

مدلسازی و عملکرد ماشین هیبریدی رلاکتانس (مقاومت مغناطیسی) سنکرون (همگام) با

نسبت قابل تنظیم X_d/X_q

چکیده: مطالعات تحلیلی و تجربی ماشین هیبریدی رلاکتانس همگام با نسبت متغیر X_d/X_q موضوع این مطالعه است. ماشین شامل یک روتور گرد و یک عضو ماشینی قطب برجسته است که از نظر مکانیکی با هم جفت شده اند و جراثت یکپارچه دارند. دو مجموعه از سیم پیچ های چندفازی در هر استاتور وجود دارد. سیم پیچهای یک مجموعه بین دو بخش دستگاه منتقل میشوند. هر مجموعه از سیم پیچها ممکن است به منبع تغذیه متصل شوند در حالیکه سایرین یک بار خازن متعادل را تغذیه میکنند. نشان داده شده است که با تنظیم بار خازن، نسبت X_d/X_q از لحاظ نظری از صفر تا بی نهایت با فاکتور توان بسیار خوبی تغییر میکند. ویژگی های دستگاه با استفاده از تئوری دو محور تعمیم یافته، تأیید شد و با استفاده از آزمایش اعتبارسنجی شد. نتایج تجربی و تحلیلی به دست آمده شرایط خوبی را نشان داد. اشباع با استفاده از تغییراندوکتانس محور d با بار دستگاه بررسی شد. مجموعه ای از سیم پیچها ممکن است به این منظور که دستگاه به عنوان یک موتور خود-شروع و خود-همگام ساز باشد، وارد شدند. سیم پیچ میدان روتور زمانی که با dc تغذیه میشود، ماشین را قادر به عمل به عنوان ژنراتور قطب برجسته مستقل میکند. به این منظور، نشان داده شده است که برای یک نسبت بالای برجستگی، توان رلاکتانس میتواند به طور قابل توجهی بالاتر از توان تحریک باشد.

۱. مقدمه

دستگاههای رلاکتانس اساساً یک استاتور با سیم پیچ حامل جریان که مانند موتور القایی تولید میدان مغناطیسی دوار میکنند، و یک عضو دوم، روتور، که به صورت مغناطیسی ناهمسانگرد هستند، را تشکیل

داده اند؛ که رلاکتانس عبور شار در امتداد یک محور، مینیمم است و در راستای محور دوم، در درجه الکتریکی ۹۰ نسبت به محور اولیه، ماکزیمم است. بهره برداری از دستگاه به گرایش محور با رلاکتانس کم، نسبت به الحاق با محور میدان مغناطیسی دوار بستگی دارد.

دستگاههای رلاکتانس به دلیل توان خروجی کم یک موقعیت بسیار پایین را در خانواده ماشین الات الکتریکی دوار اشغال میکنند، و فاکتور توان در مقایسه با یک دستگاه ماشین القایی با ابعاد مشابه، خروجی یک سوم قبلی است. با وجود این معایب، موتور رلاکتانس تقریباً انتخابی اجتناب ناپذیر در ساعتهای الکتریکی، دیسکهای نساجی، درایوهای سوئیچ همزمان و امثالهم هستند. از میان کاربردهای پیچیده تر، استفاده از آنها برای کنترل موقعیت میله های کنترل دقیق و قابل اعتماد در راکتورهای هسته ای، و به عنوان موتورهای اسلیو در سیستمهای چند ماشینی نیازمند همگام سازی دقیق همه اجزا در همه زمانها است.

تلاشهای زیادی انجام شد تا توان خروجی ماشین را با طراحی مبتکرانه و بازطراحی ساختار موتور بهبود ببخشد. تلاشهای به منظور افزایش نسبت X_d / X_q بر آنچه که توان خروجی بدان وابسته است انجام شد که اساساً به معنی کاهش راکتانس محور q است. مشکل اصلی افزایش نسبت X_d / X_q با کاهش راکتانس محور q این است که همیشه کاهش همراه در X_d وجود دارد که منجر به نسبت X_d / X_q کمتر از قرارداد میشود. سایر عواقب آن، افزایش جریان بدون بار دستگاه و مشکلات همگام سازی در کاربردهای شروع خط است.

خازنها قرنهای به عنوان عنصر بهبود فاکتور توان در سیستمهای AC شناخته شده اند. برای بهبود فاکتور توان یک ماشین الکتریکی با اتصال یک خازن به آن، یک سیم پیچ دیگر مورد نیاز است. به این دلیل که اگر

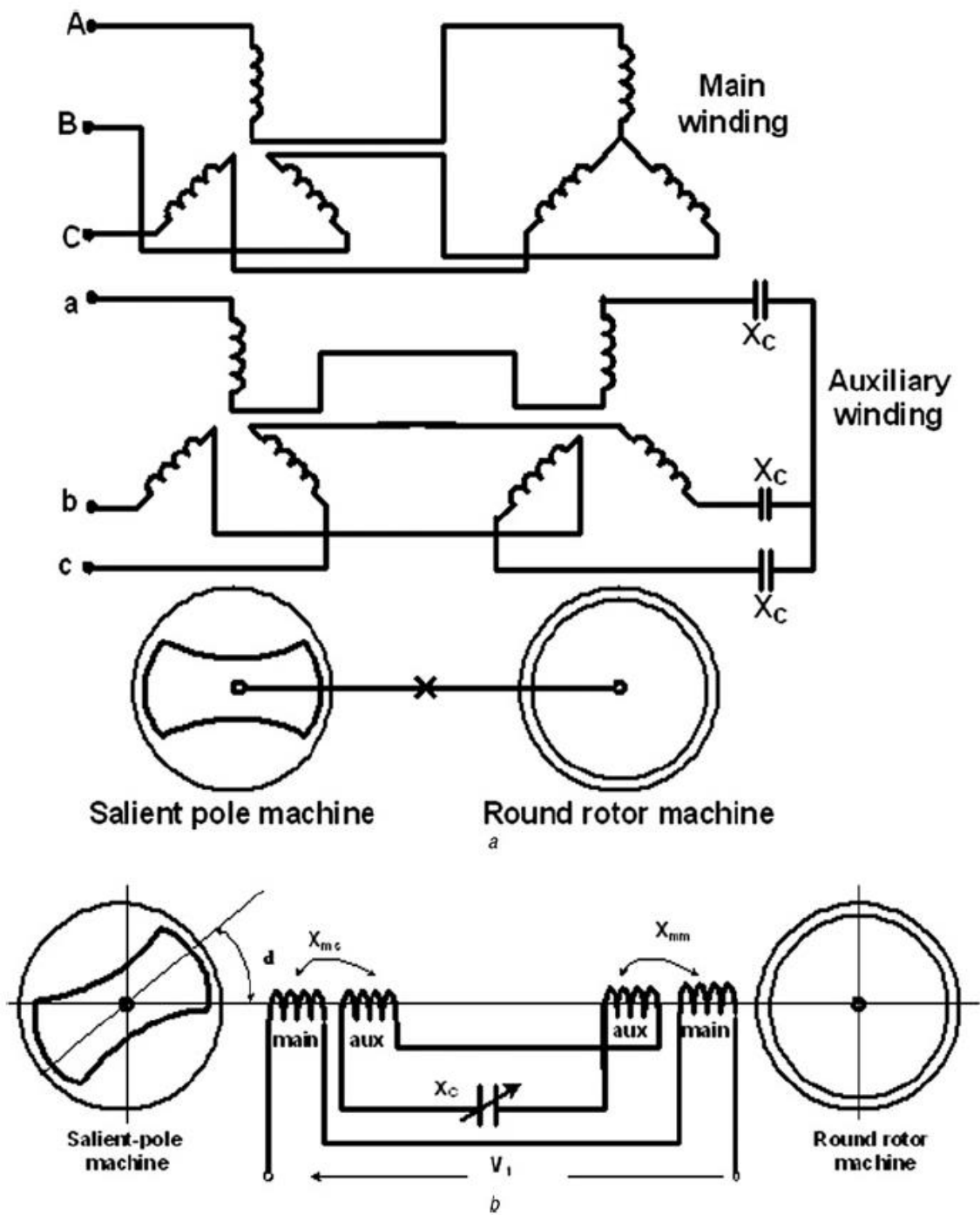
یک خازن به طور سری با یک سیم پیچ دستگاه متصل شود، راکتانس القایی آن که مسئول تبدیل انرژی است، تغییر خواهد کرد. یک اتصال موازی به فاکتور توان منبع اصلی کمک خواهد کرد و کمترین اثر را بر دستگاه خواهد داشت. بدین منظور، یک سیم پیچ ثانویه مورد نیاز است. این سیم پیچ ثانویه باعث میشود ماشین شبیه همتای تک فاز خود باشد که سیم پیچ اصلی به منبع متصل است و سیم پیچ به خازن. تعدادی از چنین مطالعاتی توسط محققین زیادی انجام شده اند. اولین گزارش چنین طرحی "Wanlass موتور" است که توسط Wanlass ساخته شد. این طرح، دو سیم پیچ استاتور (با شماره قطب یکسان) یک موتور القایی را مستقیماً به منبع وصل میکند اما با یکی از سیم پیجهایی که در ۶۰ درجی نسبت به سایرین جایگذاری شده است و به طور سری به خازن متصل است. ناکارآمدی این موتور القایی بعداً توسط اومان و هس به اثبات رسید. گزارش دوم "موتور سیم پیچ unity-plus" است که توسط رابرتز با ادعای کارایی بهتر نسبت به موتور Wanlass ساخته شد. طرح اتصال آن متفاوت است چرا که یک مجموعه سیم پیچ به منبع متصل است و سایرین تنها به خازن متصل هستند. طرح رابرتز مورد موشکافی دقیقتری توسط Medarametla و سایرین قرار گرفت که تأیید کرد که منجر به فاکتور توان نزدیک به واحد میشود اما کارایی بهتری ندارد. یکی از ویژگی های معمول طرحهایی Wanlass و رابرتز این است که هر دو برای موتورهای القایی استفاده شدند.

