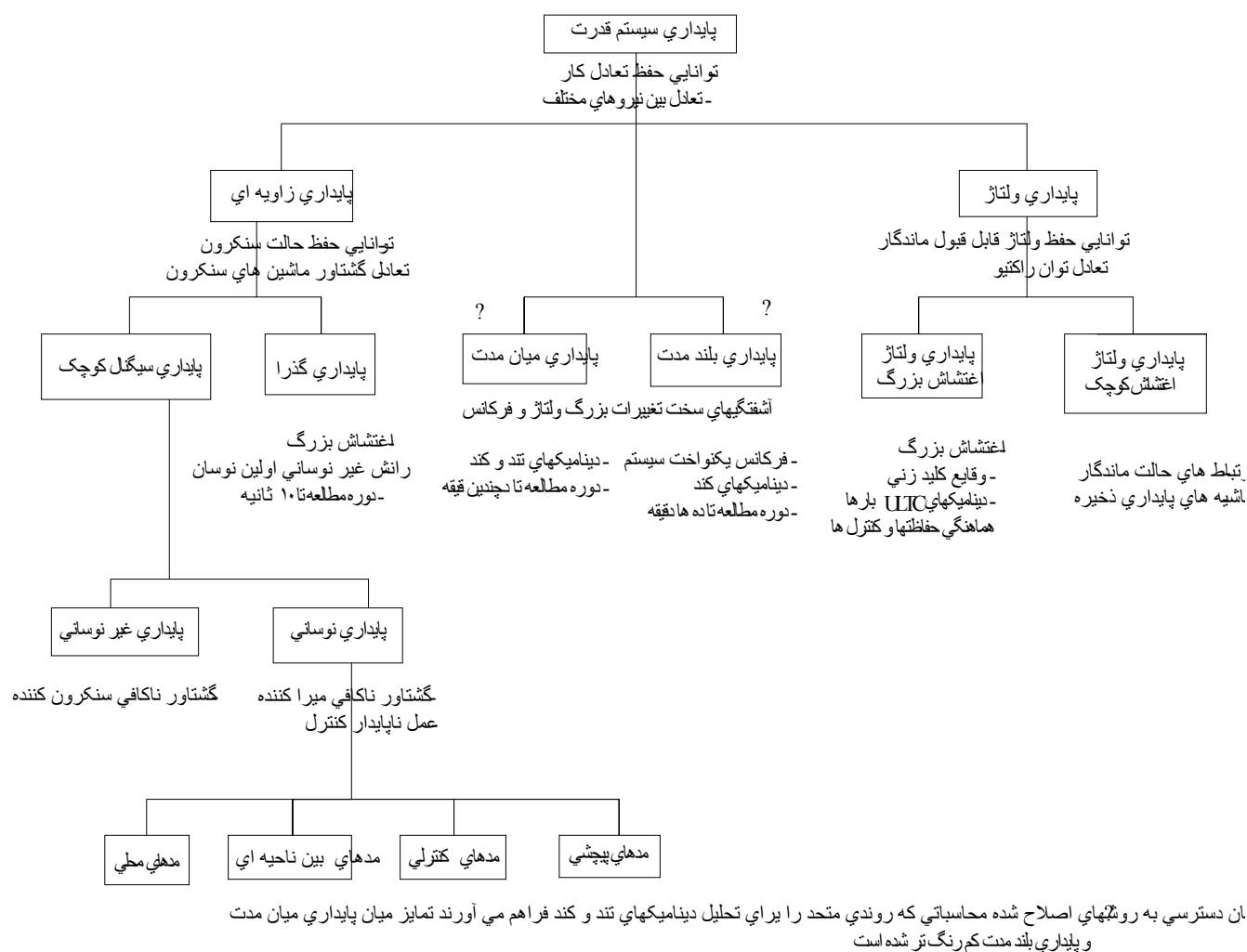
۲-۲ طبقه بندی پایداری

پایداری سیستم قدرت یک مسأله منفرد است اما عملی نیست که آن را بدین صورت مطالعه کرد. همچنان که در بخش قبل مطرح گردید، ناپایداری یک سیستم قدرت می تواند شکل های مختلفی داشته باشد و از عوامل گوناگونی تأثیر پذیرد. با طبقه بندی مناسب پایداری، می توان بررسی مسائل مربوطه، تشخیص عوامل اصلی سهم در ناپایداری و ایجاد روش های بهبود عملکرد پایدار سیستم را تا حد زیادی تسهیل بخشید. این طبقه بندی بر اساس نکات زیر صورت می پذیرد:

- طبیعت فیزیکی ناپایداری حاصل؛

- اندازه اغتشاش موجود؛
- تجهیزات، فرایندها و محدوده زمانی که برای تعیین پایداری لازم است مورد توجه قرار گیرند؛
- مناسب ترین روش محاسبه و پیش بینی پایداری.

شکل ۲-۹ شکل کلی مسأله پایداری سیستم قدرت را به تصویر کشیده است که در آن طبقات و زیر طبقه ها بر اساس آنچه که در بخش قبلی بیان گردید، مشخص شده اند. از بعد عملی، طبقه بندی بر اساس نکات متنوعی انجام گرفته که مرزبندی مشخص را بین طبقات و تعیین تعاریفی را که دقیق و در عین حال از دید عملی مفید باشند، مشکل می نماید. به عنوان مثال، همیشه نوعی هم پوشانی بین پایداری میان مدت، بلند مدت و پایداری ولتاژ وجود دارد. با مدل سازی مناسب بارها، تغییر دهنده زیر بار تپ ترانسفورمرها و حدود توان راکتیو ژنراتورها، شبیه سازی پایداری میان مدت و بلند مدت، مناسب بررسی دینامیکی پایداری ولتاژ نیز خواهد بود. به طور مشابه، هم پوشانی بین پایداری گذرا، میان مدت و بلند مدت وجود دارد، بدین صورت که که روش های محاسباتی مشابه برای پیش بینی عکس العمل غیر خطی زمانی سیستم در مقابل اغتشاش های بزرگ استفاده می کنند. اگر چه این سه طبقه، مسأله پایداری را از جنبه های مختلف مورد توجه قرار می دهند، از دیدگاه محاسباتی و شبیه سازی، هر یک تعمیمی از دیگری است و مرز بندی مشخص، مشکل است



شکل ۹-۲ طبقه بندی پایداری سیستم قدرت

هر چند که طبقه بندی پایداری سیستم قدرت، وسیله مؤثر و مناسبی در برخورد با پیچیدگی های موجود در مسأله است، اما باید همواره پایداری کلی سیستم را مد نظر داشت. حل مسأله پایداری یک طبقه نباید منجر به تأثیر منفی بر پایداری طبقه دیگر شود. این نکته، اساسی است که باید تمام جنبه های پدیده پایداری را مورد توجه قرار داد و هر جنبه را از بیش از یک دیدگاه بررسی کرد. لازمه این امر آن است که انواع روش های محاسباتی گوناگون ایجاد گردد و از آنها به صورت منطقی استفاده شود. در این صورت است که تا حدی، هم پوشانی در پدیده مورد بررسی، مطلوب است.