در ادامه این، نویسندگان این مقاله بررسی خازن با کمک ماشین رلاکتانس همگام را بر عهده گرفتند تا امکان کاهش برخی از کمبودهای کلیدی ذاتی ذکر شده در بالا را تعیین کنند. در رفرنس های ۶ تا ۸، اوب و همکارانش یک کپی از طرح Wanlass را به عنوان ماشین رلاکتانس همگام شروع خط گزارش کردند. این ماشین به نظر میرسد که فاکتورهای توان بسیار خوبی را فراهم میکند، به خصوص در زوایای بار پایین با کاهش تلفات کلی در مقادیر مشخص خازن (ظرفیت). Anih و Agu و همکاران Agu طرحی دقیق

که در اینجا ارائه شده است را تصور کرده و گزارش کردند اما ماشین را با استفاده از رویکرد تئوری مدار نیمه بصری بر اساس امپدانس ماشین تحلیل کردند. چنین رویکردی اطلاعات کافی برای مشاهدات مستقیم تغییرات کوادراتور و پارامترهای محورها با زاویه بار در حالت پایا و کارایی اجرایی در حالت پویا را نمیدهد. تنها یک مجموعه کامل از معادلات مدل دینامیکی مشتق شده از تئوری شار و تئوری شناخته شده دو محوری، قادر خواهد بود تا این جزئیات مورد نیاز را فراهم کند و ماشین را بیشتر قابل امتحان و جذاب خواهد کرد. نویسندگان همچنین از سایر طرحهای ماشین همگام دو سیم پیچی آگاه بودند، اگرچه توسط خازنهای کمک نشده بودند اما چنین یافته های واقعی مشابه با آنچه در اینجا آمده، گزارش میکنند.

۲. توصیف ماشین

یک چینش ماشین سنتی اما ساده که راکتانس میتواند بدون هیچگونه تاثیر زیانباری بر X_d تغییر کند، در این مقاله پیشنهاد شده است. ماشین اساساً از یک عنصر ماشین قطب القایی جفت شده با یک عنصر ماشین روتور گرد تشکیل شده است که هر ماشین دو مجموعه از سیم پیچهای استاتور چند فازی است. سیم پیچهای هر مجموعه بین دو بخش ماشین منتقل میشوند. هر مجموعه از سیم پیچ ممکن است به منبع متصل باشد در حالیکه سایرین به بانک بار خازن متوازن متغیر متصل هستند. با تغییر ساده باز خازن، نسبت X_d / X_q میتواند از نظر تئوری از صفر تا بی نهایت بدون دستکاری هندسه روتور در فاکتورهای توان بسیار خوب، شامل unity تغییر کند. شکل ۱ نمودار اتصال دو ماشین را که از این پس "ماشین هیبریدی" نامیده خواهد شد، نشان میدهد.



یک مبدل سه فاز ساده که سیم پیچ اولیه و ثانویه با راکتانس مغناطیسی X_m معادل راکتانس محور مستقیم X_d ماشین قطب القایی، نشان داده میشوند، میتواند به منظور کاهش اینرسی کلی روتور و حذف

نیاز به جفت شدن و تمام مشکلات مکانیکی که ممکن است ایجاد شود، از نظر مفهومی جایگزین بخش ماشین روتور گرد شود. این ویژگی تنها برای چپش توصیف شده در اینجا () معتبر است چرا که ماشین روتور گرد بدون کنداكتور روتور قادر به شرکت در هیچ گشتاور چرخشی نخواهد بود و بنابراین در فرایند تبدیل انرژی شرکت نخواهد کرد.

۳. توسعه مدل ماشین

مدل ارائه شده در اینجا برای ماشینی است که هیچ کنداكتور روتوری ندارد چراکه علاقه اولیه در اینجا کارایی حالت پایا ماشین در مقادیر مختلف ظرفیت است. کارایی مشابه، در سیستم دینامیک برای کاربرد شروع خط از نزدیک بررسی شده است و موضوع مقاله دیگری را تشکیل خواهد داد. در تحلیلهایی که در ادامه آمده است، زیروند بالایی مورد، جملات سیم پیچ اصلی را نمایی میدهند در حالیکه زیروند پایینی مورد برای جملات سیم پیچ کمکی است. مدل ارائه شده، بر فرضهای معمول ماشینهای همگام مدلسازی شده همانطور که در متون کلاسیک وجود دارد، و برمدار بر-فاز نیمه بصری در شکل ۱b استوار است.

مدل دینامیک این ماشین از شکل ۱a استخراج شده است. شش معادله ولتاژ ماشین هیبریدی در فریم مرجع استاتور میتواند بدین شکل نوشته شود.

$$V_H = I_H R_H + \frac{d\lambda_H}{dt} \quad (1)$$

که V_H نشان دهنده ولتاژهای سیم پیچ اصلی و کمکی است و از ماتریس زیر به دست آمده است:

$$V_H = [V_{ABC} V_{abc}] = [V_A \quad V_B \quad V_C \quad V_a \quad V_b \quad V_c]^T \quad (2)$$

ماتریس جریان از فرمول زیر به دست آمده:

$$\mathbf{I}_H = \begin{bmatrix} I_{ABC} & I_{abc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_A & I_B & I_C & I_a & I_b & I_c \end{bmatrix}^T \quad (3)$$

در حالیکه ماتریس مقاومت فرمول زیر است:

$$\mathbf{R}_H = \text{diag} \begin{bmatrix} R_A & R_B & R_C & R_a & R_b & R_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

بیان نشت شار این است:

$$\begin{aligned} \lambda_H &= \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} \\ L_{21} & L_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ABC} \\ I_{abc} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} L_{SS} + L_{RR} & L_{MS} + L_{MR} - 2L_L \\ L_{MS} + L_{MR} - 2L_L & L_{SS} + L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ABC} \\ I_{abc} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

در معادله ۵، LSS ماتریس انداکتانس ۳ در ۳ سیم پیچ سه فازی استاتور در نیمه قطب القایی ماشین است، LRR ماتریس انداکتانس ۳ در ۳ بخش روتور گرد ماشین است. هر کدام از LRR و LSS بخشهای نشت مربوط به خود را در مکانهای مناسب در فرمول ۶ و ۸ دارند. با این فرض که سیم پیچهای اصلی و کمکی مشخص هستند و هر دو به طور مجازی جفت شده و موقعیت slot مشابهی را اشغال کرده اند، انداکتانس مجازی بین دو مجموعه سیم پیچ نیز یکسان هستند. بنابراین در معادله ۵ LMS=LSS و LMR=LRR هستند. نهایتاً، LL ماتریس انداکتانس نشت ۳ در ۳ هر سیم پیچی است که در روتور گرد یا در نیمه قطب

القایی ماشین هیبریدی هست که برابر نیز هستند. ماتریس انداکتانس برای هر کدام از دو سیم پیچ استاتور ماشین قطب القایی به خوبی در نشریات مشخص است که بدین شکل است

$$L_{ss} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_o - L_m \cos 2\theta_r & -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_{ls} + L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -\frac{1}{2}L_o - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) & L_{ls} + L_o - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (6)$$

که

$$L_o = \frac{1}{3}(L_{md} + L_{mq}) \quad \text{and} \quad L_m = \frac{1}{3}(L_{md} - L_{mq}) \quad (7)$$

برای نیمه ماشین روتور گرد دستگاه $L_{md}=L_{mq}$. این implies که برای این مورد $L_o = (2/3)L_{md}$ و $L_m = 0$ ، بنابراین ماتریس انداکتانس سیم پیچ استاتور میتواند از معادله ۶ به دست آید:

$$L_{RR} = \begin{bmatrix} L_{ls} + \frac{2}{3}L_{md} & -\frac{1}{3}L_{md} & -\frac{1}{3}L_{md} \\ -\frac{1}{3}L_{md} & L_{ls} + \frac{2}{3}L_{md} & -\frac{1}{3}L_{md} \\ -\frac{1}{3}L_{md} & -\frac{1}{3}L_{md} & L_{ls} + \frac{2}{3}L_{md} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ماتریس انداکتانس نشت بدین شکل است:

$$L_L = \text{diag}[L_{ls} \quad L_{ls} \quad L_{ls}] \quad (9)$$

حالا زیر ماتریسهای انداکتانس معادله ۵ میتوانند به شکل زیر نوشته شوند (معادله ۱۰ را در پایین صفحه بعد ببینید)

$$L_{11} = L_{22} = \begin{bmatrix} 2L_{ls} + L_1 - L_m \cos 2\theta_r & -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & 2L_{ls} + L_1 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) & 2L_{ls} + L_1 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (10)$$

و (معادله ۱۱ را در پایین صفحه بعد ببینید)

$$L_{12} = L_{21} = \begin{bmatrix} L_1 - L_m \cos 2\theta_r & -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) \\ -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{\pi}{3}\right) & L_1 - L_m \cos 2\left(\theta_r - \frac{2\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) \\ -L_2 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{\pi}{3}\right) & -L_2 - L_m \cos 2(\theta_r + \pi) & L_1 - L_m \cos 2\left(\theta_r + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (11)$$

که

$$L_1 = L_{md} + \frac{1}{3}L_{mq} \quad \text{and} \quad L_2 = \frac{1}{2}L_{md} + \frac{1}{3}L_{mq} \quad (12)$$

یک مشاهده نزدیک از معادلات ۱۰ و ۱۱ در مقایسه با معادله ۶ نشان میدهد که تنها جملات مقادیر میانگین self و انداکتانس مجازی ماشین همگام سنتی اصلاح شده است، درحالیکه جملات وابسته به موقعیت روتور به همان شکل باقی مانده اند. به ویژه جملات مقادیر میانگین self و انداکتانس مجازی با خاصیت اتصال هر دو سیم پیچ استاتور به ترتیب با $L_{md}(3/2)$ و (1)

$(6)(L_{md} + 4L_{mq})$ بهبود یافته اند.

از معادلات ۱۰ و ۱۱ مشهود است که ماتریس انداکتانس ماشین هیبریدی، یک تابع از موقعیت روتور است و بنابراین تکنیکهای انتقال سنتی با استفاده از ماتریس ۱۳۳ برای رهایی آن از این وابستگی به کار میروند.

$$T(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin \theta & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \quad (13)$$

این تبدیل در $\theta = \theta_r$ بر معادله ۵ با معادلات ۱۰ و ۱۱ جاگزاری شده مانند زیر، اعمال میشود:

$$\begin{aligned} \lambda_{\text{QD}} &= \begin{bmatrix} T(\theta)L_{11}T(\theta)^{-1} & T(\theta)L_{12}T(\theta)^{-1} \\ T(\theta)L_{21}T(\theta)^{-1} & T(\theta)L_{22}T(\theta)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{QD}0} \\ I_{qd0} \end{bmatrix} \\ &\equiv \begin{bmatrix} L_{\text{QDS}} & L_{\text{QDM}} \\ L_{\text{QDM}} & L_{\text{QDS}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{\text{QD}0} \\ I_{qd0} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

که

$$\begin{aligned} L_{\text{QDS}} &= \begin{bmatrix} 2L_{ls} + L_{md} + L_{mq} & 0 & 0 \\ 0 & 2(L_{ls} + L_{md}) & 0 \\ 0 & 0 & 2L_{ls} \end{bmatrix} \text{ and} \\ L_{\text{QDM}} &= \begin{bmatrix} L_{mq} - L_{md} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

مشاهده اینکه اتصالات شار محور d و محور q برای دو مجموعه سیم پیچ به شکل زیر است، راحت است:

$$\lambda_{Dd} = \begin{bmatrix} \lambda_D \\ \lambda_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(L_{ls} + L_{md}) & 0 \\ 0 & 2(L_{ls} + L_{md}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_D \\ I_d \end{bmatrix} \quad (16)$$

و (معادله ۱۷ را ببینید)

$$\lambda_{Qq} = \begin{bmatrix} \lambda_Q \\ \lambda_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (2L_{ls} + L_{md} + L_{mq}) & -(L_{md} - L_{mq}) \\ -(L_{md} - L_{mq}) & (2L_{ls} + L_{md} + L_{mq}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_Q \\ I_q \end{bmatrix} \quad (17)$$

از معادله ۱۸ مشخص است که انداکتانس کلی محور d دو مجموعه سیم پیچ یکسان هستند و کاملاً غیرجفت هستند درحالیکه ماتریس انداکتانس محور q معادله ۱۷ حضور یک جمله جفت شده را نشان میدهد. همانطور که بعدها خواهیم دید، این موضوع توضیح میدهد که چرا رآکتانس محور d ماشین، زمانی که بار خازنی سیم پیچ کمکی تغییر میکند ثابت باقی می ماند، درحالیکه رآکتانس محور q تغییر میکند.

معادله ولتاژ ماشین که در معادله ۱ در بالا داده شده است، مشابه این معادله برای هر ماشین همگام است و میتوان نشان داد که معادله ولتاژ منتقل شده در فریم مرجع روتور q-d میتواند شکل سنتی

$$\begin{aligned} V_Q &= 2r_s i_Q + \omega_r \lambda_D + \frac{d\lambda_Q}{dt} \quad \text{and} \\ V_D &= 2r_s i_D - \omega_r \lambda_Q + \frac{d\lambda_D}{dt} \end{aligned} \quad (18)$$

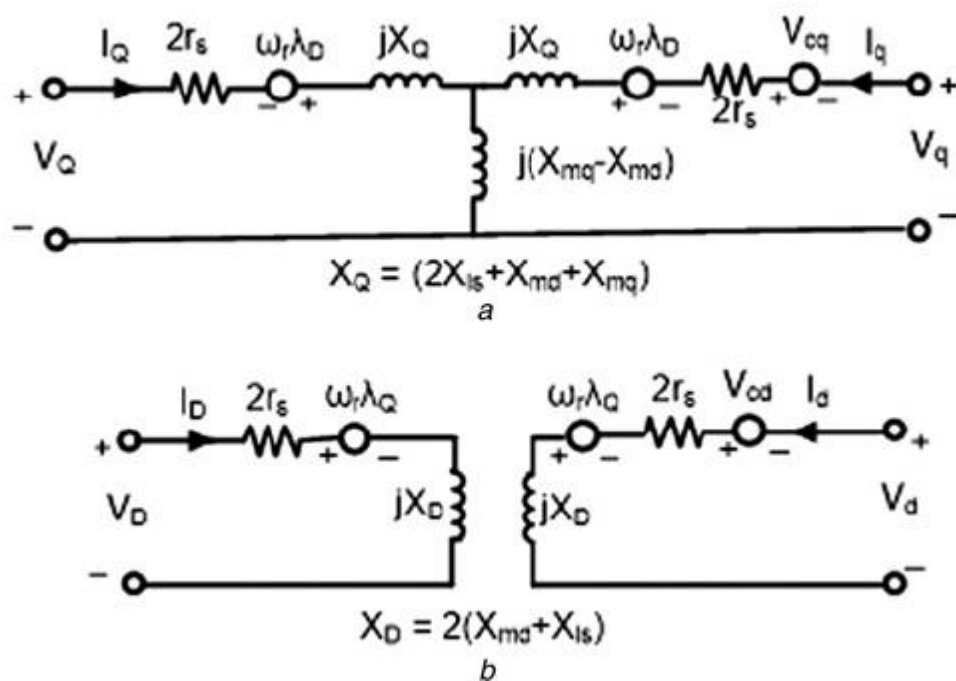
$$\begin{aligned} V_q &= 2r_s i_q + \omega_r \lambda_d + \frac{d\lambda_q}{dt} + V_{cq} \quad \text{and} \\ V_d &= 2r_s i_d - \omega_r \lambda_q + \frac{d\lambda_d}{dt} + V_{cd} \end{aligned} \quad (19)$$

را نگهدارد.

معادلات ۱۸ و ۱۹، به ترتیب ولتاژ سیم پیچ اصلی و کمکی را نشان میدهد. توجه کنید که ولتاژ سیم پیچ کمکی، جملات اضافی V_{cd} و V_{cq} که به آنها اضافه شده است را دارند؛ تا برای محاسبه خازن متصل به آن استفاده شود. در فریم مرجع روتور d-q، توسط اوب داده شده است:

$$\frac{dV_{cd}}{dt} = \frac{i_d}{C} + \omega_r V_{cq} \quad \text{and} \quad \frac{dV_{cq}}{dt} = \frac{i_q}{C} - \omega_r V_{cd} \quad (20)$$

مدار معادل دینامیک ماشین میتواند بر اساس معادلات بالا رسم شود، همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است.