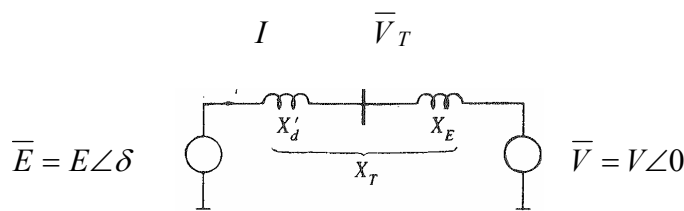
ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

پایداری سیگنال کوچک سیستم مدرن یک ماشین متصل به شین بینهایت

برای ژنراتور سیستم وبا صرفنظر از کلیه مقاومتها نمایش سیستم بصورت زیر خواهد بود. نیروی محرکه \bar{E} متصل به راکتانس X_d بوده و اندازه آن قبل از وقوع اغتشاش ثابت فرض می شود. δ زاویه ولتاژ \bar{E} می باشد که نسبت به ولتاژ \bar{V} پیش فاز می باشد.



در اینصورت با وقوع نوسان در روتور مقداره تغییر می یابد. با در نظر گرفتن \bar{V} به عنوان فازور مرجع داریم:

$$\bar{I} = \frac{E\angle\delta - V\angle 0}{jX_T}$$

$$X_T = X_d + X_E$$

توان مختلط متصل به X_d به صورت زیر داده می شود:

$$\bar{S} = P + jQ = \bar{E} \bar{I}^*$$

$$E\angle\delta \left(\frac{E\angle\delta - V\angle 0}{-jX_T} \right) = \frac{EV \sin \delta}{X_T} + j \frac{E(E - V \cos \delta)}{X_T}$$

با در نظر نگرفتن مقاومت استاتور، توان فاصله هوایی P_e با توان پایانه P برابر می باشد و در مبنای واحد گشتاور فاصله هوایی با توان فاصله هوایی برابر است. از این رو داریم:

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T} \sin \delta$$

خطی سازی حول نقطه کار نشان داده شده با δ_o نتیجه می دهد:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{EV}{X_T} \cos \delta_o (\Delta \delta)$$

معادله نوسان با در نظر گرفتن مولفه گشتاور میرا کننده:

$$\Delta w_r = w_r - w_o$$

$$dw_r = \frac{\Delta w_r}{w_c} = \frac{1}{w_o} \frac{ds}{dt}$$

$$\frac{ds}{dt} = w_o dw_r$$

$$\frac{2H}{w_o} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = T_m - T_e - K_D dw_r$$

معادلات حرکت در مبنای واحد عبارت است از:

$$\frac{d\Delta w_r}{dt} = P \Delta w_r = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - k_D \Delta w_r)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = p\delta = w_o \Delta w_r$$

که در آن Δw_r انحراف سرعت در مبنای واحد δ زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی، w_o سرعت مبنای زاویه روتور بر حسب رادیان بر ثانیه، و P عملکرد دیفرانسیلی d/dt با زمان t به ثانیه است. با خطی

سازی معادله $\frac{d\Delta w_r}{dt}$ و جایگزینی ΔT_e داده شده با معادله مربوطه به دست می آوریم:

$$T_e = P = \frac{EV}{X_T} \sin \delta \rightarrow \Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta \delta = \frac{EV}{X_T} \cos \delta_o (\Delta \delta) = K_S \Delta \delta$$

گشتاور در فاصله هوایی

$$p \Delta w_r = \frac{1}{2H} [\Delta T_m - K_S \Delta \delta - K_D \Delta w_r]$$

که در آن K_S ضریب گشتاور سنکرون کننده داده سده با معادله زیر است:

$$K_S = \left[\frac{EV}{X_T} \right] \cos \delta_o$$

از خطی سازی معادله $\frac{d\delta}{dt}$ داریم:

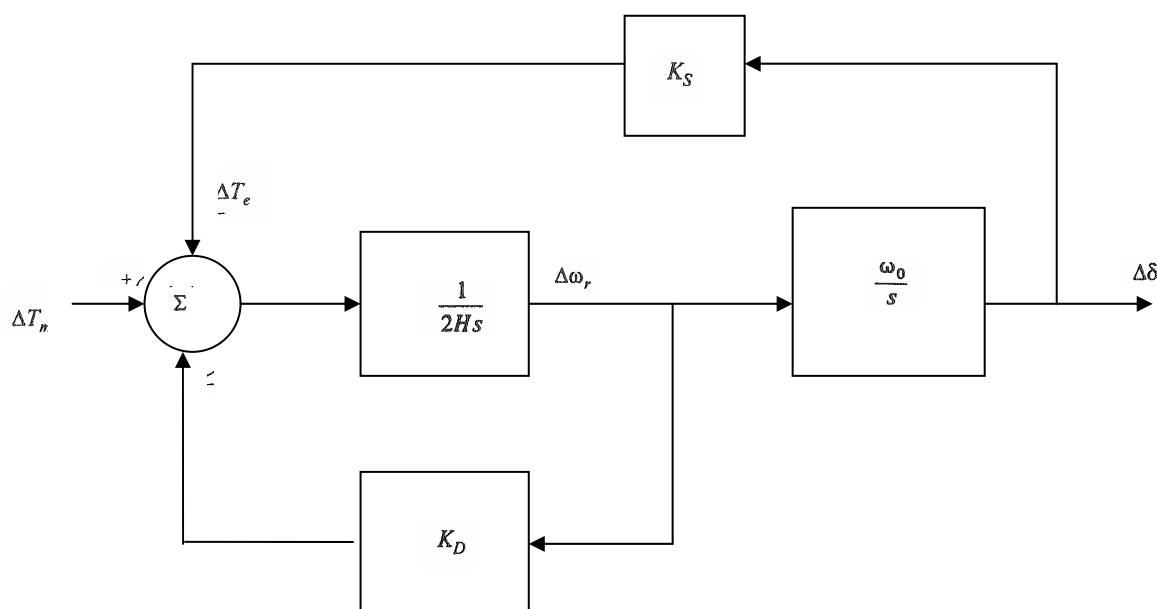
$$p\Delta\delta = w_o\Delta w_r$$

با نوشتن معادلات $p\Delta\delta$ و $p\Delta w_r$ بصورت بردار-ماتریسی به دست می آوریم:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} \Delta w_r \\ \Delta\delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_S}{2H} \\ \frac{1}{2H} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r \\ \Delta\delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

که بصورت $\dot{x} = Ax + bu$ است و مشاهده می شود که عناصر ماتریس A به پارامترهای سیستم K_D, H, X_T و شرایط اولیه نشان داده شده با مقادیر E و δ_o بستگی دارند. می توان از نمایش نمودار بلوکی شکل ۵-۱۲ برای توصیف عملکرد سیگنال کوچک استفاده کرد.