۴. مدل حالت پایا و مدار معادل

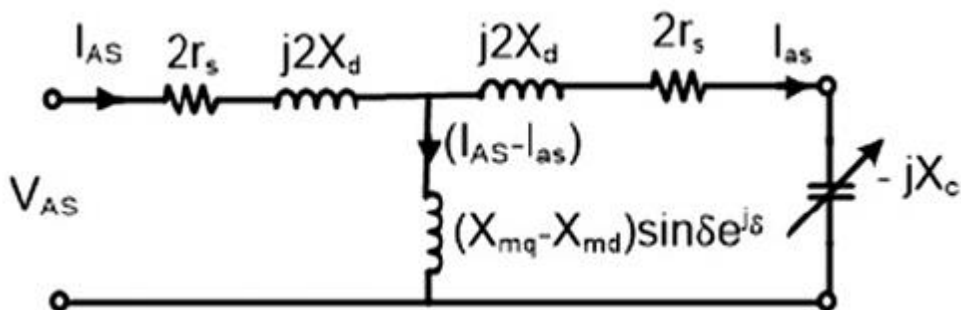
به منظور آزمودن کارایی حالت پایا این ماشین، پارامترهای ماشین راکتانس همگام $4 - 220$ hp pole به 50 Hz، V استفاده شد. بررسی این ماشین با منابع فرکانس متغیر همانند معادله ۱۶ در این مرحله به نظر ارزشمند نمیرسد، چراکه تغییر فرکانس منبع به طور ناگهانی مقادیر راکتانس محورهای و راکتانس خازنی را که عملکرد ماشین را کنترل میکند، تغییر میدهد. بدین منظور، تنها عملکرد شروع خط سرعت ثابت در اینجا بررسی شد. راکتانس غیر اشباع $X_{md} = 124.21 \Omega$ ، $X_{mq} = 78.72 \Omega$

و $X_{ls} = 12.0 \Omega$ است. از آنجاکه سیم پیچهای استاتور ماشین، نصف شده اند؛ راکتانس با فاکتور ۴ تقسیم میشود که میدهد: $X_{md} = 31.05 \Omega$ ؛ $X_{mq} = 19.67 \Omega$ و $X_{ls} = 3.0 \Omega$. راکتانس ماشین با جملات جریان اندازه گیری شدند. وابستگی X_d به زامینه بار در بخش بعدی موردنیاز است چراکه زاویه بار پارامتر عملگر

است. همانطور که در شکل ۴a نشان داده شده است بعد از اندازه گیریهای راکتانس و تستهای بار بحث شده در بخش ۵ از آن نمودار فیت راکتانس معنایسی محور d , X_d به دست آمده است همانطور که در معادله ۲۱ نشان داده شده است. در محاسباتی که بعد از استخراج مدل حالت پایا انجام شد، راکتانس محور d مطابق منحنی اشباع تغییر میکند:

$$X_d = \frac{1}{4}(10\delta^3 - 25\delta^2 + 5.9\delta + 29) \quad (21)$$

تحت عملکرد حالت پایا در فریم مرجع روتور، همیشه جملات متغیر معادلات ۱۸ تا ۲۰ صفر شده اند و با معادلات ۱۶ و ۱۷ جایگزین شده اند، در نتیجه داریم:



$$V_Q = 2r_s i_Q + 2(X_{ls} + X_{md})I_D \quad (22)$$

$$V_D = 2r_s i_D - (2X_{ls} + X_{md} + X_{mq})I_Q + (X_{md} - X_{mq})I_q \quad (23)$$

$$V_q = 2r_s i_q + (2(X_{ls} + X_{md}) - X_c)I_d \quad (24)$$

$$V_d = 2r_s i_d - (2X_{ls} + X_{md} + X_{mq} + X_c)I_q + (X_{md} - X_{mq})I_Q \quad (25)$$

هیچ منبع ولتاژی برای سیم پیچ دوم وجود ندارد، بنابراین $V_d = V_q = 0$. همچنین، از آنجاکه سیم پیچ اصلی از مجموعه ولتاژهای سینوسی متوازن تغذیه میشود:

$$V_Q = V \cos \delta \quad \text{and} \quad V_D = -V \sin \delta \quad (26)$$

که V مقدار rms ولتاژ تغذیه و δ زاویه بار است.

زمانی که معادله ۲۶ در معادلات ۲۱ و ۲۲ جاگذاری میشود، این معادلات میتوانند صریحاً برای I_Q , I_D , I_q و I_d در جملات V , r_s

X_{mq} ,

X_{md} , X_{ls}

، X_c و δ حل شوند. بیانهای نتیجه شده برای جریانهای این محورها بسیار طولانی هستند. در سرعتهای همگام در مود حالت پایا، ارتباط زیر بین سیم پیچهای اصلی و کمکی فریم مرجع روتور وجود دارد که متغیرها و فازورهای چرخان همگام را بیان میکند.

$$F_A = (F_Q - jF_D)e^{j\delta} \quad \text{and} \quad F_a = (F_q - jF_d)e^{j\delta} \quad (27)$$

که F میتواند فازورهای اتصال جریان، ولتاژ یا شار باشد. از معادله بالا، مدار معادل بر فاز حالت پایا میتواند منتج شود و در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ باید ذکر شود که $X_d = X_{md} + X_{ls}$. حالا ممکن است به تغییرات پارامتر ماشین در حالت پایا با استفاده از معادله ۲۷ یا شکل ۳ دست یافت.

۴،۱. امپدانس ورودی

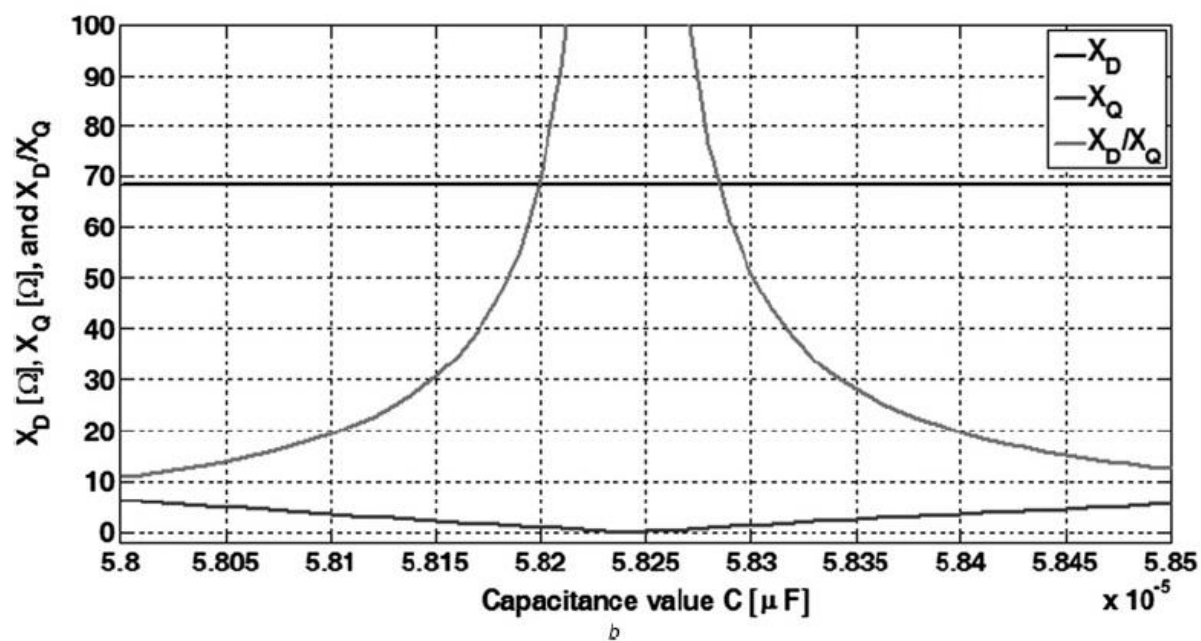
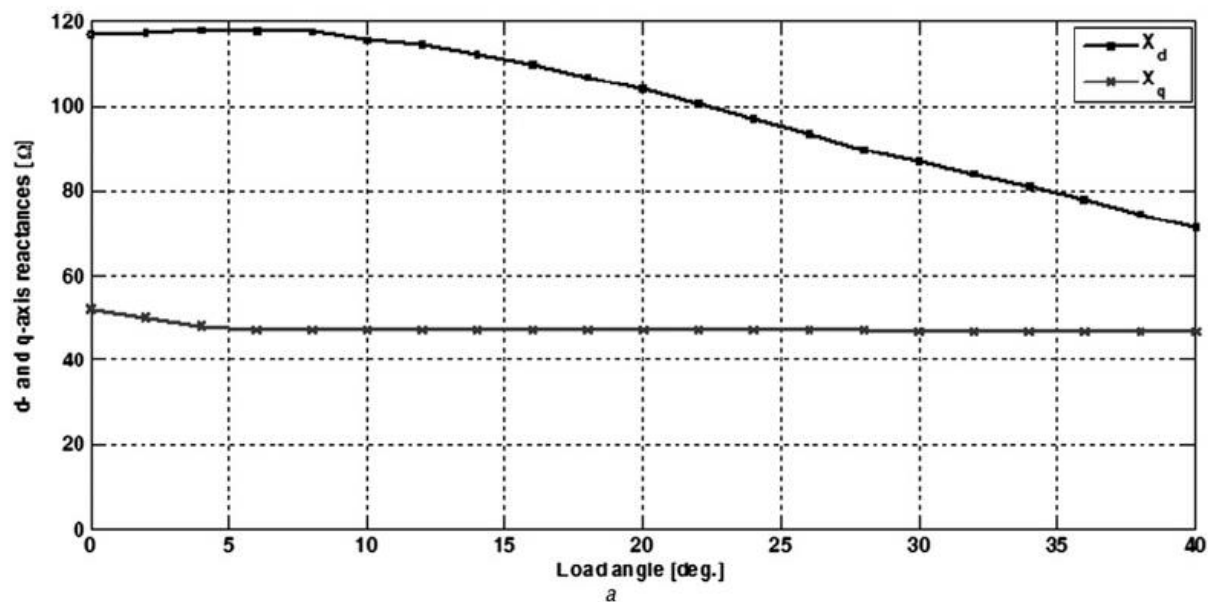
امپدانس ورودی ماشین میتواند با یافتن نسبت ولتاژ ورودی VAS به جریان سیم پیچ اصلی IAS با استفاده از معادله ۲۷ یا با استفاده از رویکرد تئوری جریان ساده با نگاه به ترمینالهای ورودی شکل ۳ به دست بیاید. هر دو رویکرد طبیعتاً نتایج یکسانی میدهند، با اینحال، برای اختصار، ما دومی را استفاده کردیم و امپدانس ورودی به شکل زیر به دست آمد:

$$Z = 2(r_s + jX_d) + \frac{(2r_s + j(2X_d - X_c)) \times (X_{mq} - X_{md}) \sin \delta e^{j\delta}}{(2r_s + (X_{mq} - X_{md}) \sin \delta e^{j\delta}) + j(2X_d - X_c)} \quad (28)$$

۴,۲. راکتانس محور تئوری ماشین

به طور کلی، بیان امپدانس میتواند به جملات حقیقی (Re) و موهومی (Xe) تفکیک شود. یک نمودار از مقاومت حقیقی در برابر بخش موهومی معادله ۲۸ برای مقادیر مختلف X_c با تغییر δ از ۰ تا π ، خانواده اس از دایره ها را همانطور که در شکل ۵ نشان داده شده است، تولید میکند. هر کدام از این دوایر (امپدانس loci) دارای یک راکتانس محور d ثابت معادل $X_D = 2(X_{ls} + X_{md})$ است اما راکتانس محور کوادراتور X_Q تغییر میکند و تابعی از متغیر X_c است.

۴,۲,۱. راکتانس محور مستقیم: با استفاده از معادله ۲۸ در حد $\delta \rightarrow 0$ و برای مقاومت سیم پیچ استاتور قابل چشمپوشی، راکتانس محور d معادل X_D است و با معادله ۲۹ به دست می آید که به وضوح مستقل از راکتانس خازنی است:



$$X_D = j2(X_{ls} + X_{md}) \quad (29)$$

۴،۲،۲. راکتانس محور کوادراتور: در حد $\delta \rightarrow \pi/2$ و برای مقاومت سیم پیچ استاتور قابل چشمپوشی،

راکتانس محور q معادل X_Q است و با معادله زیر به دست می آید:

$$X_Q = j \frac{4X_{md}(X_{ls} + X_{md} + X_{mq}) + 4X_{ls} - (2X_{ls} + X_{md} + X_{mq})X_c}{2X_{ls} + X_{md} + X_{mq} - X_c} \quad (30)$$

مشخصاً، میتوان دید که تنها راکتانس محور کوادراتور توسط ظرفیت متصل به سیم پیچ کمکی تاثیر میگیرد. در نتیجه، تغییر راکتانس خازنی، تنها راکتانس محوری کوادراتور را تغییر میدهد، در حالیکه راکتانس محور مستقیم بی تاثیر باقی می ماند.

نسبت X_d/X_q ۴,۳

نسبت موثر راکتانس X_D/X_Q ماشین هیبریدی میتواند با گرفتن نسبت از معالات ۲۹ تا ۳۰ از نزدیک امتحان شود. راه آسانتر این است که این نیست راکتانس را به شکلی گرافیکی نمایش داد، همانطور که در شکل ۴b نشان داده شده است، که برای تغییر X_C ، نمودارهای X_D , X_Q و سپس X_D/X_Q نشان داده شده اند. در نمودار، مقادیر ظرفیت (به میکروفاراد) به جای X_C به منظور منظم کردن مقادیر واقعی موجود برای حتی مقدار صفر راکتانس محور کوادراتور داده شده است. از معادله ۳۰ میتوان دید که از نظر تحلیلی، راکتانس محور کوادراتور صفر میتواند به دست بیاید وقتی:

$$X_c = \frac{4X_{md}(X_{ls} + X_{md} + X_{mq}) + 4X_{ls}}{2X_{ls} + X_{md} + X_{mq}} \quad (31)$$

برای ماشین مورد مطالعه، این به معنی ظرفیت حدود ۱۵۸,۲۳ فاراد است.

بررسی معادله ۲۸ نشان میدهد که $Z \text{ loci}$ برای مقادیر مختلف بار ظرفیت سیم پیچ کمکی XC با تغییر δ از صفر تا پی، خانواده ای از دوایر با مرکز $[(XD+XQ)^{1/2}, 0]$ و شعاع $(XD-XQ)^{1/2}$ میدهد که XQ پارامتری متغیر است که به XC بستگی دارد. همه دایره ها به خط $XD=2Xd$ مماس هستند. راکتانس محور کوادراتور XQ بنابراین به تغییر XC تغییر میکند، همانطور که در شکل ۵a نشان داده شده است، درحالیکه راکتانس محور d ثابت باقی می ماند. برای هر locus امپدانس، یک جریان locus مربوطه وجود دارد. هر جریان loci به نقطه $IAS=VAS/(Xd^2)$ ، مماس است، همانطور که در شکل ۵b نشان داده شده است. مرکز هر دایره بر محور افقی از $+\infty$ تا $-\infty$ میخوابد. راکتانس محور q حتی میتواند منفی باشد و ممکن است از نظر اندازه بزرگتر از XD باشد.