مولفه گشتاور سنکرون کننده



مولفه گشتاور میراکننده

نمودار بلوکی سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت با مدل کلاسیک ژنراتور

K_S = ضریب گشتاور سنکرون کننده بر حسب مبنای واحد گشتاور بر رادیان

K_D = ضریب گشتاور میراکننده بر حسب گشتاور مبنای واحد انحراف سرعت مبنای واحد

H = ثابت لختی بر حسب $MVA \cdot s / MW$

Δw_r = انحراف سرعت بر حسب $(w_r - w_o) / w_o$

$\Delta\delta$ = انحراف زاویه روتور بر حسب رادیان الکتریکی

s = عملگر لاپلاس

w_o = سرعت ناشی بر حسب $2\pi f_o = elec.rad / s$

از نمودار بلوکی شکل فوق داریم:

$$\Delta\delta = \left[\frac{1}{2HS} (-K_S \Delta\delta - K_D \Delta w_r + \Delta T_m) \right] = \frac{w_o}{S} \left[\frac{1}{2HS} (-K_S \Delta\delta - K_D S \frac{\Delta\delta}{w_o} + \Delta T_m) \right]$$

از مرتب کردن این رابطه نتیجه می شود:

$$S^2(\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} S(\Delta\delta) + \frac{K_S}{2H} w_o(\Delta\delta) = \frac{w_o}{2H} \Delta T_m$$

بنابر این معادله مشخصه بصورت زیر داده می شود:

$$S^2 + \frac{K_D}{2H} S + \frac{K_S w_o}{2H} = 0$$

که بصورت کلی زیر است:

$$S^2 + \xi w_n S + w_n^2 = 0$$

بنابر این فرکانس طبیعی میرا نشده عبارت است از:

$$w_n = \sqrt{K_S \frac{w_o}{2H}} \text{ rad/s}$$

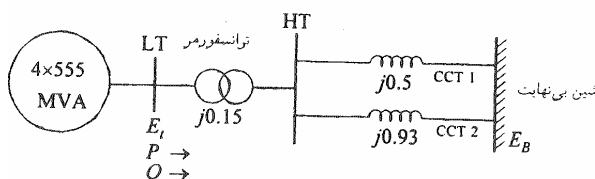
و نسبت میرایی برابر است با:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H w_n}$$

$$= \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_S 2H w_o}}$$

با افزایش ضریب گشتاور سنکرون کننده K_S , فرکانس طبیعی افزایش یافته و نسبت میرای کاهش می یابد. از سویی افزایش ضریب گشتاور میرا کننده K_D نسبت میرایی را افزایش داده، حال آنکه افزایش در ثابت لختی هر دو w_n , ξ را کاهش می دهد.

مثال- شکل زیر سیستمی قابل اعمال به نیروگاهی حرارتی (تشکیل شده از چهار واحد 555MVA, 24KV, 60Hz) را نشان می دهد.



راکتانسهای شبکه نشان داده شده در شکل، در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA، 24KV هستند (به طرف فشار ضعیف ترانسفورمر بالا برنده ارجاع شده است) و فرض شده مقاومتها قابل چشم پوشی باشند. هدف از این مثال تحلیل مشخصه های پایداری سیگنال کوچک سیستم حول نقطه کار حالت ماندگار به دنبال از دست دادن مدار ۲ می باشد. وضعیت پیش از خطای سیستم در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA، 24KV به صورت زیر است:

$$P=0.9 \quad Q=0.3 \quad \bar{V}_T = 1.0 \angle 36^\circ \quad \bar{V} = 0.995 \angle 0^\circ$$

ژنراتورها به صورت یک ژنراتور معادل منفرد توصیف شده در مبنای واحد بر پایه مقادیر 2220MVA، 24KV مدل می شوند:

$$X_a = 0.3 \quad H = 3.5 \quad MWS/MVA$$

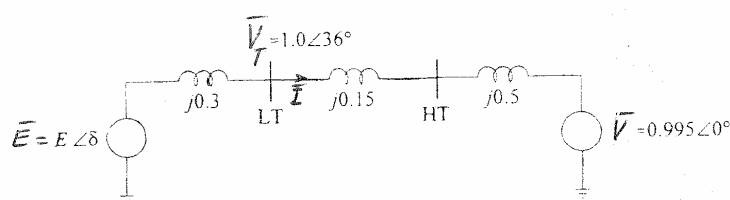
(الف) معادلات حالت خطی شده سیستم را بنویسید. مقادیر ویژه فرکانس میرا شده نوسان (بر حسب Hz)، نسبت میرایی و فرکانس طبیعی غیر میرا را برای هر یک از مقادیر ضریب میرایی (بر حسب سرعت مبنای واحد بر گشتاور مبنای واحد) تعیین کنید.

$$(i) K_D = 0 \quad (ii) K_D = -10/0 \quad (iii) K_D = 10/0$$

برای حالتی که $K_D = 10/0$ باشد بردارهای ویژه چپ و راست و ماتریس مشارکت را پیدا کنید. اگر در $t = 0$ ، $\Delta\delta = 5^\circ$ و $\Delta w = 0$ باشد، پاسخ زمانی را تعیین کنید

حل

(الف) شکل زیر مدل مدار نشان دهنده نقطه کار حالت-ماندگار را پس از بروز خطا با کلیه پارامترهای توصیف شده در مبنای واحد بر پایه 2220MVA نشان می دهد:



با در نظر گرفتن \bar{V}_T بعنوان فاز و مرجع جریان استاتور ژنراتور به صورت زیر داده می شود:

$$\text{مرجع اول} \quad \bar{V}_T = 1 \angle 36^\circ \quad T = \frac{(P + jQ)^*}{\bar{V}_T^*} = \frac{0.9 - j0.3}{1/0}$$

$$\text{مرجع دوم} \quad \bar{V}_T = 1 \angle 0^\circ \quad = 0.9 - j0.3 \quad pu$$

ولتاژ متصل به راکتانس گذرا عبارت است از:

$$\bar{E} = \bar{V}_T + jX_d \bar{I}$$

$$= 1/0 + j0/3(0/9 - j0/3)$$

$$= 1/09 + j0/27 = 1/123 \angle 13/92 \quad pu$$

زاویه پیش فاز بودن \bar{E} نسبت به V عبارت است از :

$$\delta_0 = 13/92 + 36 = 49/92$$

مجموع راکتانس سیستم خواهد شد:

$$X_T = 0/3 + 0/15 + 0/5 = 0/95 \quad pu$$

ضریب گشتاور سنکرون کننده متناظر از معادله ۱۲-۷۶ برابر است با :

$$K_S = \frac{EV}{X_T} \cos \delta_0$$

$$= \frac{1/123 \times 0/995}{0/95} \cos 49/92$$

$$= 0/757 \quad pu \quad \text{گشتاور بر رادیان}$$

بنابراین معادلات حالت خطی شده عبارت است از :

$$\begin{pmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-K_D}{2H} & \frac{-K_S}{2H} \\ \frac{1}{w_0} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 2H \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

$$= \begin{pmatrix} -0/143K_D & -0/108 \\ 377/0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0/143 \\ 0 \end{pmatrix} \Delta T_m$$

مقادیر ویژه ماتریس به صورت زیر داده می شوند:

$$\begin{vmatrix} -0/143K_D - \lambda & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda \end{vmatrix} = 0$$

$$\lambda^2 + 0/143K_D \lambda + 40/79 = 0 \quad \text{یا:}$$

وبا مقایسه با شکل استاندارد ذیل:

$$\lambda^2 + 2\zeta w_n \lambda + w_n^2 = 0$$

خواهیم داشت:

$$w_n = \sqrt{40/79} = 6/387 \text{ rad/s} = 1/0165 \text{ Hz}$$

$$\zeta = 0/143K_D / (2 \times 6/387) = 0/0112K_D$$

پس مقادیر ویژه عبارتند از:

$$\lambda_1, \lambda_2 = \pm w_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

فرکانس میرا شده خواهد شد:

$$w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

در زیر نتایج خواسته شده برای مقادیر مختلف K_D آورده شده است:

K_D	۰	۱۰	-۱۰
مقادیر ویژه	$۰ + j6/39$	$-۰/۷۱۴ + j6/35$	$۰/۷۱۴ + j6/36$
فرکانس میرا w_r	$۱/۰۱۶۵ \text{ Hz}$	$۱/۰۱۰۱ \text{ Hz}$	$۱/۰۱۰۱ \text{ Hz}$
نسبت میرایی	۰	$۰/۱۱۲$	$-۰/۱۱۲$
فرکانس طبیعی غیر میرا w_n	$۱/۰۱۶۵ \text{ Hz}$	$۱/۰۱۶۵ \text{ Hz}$	$۱/۰۱۶۵ \text{ Hz}$

(ب) بردارهای ویژه راست به صورت زیر داده می شود:

$$(A - \lambda I)\phi = 0$$

برای سیستم داده شده با $K_D = 10$ معادله بالا چنین می شود:

$$\begin{pmatrix} -1/43 - \lambda_1 & -0/108 \\ 377/0 & -\lambda_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \phi_{11} \\ \phi_{21} \end{pmatrix} = 0$$

برای $\lambda = -0/714 + j6/35$ معادلات متناظر عبارت است از:

$$(0/714 + j6/35)\phi_{11} + 0/108\phi_{21} = 0$$

$$377/0\phi_{11} + (0/714 - j6/35)\phi_{21} = 0$$

معادلات بالا سمتل خطی نیستند. همانطور که در مثال ۱۲-۱ بحث شد باید یکی از عناصر بردار ویژه

متناظر با یک مقدار ویژه را به دلخواه انتخاب کنید. بنابراین، با فرض:

$$\phi_{21} = 1/0$$

داریم:

$$\phi_{11} = -0/0019 + j0/0168$$

بطور مشابهی بردار ویژه متناظر با $\lambda_2 = -0/714 - j6/35$ عبارت است از:

$$\text{لذا ماتریس مدال بردار ویژه راست} \quad \phi_{22} = 1/0 \quad \phi_{12} = -0/0019 - j0/0168$$

عبارت است از:

$$\phi = \begin{pmatrix} -0/0019 + j0/0168 & -0/0019 - j0/0168 \\ 1/0 & 1/0 \end{pmatrix}$$

بردارهای ویژه چپ نرمالیزه شده به صورت $\psi_1 \phi_1 = 1/0$ عبارت است از:

$$\psi = \phi^{-1} = \frac{adj(\phi)}{|\phi|}$$

$$= \frac{\begin{pmatrix} 1/0 & -1/0 \\ 0/0019 + j0/0168 & -0/0019 + j0/0168 \end{pmatrix}^T}{(-0/0019 + j0/0168 + 0/0019 + j0/0168)}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix}$$

ماتریس مشارکت برابر می شود با:

$$P = \begin{pmatrix} \phi_{11}\psi_{11} & \phi_{12}\psi_{12} \\ \phi_{21}\psi_{21} & \phi_{22}\psi_{22} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/5 + j0/056 & 0/5 - j0/056 \\ 0/5 - j0/056 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0/503\angle 6/4 & 0/503\angle -6/4 \\ 0/503\angle -6/4 & 0/503\angle 6/4 \end{pmatrix}$$

و پاسخ زمانی به صورت زیر داده می شود:

$$\begin{pmatrix} \Delta w_r(t) \\ \Delta \delta(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} \\ \phi_{21} & \phi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_1 e^{\lambda_1 t} \\ c_2 e^{\lambda_2 t} \end{pmatrix}$$

که با فرض (رادیان) $\Delta \delta = 5 = 0/0873$ و $\Delta w_r = 0$ در $t = 0$ داریم:

$$\begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \psi_{11} & \psi_{12} \\ \psi_{21} & \psi_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta w_r(0) \\ \Delta \delta(0) \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} -j29/76 & 0/5 - j0/056 \\ j29/76 & 0/5 + j0/056 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0/0873 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0/0436 - j0/0049 \\ 0/0436 + j0/0049 \end{pmatrix}$$

پاسخ زمانی انحراف سرعت عبارت است از:

$$\Delta w_r(t) = \phi_{11}c_1 e^{\lambda_1 t} + \phi_{12}c_2 e^{\lambda_2 t}$$

$$= (-0/0019 + j0/0168)(0/0436 - j0/0049)e^{(-0/714 + j6/35)t} +$$

$$(-0/0019 - j0/0168)(0/0436 + j0/0049)e^{(-0/714 - j6/35)t}$$

$$= -0/0015e^{-0/714t} \sin(6/35t)$$

به طور مشابه پاسخ زمانی انحراف زاویه روتور عبارت است از:

$$\Delta \delta(t) = 0/088e^{-0/714t} \cos(6/35t - 0/112)$$

پس با سیستمی مرتبه دوم با یک مد نوسانی پاسخ با فرکانس میراشده $6/35$ رادیان بر ثانیه با $1/0101$ هرتز سرو کار داریم. نوسانها با ثابت زمانی $\frac{1}{0/714}$ ثانیه از بین خواهند رفت (که متناظر با نسبت میرایی $0/112$ است). از آنجا که این یک مد زاویه روتور است Δw_r و $\Delta \delta$ به طور مساوی در آن مشارکت دارند.