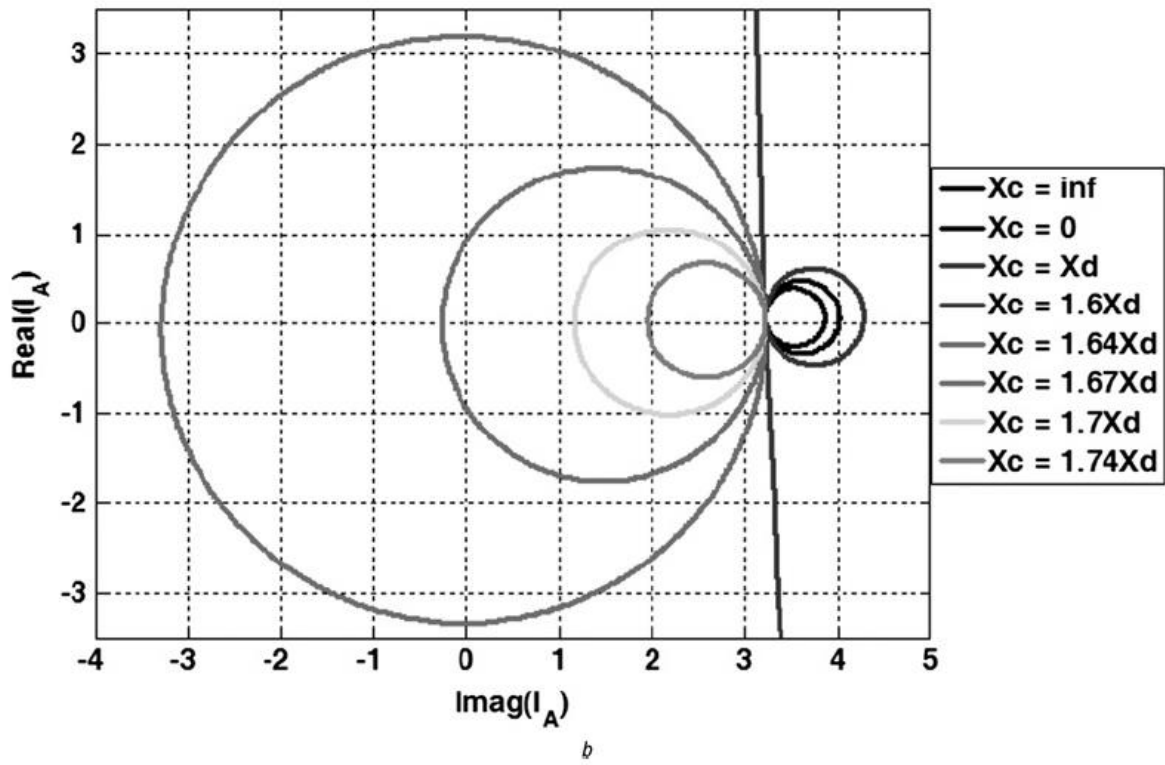
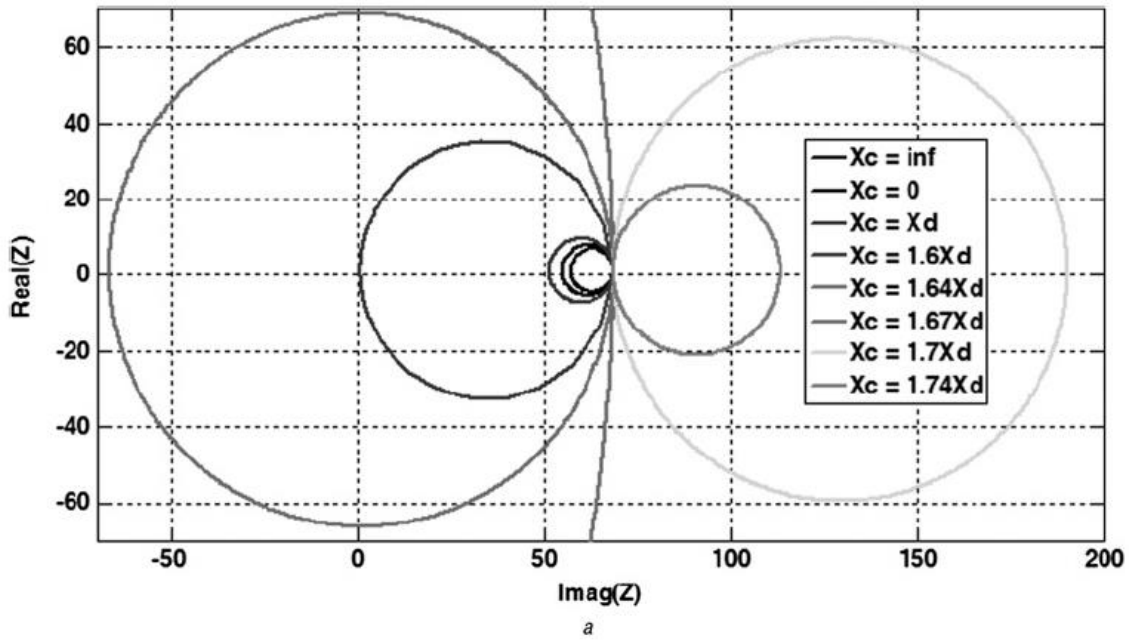
محور افقی خط حقیقی $(Z) = 0$ که مطابق با $(IAS) = 0$ حقیقی است که در شکل ۵ نشان داده شده است، انتقال ماشین از تولید تا عملکرد موتور را نشان میدهد. در این نقاط، ماشین نه فعالیت موتوری دارد نه تولیدی و توان ورودی $Vicosj$ ، تنها فقدان سیم پیچ را تامین میکند.

از شکل ۵a مشاهده شده است که بدون سیم پیچ کمکی $(XC=0)$ ، مقدار $XD=68.3\Omega$ است، درحالیکه محور کوادراتور $XQ=56.9\Omega$ نسبت XD/XQ بسیار پایینی را نشان میدهد. فاکتور توان و گشتاور پیچشی مربوط به اینها نیز در شکل ۷a و b به ترتیب نشان داده شده اند و پایین نیز هستند.

وقتی سیم پیچ کمکی وارد میشود و مدار کوتاه میشود $(XC=0)$ ، ابعاد locus امپدانس افزایش می یابد، بدون تغییر راکتانس محور d ، XD که در $XD=68.3\Omega$ ثابت باقی می ماند در حالیکه راکتانس محور کوادراتور به 54.7Ω کاهش می یابد؛ بنابراین نسبت بالاتر XD/XQ در مورد مدار باز میدهد. فاکتور توان و

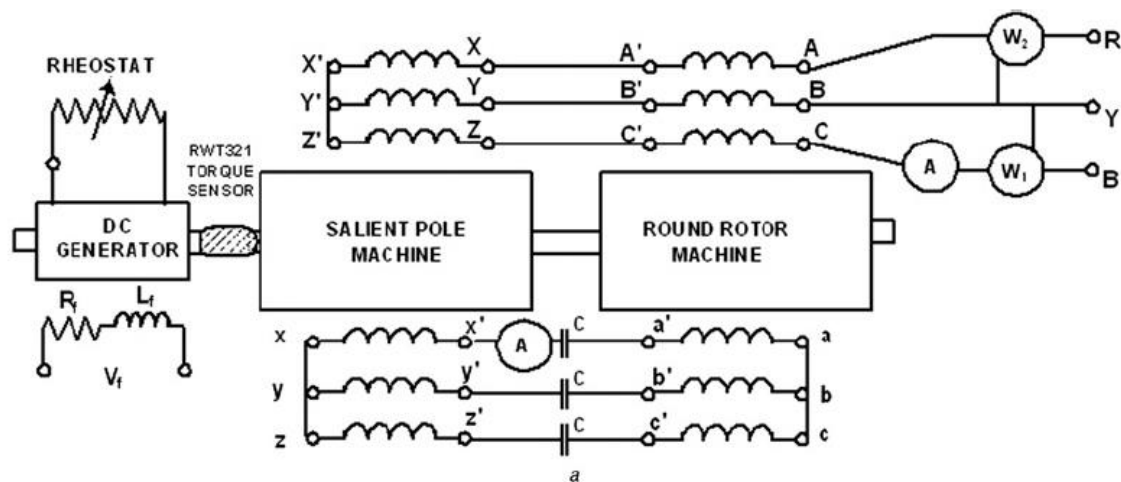
گشتاور پیچشی همانطور که در نمودار مربوطه دیده میشود، بهبود می یابد. وارد کردن یک بار خازنی متغیر به سیم پیچ کمکی، راکتانس محور کوادراتور را متغیر میکند و میتواند از صفر تا بی نهایت تغییر کند. برخی از loci ماشین هیبریدی، مورد توجه خاصی هستند.

برای $X_C = 1.6X_d$ ، راکتانس محور کوادراتور کاملاً خنثی شده است ($i.e. X_Q = 0$)، با راکتانس خازنی که منجر به توان خروجی بالای بی نهایت و فاکتور توان واحد میشود. با افزایش بیشتر X_C بین $1.6X_d$ و $1.67X_d$ ، X_Q منفی میشود و فاکتور توان leading میشود. برای راکتانس خازنی $X_C = 1.64X_d$ ، مرکز امپدانس locus با origin برخورد میکند، که $|X_Q| = |X_D|$ و ماشین، جریان یکسانی را بدون توجه به بار، میکشد یا تامین میکند. وقتی جریان loci، سومین کوادرات را در برمیگیرد، ماشین به عنوان یک ژنراتور قادر خواهد بود بارهای فاکتور توان تاخیر را تامین کند و به عنوان موتور بارهای فاکتور توان پیشتازی را تامین کند.



برای $XQ, XC = ۱,۶۷X_d$ بی نهایت است و locus جریان مربوطه $I_Q = ۰$ است. نشانه این موضوع، این است که XQ حالا بزرگتر از X_D است و محور عملگر ماشین رادیان $\pi/2$ جابجا میشود و محور Q حالا محور بی بار میشود.