ادامه فصل هفتم

پایداری و کنترل سیستم های قدرت

Power System Stability & Control

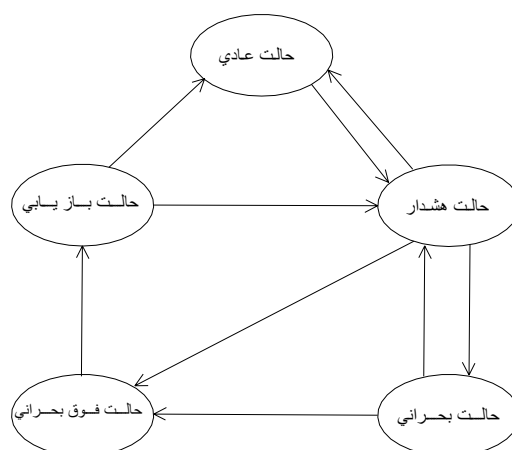
پایداری میان مدت و بلند مدت

پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، مربوط به پاسخ سیستم های قدرت به آشفتگی های شدید، است. آشفتگی های شدید، اغتشاش هایی هستند که به انحراف های فرکانس، ولتاژ و توان های انتقالی منجر می شوند که این انحراف ها چنان بزرگ یا ماندنی هستند که اقدامات فرایند های گند، سیستم های حفاظتی و کنترل هایی را که در مطالعات مرسوم پایداری گذرا مدل نشده اند، بر میانگیزانند.

این فصل ماهیت پاسخ سیستم را، هنگامی که تحت آشفتگی های شدید قرار گرفته باشد، نشان می دهد و نیاز به تمایز بین پایداری میان مدت و بلند مدت را بررسی می کند. همچنین در این فصل ملاحظات مدلسازی و روش های تحلیلی شبیه سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت توصیف و مثال هایی توضیحی و رهنمودهایی برای افزایش توانمندی سیستم های قدرت در مواجهه با این آشفتگی ها بیان شده است.

۱-۱۶ ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های شدید

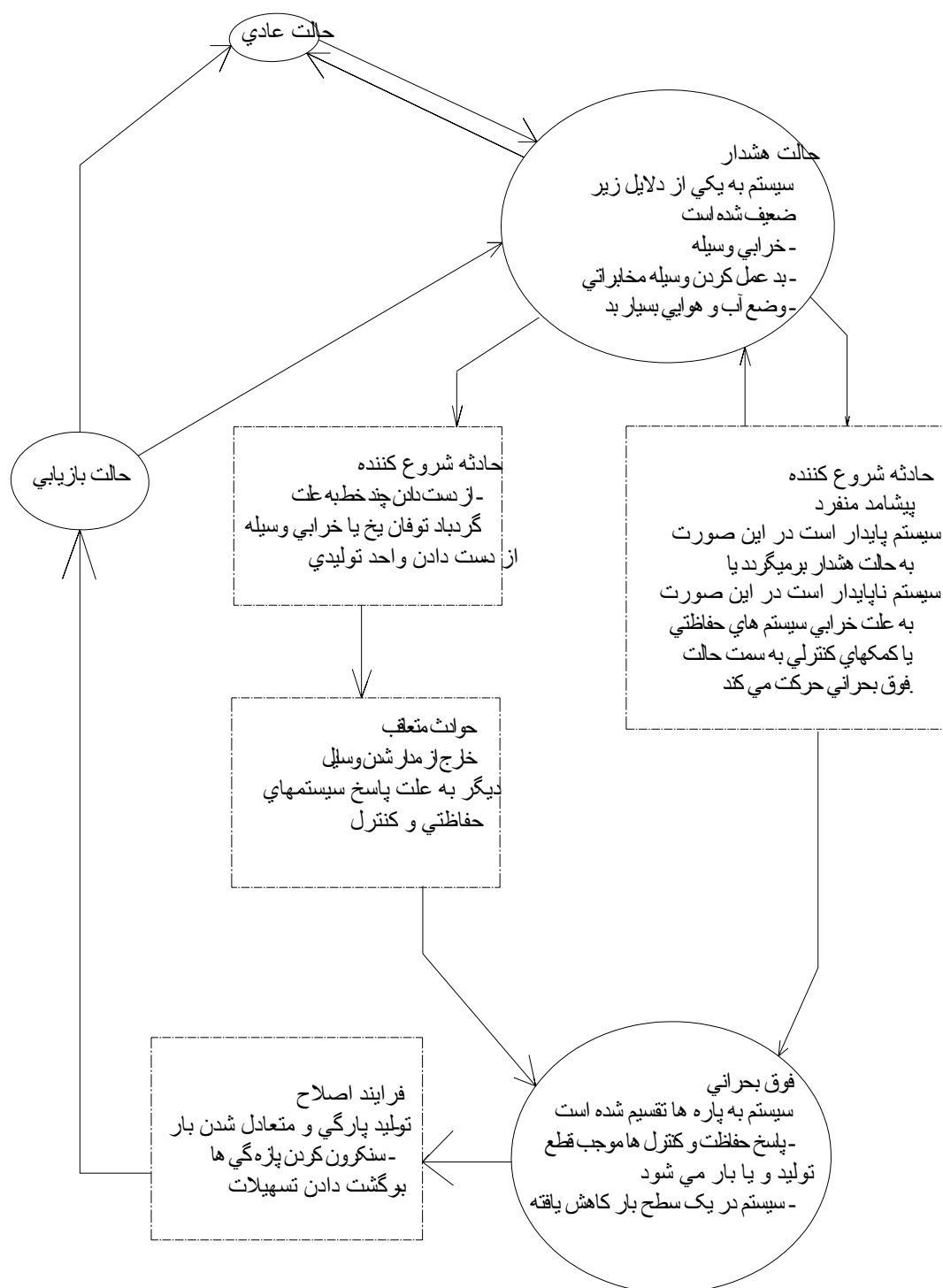
در مطالعه ماهیت پاسخ سیستم به اغتشاش های بزرگ، به تصویر در آوردن وضعیت کاری سیستم بر حسب پنج حالت نشان داده شده در شکل ۱-۱۶ سودمند است. توصیفی از این حالت ها و راه های انتقال از یک حالت به حالت دیگر، در فصل اول (بخش ۱-۳)، آورده شده است. این فصل بر وقایع و شرایط سیستمی تمرکز دارد که با حالت فوق بحرانی مرتبط است.



شکل ۱۶-۱ حالت های عمل سیستم قدرت

بررسی اغتشاش های واقعی سیستم [۱-۶] نشان می دهد که الگویی اساسی در شکل ۱۶-۲ شرح داده شده است که در آن وقایعی که ممکن است منجر به انتقال از حالت هشدار به حالت فوق بحرانی شود، نشان داده شده است. حادثه آغازگر می تواند اغتشاشی با مبداء طبیعی، بد عمل کردن یک وسیله، یا نتیجه عملکرد نیروی انسانی باشد. سیستم های مدرن قدرت به گونه ای طراحی و راه اندازی می شوند که در مواجهه با پیشامدهای احتمالی با احتمال وقوع بیشتر، عملکردی مطمئن داشته باشد (برای توصیف پیشامدهای احتمالی طراحی فصل ۱ را ببینید). در اکثر موارد، سیستم های قدرت می توانند در پیشامدهای احتمالی منفرد و بسیاری از پیشامدهای احتمالی را که با هم رخ می دهند، تحمل کنند. سیستم های حفاظتی و کنترل برای جلوگیری از انتشار اغتشاش به سایر قسمت های شبکه عمل می کنند.

لیکن گاهی، ترکیب غیر عادی حوادث باعث می شود که قسمتی از سیستم به هم پیوسته، به طور کامل جدا شده و یک یا چندپاره الکتریکی را تشکیل دهد. حادثه آغازگر معمولاً پیشامدی است که از موارد در نظر گرفته شده در معیار طبیعی طراحی، شدیدتر است: برای نمونه، خارج شدن چندین خط انتقال در اثر گردبادی سخت؛ برمز توفان یخ؛ یا بد عمل کردن وسیله مخابراتی. حوادث ناشی از حادثه آغازگر، با تحت فشار قرار دادن بیشتر سیستم، باعث وقفه های زنجیره ای غیر قابل کنترل می شود. ممکن است در طی وضعیت پیش آمده تغییرات وسیعی در فرکانس (از ۵۸ تا ۶۳ هرتز) و نیز در ولتاژ (از ۵۰٪ تا ۱۲۰٪ مقدار قبل از اغتشاش) به وجود آید. بدین ترتیب سیستم می تواند به حالت فوق بحرانی نیز تنزل موقعیت پیدا کند، که نتیجه آن از دست دادن قسمت های اعظم بار سیستم است. به طور کلی، اعمال منترلی و سیستم های حفاظتی، پاسخ سیستم را در طی این وضعیت، تحت شعاع خود قرار می دهند. در برخی موارد، این موقعیت با هماهنگی ضعیف بین سستم های حفاظتی و کنترل، تشدید می شود. در اینجا باید به منظور نجات هر چه بیشتر سیستم از فروپاشی کامل، از عمل کنترل اضطراری استفاده کرد.



شکل ۱۶-۲ انتقال حالت های سیستم حین آشفتگی های شدید

پاسخ سیستم به حالت پارگی

پاسخ سیستم به وضعیت پارگی، در اصل یک گذرای فرکانس مداوم است. بنابر این، کنترل سرعت و پاسخ های متعاقب توربین و سیستم های تغذیه انرژی نقش اساسی در تعیین ماهیت عملکرد دینامیکی سیستم ایفا می کنند. اغلب، وضعیت با شرایط ولتاژ بالا یا پایین ترکیب می شود.

پاره های کم تولید. در یک پاره گی با مجموع تولید اولیه کمتر از مجمع بار، فرکانس کاهش پیدا می کند. اگر ذخیره چرخان کافی در داخل پارگی وجود داشته باشد، فرکانس سیستم در چند ثانیه به نزدیکی مقدار عادی باز می گردد، اما اگر تولید کافی با توانایی افزایش ریع خروجی در دسترس نباشد، فرکانس ممکن است به مقادیری برسد که به وسیله رله های حفاظتی کمبود فرکانس به خارج از مدار کردن واحد های تولید حرارتی منجر شود و بدین ترتیب وضعیت را تشدید کند. بنابر این، از اغلب طراحی های بار زدایی کمبود فرکانسی، برای کاهش بار وصل شده به سطحی که بتواند به طور رضایت بخشی به وسیله تولید تأمین گردد، استفاده می شود.

در نتیجه، در یک پاره کم تولید، گذرای اولیه به پاسخ های ذخیره چرخان تولید و رله های بار زدایی وابسته است. ظرف چندین ثانیه، حداقل مقدار فرکانس به دست خواهد آمد. پس از این، نقطه، پاسخ فرکانسی سیستم به مشخصه های توربین بستگی خواهد داشت.

پاره های پر تولید. در پاره ای با تولید اضافی اولیه، فرکانس بالا خواهد رفت، و سیستم کنترل سرعت با کاهش توان مکانیکی تولید شده حاصل از توربین ها، پاسخ خواهد داد. در عمل، نیروگاه ها در این حالت، یک «بار برداری جزئی» را تجربه می کنند. عملکرد پاره و توانایی آن در پایدار سازی، بدون از دست دادن بار به توانایی نیروگاه ها در تحمل بار برداری جزئی، بستگی دارد. این موضوع در بخش ۱۶-۳ بیشتر توضیح داده خواهد شد.

تعادل توان راکتیو. عملکرد سیستم در داخل پارگی، تحت تأثیر تعادل توان راکتیو نیز قرار دارد. ممکن است عدم تطابق زیاد در مجموع توان راکتیو تولید شده و جذب شده به شرایط ولتاژ بالا یا پایین منجر شود و ممکن است محدود کننده های فوق و یا زیر تحریک گاورنر و کنترل ها فعال گردند. در بدترین حالت، پاسخ رله های حفاظتی، به خارج کردن واحد های تولید منجر می شود. برای نمونه، یک پارگی با خطوط و یا کابل های FHV ی کم بار، ممکن است باعث جذب مقادیر بالایی از توان راکتیو به وسیله ژنراتورها شود و اگر این موقعیت بسرعت اصلاح نشود، ایناحتمال وجود دارد که به خارج شدن واحد ها (به وسیله حفاظت بی تحریکی) منتهی گردد.

تجهیزات جنبی نیروگاه. بروز تغییرات، بخصوص کاهش، در ولتاژ و فرکانس منبع تغذیه ممکن است باعث تنزل عملکرد آن دسته از تجهیزات جنبی نیروگاه شود که با موتورهای القایی کار می کنند. برای نمونه، پمپ های گردش آب، آب حاصل از میعان، تخلیه گرم کن، و آب تغذیه با موتورهای القایی کار می کنند. تنزل عملکرد این پمپ ها ممکن است به از دست دادن خلا کندانسور، درجه حرارت بالای خروجی توربین و

جریان ناکافی آب تغذیه و یا آب حاصل از میعان منجر شود. بنابر این، بسیاری از نیروگاه های هسته ای، به رله های کمبود ولتاژ و کمبود فرکانس مجهز می شوند تا نیروگاه را در حالت ولتاژ های پایین (به طور نوعی، ۷۰٪ مقدار نامی) +و یا حالت فرکانس های پایین (به طور نوعی، ۵۹,۲ هرتز) از مدار خارج کنند. معمولا موتورهای نیروگاه، در مدارهای راه اندازی و حفاظتی از رله ها و کنتاکتورهای الکترومغناطیسی استفاده می کنند. پاسخ این کنتاکتورها و رله ها به افت های شدید یا طوفانی ولتاژ می توان مونورها را قطع کند.