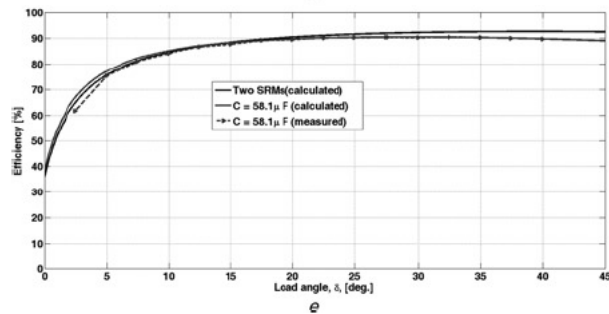
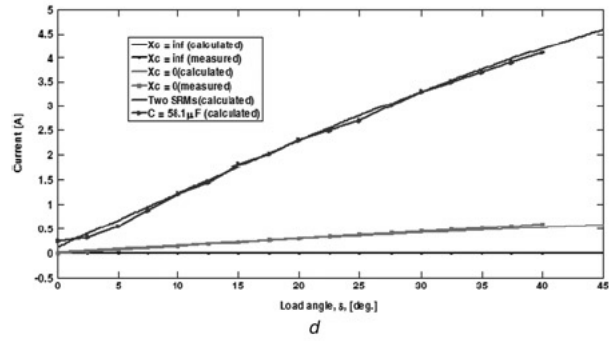
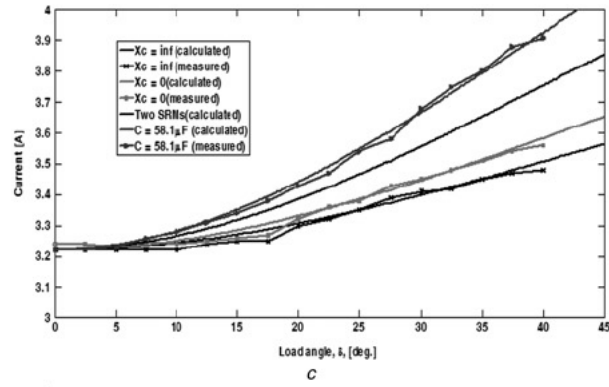
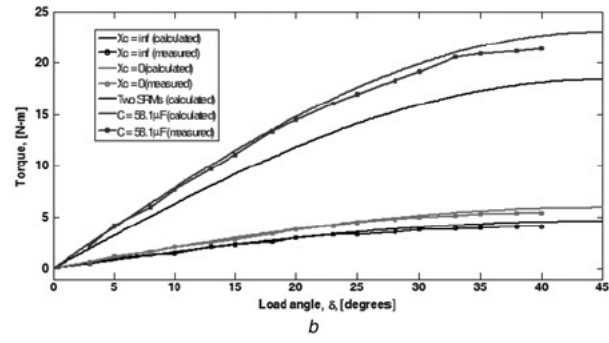
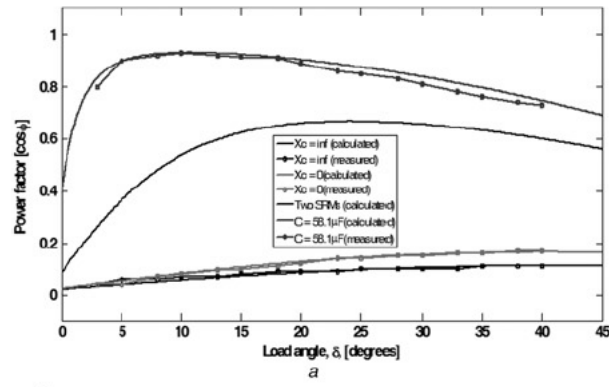
بین $XQ, XC = ۱,۶۷X_d$ و $۲X_d$ ، امپدانس $loci$ ، سمت راست محور $XQ = \infty$ قرار میگیرد، در طبیعت و کوچک شدن، القایی است. کوچک شدن $loci$ تا شده به این دلیل است که راکتانس خازنی بزرگتر میشود و بنابراین امپدانس سیم پیچ کمکی به سمت موارد مدار باز افزایش می یابد، که در طبیعت و نتایج القایی است، و جریان در سیم پیچ کمکی کاهش می یابد.



اگرچه مقاومت در نمودار قابل چشم پوشی است، حضور آن ممکن است امپدانس و جریان $loci$ را به صورت عمودی به مقداری برابر با مقدار مقاومت، به سمت بالای محور افقی جابجا کند.

۵. ماشین هیبریدی تجربی

دو واحد یکسان از موتورهای القایی سه فازی ۴ قطبی 2 Hz , 50 V , 220 hp از قفسه به دست آمد. طول محوری موثر و ابعاد شیار روتور به ترتیب ۸۵ و ۹۲,۵ میلیمتر است. سیم پیچهای استاتور هر دو ماشین به دو بخش مساوی سیم پیچ اصلی و کمکی، تفکیک شدند. سیم پیچهای اصلی به آنتی-سری ها متصل شدند و هر کدام یک بار ظرفیت متوازن را تغذیه میکنند، که مدار باز یا مدار کوتاه هستند. بخشهای روتور یکی از ماشینها تراش شدند تا یک برجستگی ۴ قطبی متقارن با نسبت قوس قطب به زمینه قطب معادل ۰,۶ ایجاد کنند درحالیکه قفس روتور با اتصالات انتها حلقوی درون قطبی باقی می ماند. شکاف هوای اصلی، g_1 ۰,۳۱ میلیمتر به عنوان موتور القایی اصلی باقی ماند و فضای شکاف درون قطبی g_2 به ۳,۲ میلی متر کاهش یافت. یک روتور گرد جدید بدون قفس برای ماشین دوم ساخته شد. برای متوازن کردن راکتانس دو ماشین، برای معادل کردن راکتانس همگام ماشین روتور گرد با راکتانس محور d ماشین دوم، دو گزینه ممکن است، (i) استفاده از تعداد مختلفی از چرخش، برای سیم پیچهای دو ماشین (به وضوح، ماشین قطب برجسته تعداد بیشتر خواهد داشت)، یا (ii) استفاده از مقادیر متفاوت شکاف هوا. رویکرد دوم در حالی استفاده شد که روتور جدید از ماشین روتور گرد ساخته شده بود. این توازن با در نظر گرفتن راکتانس دو نیمه ماشین به دست آمد. راکتانس محور d ماشین قطب برجسته، X_d با T_{ph} پیچش به ازای قطب بر فاز و فاکتور سیم پیچ بنیادی k_w توسط معادله زیر به دست می آید:



$$X_d = \frac{24\mu_o(T_{ph}k_{w1})^2\omega RL}{\pi} \left(\frac{1}{g_2} + \left(\frac{1}{g_1} - \frac{1}{g_2} \right) \left(\beta + \frac{\sin \pi\beta}{\pi} \right) \right) \quad (32)$$

راکتانس همگام ماشین روتور گرد X_s میتواند به آسانی از فرمول ۳۲ استنتاج شود در حالیکه $g_1=g_2$ و نتیجه میدهد:

$$X_s = \frac{24\mu_o(T_{ph}k_{w1})^2\omega RL}{\pi g_o} \quad (33)$$

برابر قرار دادن معادلات ۳۲ و ۳۳ به بیانی منتج میشود که شکاف هوا g_o ماشین روتور گرد را تعیین میکند:

$$g_o = \frac{1}{(1/g_2) + ((1/g_1) - (1/g_2))(\beta + (\sin \pi\beta/\pi))} \quad (34)$$

این معادله مقدار شکاف هوا $g_o = 0.34 \text{ mm}$ را میدهد. راکتانس ماشین قطب برجستگی به طور جداگانه با استفاده از تست لغزش همانطور که در شکل ۴a نشان داده شده است اندازه گیری شد. راکتانس نشت $X_{ls} = 3.1 \Omega$ تخمین زده شد. دو ماشین سپس به طور مکانیکی با هم جفت شدند و سپس جفت شدند تا یک ژنراتور dc که بار مقاومتی متغیر را از طریق یک سنسور گشتاور پیچشی دیجیتال RWT۳۲۱ تغذیه میکند، را راه اندازی کنند. در اندازه گیری های انجام شده، دو برق سنج برای اندازه گیری توان ورودی استفاده شدند که از آنها فاکتور توان با استفاده از فرمول زیر محاسبه شد:

$$\cos \varphi = \cos \left(\tan^{-1} \left(\sqrt{3} \frac{W_1 - W_2}{W_1 + W_2} \right) \right) \quad (35)$$