بازیابی سیستم

هنگامی که پارگی ها به وضعیت حالت دائمی می رسند، اپراتورها اقداماتی اتخاذ می کنند تا سیستم به هم پیوسته را باز یابی کنند. این اقدامات شامل تنظیم تولید و بار در هر پارگی، دوباره سنکرون کردن پارگی ها و باز یابی واحدهای تولیدی، باره و سایر امکانات است که به هنگام بروز اغتشاش، از مدار خارج شده اند. راه اندازی و بارگذاری مجدد واحد های حرارتی با چندین عامل محدود می شود، و ممکن است که توان کامل برای چندین ساعت وجود نداشته باشد. اگر واحدهای حرارتی بسرعت برای بارگذاری مجدد در دسترس باشند، می توان باز یابی توان را به میزان چشم گیری سرعت داد. بنابر این، بسیاری از شرکت ها روش «عمل به بار خانگی» را اختیار کرده اند. در زیر چند روش مختلف استفاده شده برای این کار آورده شده است:

الف) در هنگام قطع، آتش را خاموش کنید و برای مدت تقریبا ۲۰ دقیقه به ذخیره حرارتی دیگ بخار تکیه کنید.

ب) همانند «الف». لیکن آتش را مجددا روشن کنید و اجازه دهید دیگ بخار با مشعل های مشتعل کار کند.

ج) در بار بسیار پایین یکی از روش های خاص آتش را اعمال کنید.

د) دیگ بخار را در توان کامل رها کنید یا توان را به حداقل کاهش دهید. بخار اضافی را در جو رها سازید و از ذخیره آب تغذیه (معمولا برای چند ساعت) استفاده کنید.

ه) دیگ بخار را در بار حداقل رها کرده، بخار اضافی را به طور میان بُر به داخل کندانسور وارد کنید.

۱۶-۲ تفاوت بین پایداری میان مدت و بلند مدت

همان طور که در فصل دوم اشاره شد، عبارت های پایداری میان مدت و پایداری بلند مدت، واژه های جدیدی در مراجع پایداری سیستم قدرت هستند. معرفی این عبارت ها، به دلیل نیازی بود که در برخورد با مسائل مرتبط با پاسخ دینامیکی سیستم های قدرت به آشفتگی های شدید، احساس می شد.

پایداری بلند مدت، آنگونه که در مراجع ۱۱ تا ۱۵ تعریف شده است، فرض می کند ک نوسان های توان سنکرون کننده بین ماشینی میرا شده و در نتیجه آن یکنواختی فرکانس سیستم است. در اینجا، تمرکز بر پدیده های گذر و طولانی تر همراه با آشفتگی های مقیاس بزرگ سیستم و عدم تطابق های مداوم حاصل بین تولید و مصرف توان حقیقی و راکتیو می باشد و عواملی چون دینامیک دیگ بخار واحدهای حرارتی، دینامیک

کانال و آبگذر واحدهای آبی، کنترل خود کار تولید، حفاظت ها و یا کنترل های سیستم انتقال نیروگاه، اشباع ترانسفورمر، و اثر غیر اسمی بر بارها و شبکه، به احتمال زیاد بر پایداری بلند مدت نقش خواهند داشت.

عبارت پایداری میان مدت در مراجع ۱۴ و ۱۵ معرفی شده است که انتقال بین پاسخ های گذرا و پاسخ های بلند مدت را نشان می دهد. در پایداری میان مدت، مرکز توجه نوسان هاس توان سنکرون کننده بین ماشین ها، برخی از پدیده های گذر، و احتمالا انحراف های بزرگ ولتاژ یا فرکانس است.

از این تعاریف مشاهده می شود، تفاوت چندانی بین پایداری میان مدت و بلند مدت وجود ندارد. آنچه که پایداری بلند مدت را متمایز می کند فرض یکنواخت بودن فرکانس سیستم است و اینکه دینامیک های سریع، قابل توجه نیستند. این فرضیات در صورتی سودمندند که ابزار تحلیلی، آنها را برای پیاده کردن شبیه سازی لازم داشته باشد؛ لیکن با نرم افزارهای امروزی که روش های پیشرفته مبتنی بر پراکندگی و روش های موثر انتگرال گیری ضمنی را بکار می گیرند، شبیه سازی چارچوب های بلند زمان با مدل سازی دینامیک سریع، کمتر موجب نگرانی است.

تا آنجا که ملاحظات مدل سازی مورد نظر باشد، تفاوت تعریف شده مشخصی بین چارچوب زمانی میان مدت و چارچوب زمانی بلند مدت وجود ندارد. برای دوره های زمانی پس از دوره گذرا، باید انتخاب مدل های کاربردی در شبیه سازی، بر اساس پدیده های مورد تحلیل و نمایش سیستم به کار گرفته شده (به جاب طول واقعی شبیه سازی)، باشد. برای نمونه ممکن است نادیده گرفتن دینامیک های دیگ بخار یا کنترل فرایند بخار در شبیه سازی «میان مدت» برای شبیه سازی اغتشاش هایی که برای آنها توابع محرک این دینامیک ها کوچک هستند، قابل قبول باشد. لیکن، نادیده گرفتن این دینامیک های گند برای اغتشاش های شدیدتری، که ممکن است حفاظت های مربوط به متغیرهایی مانند فشارهای بخار را تحریک کند، می توان اثر فوق العاده ای بر نتایج شبیه سازی داشته باشد. تجربیات بدست آمده از چندین شرکت، نیاز به نمایش نوسان های بین ماشینی و گذراهای سریع مرتبط به سیستم های تحریک را در مطالعات پایداری بلند مدت مشخص کرده است. از این رو تفاوت بین پایداری بلند مدت و میان مدت را نمی توان به طور رضایت بخشی بر مبنای ثابت چارچوب زمانی و یا ملاحظات مدل سازی بنا کرد. با توجه به این نکات، بهترین روش برای دسته بندی مسائل پایداری مرتبط با آشفته گی های شدید سیستم، حذف ایده میان مدت به عنوان یک دسته جدا و استفاده از بلند مدت برای شامل کردن کلیه مطالعات پس از چارچوب زمانی گذرا می باشد.

در این صورت پایداری بلند مدت به صورت «توانایی سیستم قدرت در دستیابی به یک تعادل قابل قبول کاری پس از بروز اغتشاش شدید در سیستم» تعریف می شود، که ممکن است سیستم را به چندین زیر سیستم تقسیم کرده یا نکند. چارچوب زمانی موزد نظر، به انداء کافی بیش از دوره گذراست تا علاوه بر دینامیک های سریع، اثر دینامیک های گند سیستم های خودکار کنترل و حفاظتی را نیز شامل شود. ممکن است شبیه سازی های بلند مدت، اغتشاش های شدید فراتر از پیشامدهای احتمالی عادی طراحی را نیز شامل شود، پیشامدهایی که سبب شود تاسیستم قدرت به چندین پاره مجزای متوالی تجزیه شود، به طوری که ژنراتورها

در هر پاره، به صورت سنکرون باقی بمانند. پایداری در این حالت، بدین ترتیب تعریف می شود که آیا هر پارها حداقل اختلال در سرویس ها به یک تعدل قابل قبول کاری می رسد یا خیر. در بدترین وضعیت، حفاظت های سیستمی و واحدی ممکن است به طور ترکیبی شرایط را خراب کنند و منجر به فروپاشی بخش یا تمام پاره شوند.

به طور کلی، مسائل پایداری بلند مدت با پاسخ های غیر کافی وسایل، هماهنگی ضعیف تجهیزات کنترلی و حفاظتی، یا ذخیره ناکافی توان حقیقی یا راکتیو مرتبط می باشد.

زمان های مشخصه فرایندها و وسایلی از قبیل کنترل های ژنراتورها و حفاظت ها، تا چندین دقیقه متناظر با پاسخ های وسایلی از قبیل سیستم های تغذیه انرژی توربین ها و تنظیم کننده های ولتاژ بار است. از دیدگاه تحلیلی، برنامه های پایداری بلند مدت، برنامه های تعمیم یافته پایداری گذراست که در آنه توانایی تنظیم مرحله زمانی انتگرالگیری بر حسب گذرهای غالب، ایجاد شده است.

یکی از کاربردهای شبیه سازی پایداری بلند مدت، که مورد توجه روزافزون نیز قرار گرفته استف تحلیل دینامیکی پایداری ولتاژ (که در فصل ۱۴ بررسی شد) است، که در آن لازم است اثر تغییر دهنده یک ترانسفورمر، حفاظت فوق تحریک ژنراتور و حدود توان راکتیو، و بارهای ترموستاتی، شبیه سازی شوند. در این حالت، نوسان های بین ماشینی، چندان مهم نیستو گذراهای سیستم منبع تغذیه انرژی نیز ممکن است حیاتی نباشد. لیکن، باید برای نادیده گرفتن برخی از دینامیک های سریع با احتیاط عمل کرد.

۳-۱۶ پاسخ نیروگاه حین آشفته گی های شدید

۱-۳-۱۶ نیروگاه های حرارتی

توانایی نیروگاه ها در پشت سر گذاشتن بار برداری جزئی، از اهمیت فراوانی در حداقل کردن اثر آشفته گی شدید و باز یافتن سریع کاری عادی نیروگاه برخوردار است. مراجع ۱۸ تا ۲۱ پاسخ های نیروگاه ها را به بار برداری های جزئی و مسائل تجربه شده در برخورد موفقیت آمیز با چنین آشفته گی هایی توصیف می کنند.

مراجع ۲۲، که به وسیله یک گروه کاری از IEEE تهیه شده است، رهنمودهایی را برای بهبود پاسخ نیروگاه به بار برداری های جزئی ارائه می کند. خلاصه ای از این رهنمودها در زیر آورده شده است:

الف) کنترل کلی نیروگاه؛ برای تحمل باربرداری جزئی، کنترل کلی نیروگاه باید برای تطابق با توان الکتریکی خروجی بی درنگ توان ورودی (جریان سوخت) را کم کند. از آنجا که در این کاهش تأخیرهای زمانی وجود دارند، باید توان ورودی به طور موقت، کاهش زیادی در توان خروجی ایجاد کند. بهترین منبع برای تعیین میزان کاهش توان ورودی، توان خروجی واقعی است.

ب) کنترل دیگ بخار؛ بدون سیستم کنارگذر توربین، بار برداری جزئی از نظر دیگ بخار تزویج شده است، نیز لازم است. لیکن، دیگ های بخار یکبار عبور اغلب دارای سیستم های کنارگذر فوق حرارت ده و

یا توربین با ظرفیت محدود برای حفاظت رله های کوره و کمک به کنترل فشار هستند. از این توانمندی کنار گذر می توان برای ایجاد سهولت در آهنگ کاهش سوخت و جریان آب تغذیه استفاده کرد.

برای دیگ خای نوع طبله ای، باید برای کاهش جریان آب تغذیه به تأخیر انداخته شود زیرا پاسخ بلافاصله سطح آب طبله، با جریان بخار افزایش حاصل در فشار طبله، کاهش می یابد. به علاوه، برای به دست آوردن سطح بالاتری از آب ذخیره در سطح توان پایین تر اضافه تغذیه الزامی می باشد. کنترل مناسب سطح آب، بخصوص برای تغییرات بزرگ در جریان بخار، مهم است. به منظور تقویت توانایی کنترل سطح آب طی یک بار برداری جزئی، باید به افزایش موقت بازه بین حدود عمل کننده بالا و پایین سطح آب، توجه کرد یا عمل کننده را برای جریان شدید آب تغذیه به تأخیر انداخت.

برای هر کدام از انواع دیگ بخار به طور کلی تأخیر در کاهش جریان هوا مطلوب است زیرا اثر سرمایشی جریان هوای اضافی عقب افتادگی های پاسخ جریان سوخت را جبران می کند. لیکن، باید ورود هوا به مشعل های در حال کار نسبت به جریان سوخت کنترل شود تا احتراق پایدار، حفظ شود.

برای پمپ های تغذیه ای که به وسیله توربین های بخار کمکی کار می کنند، بستن شیرهای میان راهی در جریان بخار، وقفه ایجاد می کنند، بنابر این لازم است که از یک منبع بخار جایگزین و یا از پمپ هایی که به وسیله موتور کار می کنند استفاده شود.

ج) کنترل – توربین ژنراتور (توربوژنراتور)؛ کنترل های اضافه سرعت توربین به گونه ای طراحی شده اند تا اضافه سرعت پیش آمده ناشی از باربرداری کامل را به حدود ۱٪ زیر نقاط تنظیم رله اضافه سرعت، محدود کنند. بدهی است که بدین ترتیب از عمل کردن اضافه سرعت حین باربرداری جزئی جلوگیری می شود.