شکل ۶ مجموعه تجربی و تصویری که برای اندازه گیری ها استفاده شد، نشان میدهد. برای اطمینان از نتایج به دست آمده تحت سرعت همگام، یک سرعت سنج دیجیتال برای اندازه گیری سرعت پس از هر تغییر بار استفاده شد. با توجه به رنج باریک راکتانس خازنی که نسبت برجستگی بالایی قابل دستیابی است (شکل ۴b را ببینید)، مقدار ظرفیت ۵۸,۱ میکروفاراد استفاده شد. این انتخاب منجر به نسبت برجستگی حدود ۲۰ میشود و با مقدار جریانی که هر سیم پیچ میتواند ساپورت کند، هدایت میشود (نه بیشتر از ۳,۷ آمپر). انتخاب اطراف پیکهای رزونانسی منجر به نسبت برجستگی بیشتر و کارایی بهتر میشود اما نمیتواند در عمل تشخیص داده شود زیرا سیم پیچها نمیتوانند جریانی را که در آنها و در اطراف جاری خواهد شد تا ماشین را به اشباع عمیق برساند؛ حمایت کنند. پیش از تفسیر تست، ترمینال $x - X' - Y' - Z'$ و $a - b - c$ در شکل ۶ باید دائماً مدار کوتاه شوند همانطور که برای سیم پیچهای روتور موتور القایی به کار میروند. در نتیجه، سه مجموعه اندازه گیری بر اساس اصلاحات مدار سیم پیچ کمکی انجام شد: مدار باز، مدار کوتاه و اتصال خازن ۵۸,۱ میکروفاراد. یک مدار باز زمانی تشخیص داده میشود که خازنها خارج شده باشند و ترمینال اتصال آنها باز رها شده باشد. فقط سیم پیچ اصلی در اینجا کار میکند. مورد مدار کوتاه با کوتاه کردن خازن انجام میشود. یک محک برای این نتایج، گشتاور پیچشی و فامتور توان نیمه قطب برجسته ماشین است که وقتی دو تا از چنین ماشینهایی با هم جفت میشوند، محاسبه میشود. نتایج به دست آمده از اندازه گیریها در به موازات نتایج محاسبه شده مربوطه در بخش بعدی نشان داده شده اند.

۵,۱. فاکتور توان

فاکتور توان ماشین هیبریدی به آسانی از تئوری مدار ac به دست می آید:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}}{\sqrt{\text{Re}^2 + X_e^2}} \quad (36)$$

برای مجموعه یکسانی از مقادیر X_C که قبلاً استفاده شد، نموداری از فاکتور توان برای گستره ای از δ که از ۰ تا ۴۵ درجه متغیر است در شکل ۷a نشان داده شده است. در اینجا آشکار است که فاکتور توان مناسب برای ماشین هیبرید به عنوان خازن وارد شده است. بهبود فاکتور توان در زوایای بار کمتر، بیشتر است.

۵،۲. گشتاور پیچشی

بیان گشتاور پیچشی این ماشین هیبریدی میتواند از چند راه انجام شود. ما تحلیل نتایج مشخصی از ماشین رلاکتانس همگام سنتی را اتخاذ کردیم و بیان گشتاور پیچشی را بدین شکل به دست آوردیم:

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{3}{2} \frac{p_r}{2} \left((\lambda_D I_Q - \lambda_Q I_D) + (\lambda_d I_q - \lambda_q I_d) \right) \\ &= \frac{V^2 (2X_{md} - X_C) (X_{md} - X_{mq}) \sin 2\delta}{4X_{md} (X_C (X_{md} + X_{mq}) - 4X_{md} X_{mq})} \end{aligned} \quad (37)$$

دو مورد حدی میتواند در نظر گرفته شود: در حدی که $X_C \rightarrow 0$ (این به معنی مدار کوتاه در سیم پیچ کمکی است)، بیان گشتاور پیچشی ساده میشود به:

$$T_e|_{X_C \rightarrow 0} = \frac{3}{2} \frac{p_r}{2} \frac{V^2 (X_{md} - X_{mq}) \sin 2\delta}{8X_{md} X_{mq}} \quad (38)$$

در حدی که $X_C \rightarrow \infty$ (بدین معنی که سیم پیچ کمکی مدار باز است)، بیان گشتاور پیچشی ساده میشود به:

$$T_e|_{X_C \rightarrow \infty} = \frac{3}{2} \frac{p_r}{2} \frac{V^2 (X_{md} - X_{mq}) \sin 2\delta}{4X_{md}(X_{md} + X_{mq})} \quad (39)$$

هر دو معادله ۳۸ و ۳۹، معادلات گشتاور پیچشی را میدهد که ارتباطی را نشان میدهد که به وضوح مشابه بیان گشتاور پیچشی ماشین رلاکتانس همگام سنتی است چراکه به طور مستقیم به اختلاف راکتانس، \sin ۲۸، و مربع ولتاژ ورودی مرتبط است. مشخصاً، معادله گشتاور ۳۸ بزرگتر از ۳۹ است و بینشی فراهم میکند که سیم پیچ کمکی در گشتاور ماشین هیبرید شرکت میکند. شکل ۷b در دو نمودار گشتاور-زاویه محاسبه شده و اندازه گیری شده را نشان میدهد. فاکتور توان و گشتاور تقویت شده متناوب مشخصی با تزریق ظرفیت به سیم پیچ کمکی ماشین هیبریدی وجود دارد، که در شکل ۷a و b نشان داده شده و با ماشین سنتی مقایسه شده است.

۵.۳. جریان سیم پیچ اصلی و کمکی

جریانهای جاری شده در سیم پیچهای اصلی و کمکی تحت شرایط بارگیری به ترتیب در شکل ۷c و d نشان داده شده اند. در حالیکه جریان سیم پیچ اصلی نسبت پربار به بی بار بالایی را نشان داده، سیم پیچ کمکی تحت ۳ شرایط اندازه گیری انجام شده، نزدیک صفر در بی بار است ($X_C = \infty$, $X_C = 0$ و $C = 58.1$ μF) همانطور که انتظار میرود، شرایط مدار باز ($\infty = X_C$) یک جریان سیم پیچ کمکی صفر را در کل بار نشان میدهد. افزایش شدید جریان سیم پیچ کمکی در عملکرد خازنی به وضوح نشان میدهد که عملکرد ماشین (و در نتیجه، مقدار ظرفیتی که میتواند در سیم پیچ کمکی استفاده شود) به جریانی که سیم پیچ کمکی میتواند ساپورت کند، محدود میشود. ولتاژ خازن به طور خطی به جریان سیم پیچ کمکی مرتبط است

$(V_c = I_a X_c)$. یک بررسی سریع میتواند نشان دهد که تا زمانی که سرعت جریان سیم پیچ کمکی تجاوز نمیکند، ولتاژ خازن در محدوده باقی می ماند.

۵,۴. توان خروجی و کارایی

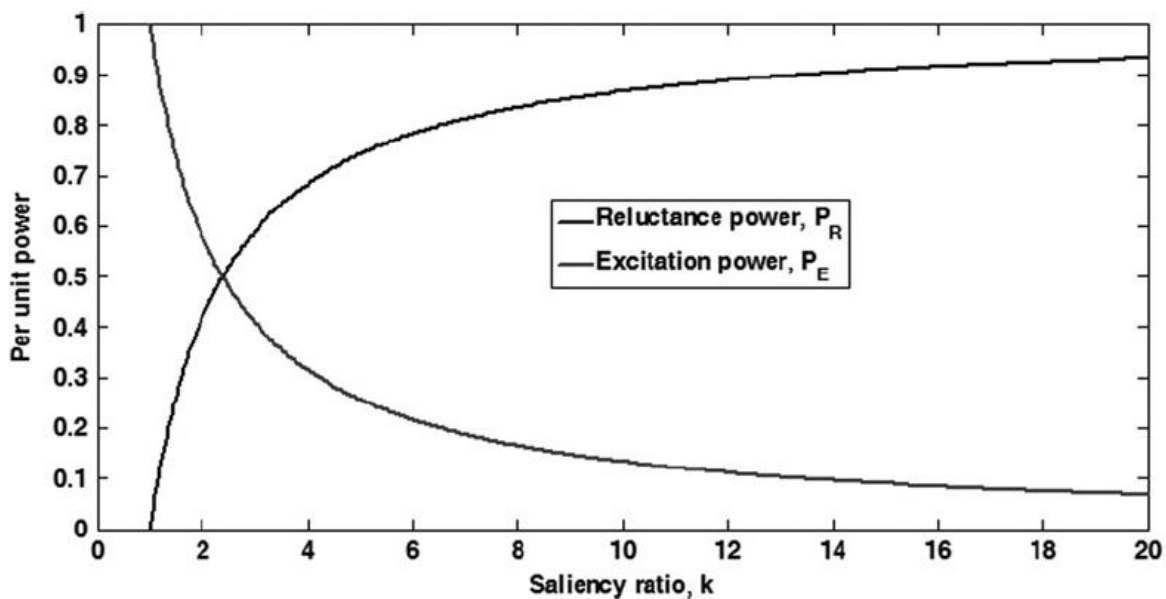
توان خروجی ماشین معیار و سنتی میتواند تفسیر شود تا گرایش پروفایلهای گشتاور محاسبه شده و اندازه گیری شده نشان داده شده در شکل ۷C را دنبال کند که شاهدهی است که ماشین هیبریدی کارایی بهبودیافته ای را نسبت به ماشین سنتی ارائه میدهد. کارایی ماشین برای کل گستره متغیرهای کاربردی اندازه گیری شده و محاسبه شده نشان داده شده در شکل ۷، میتواند محاسبه شود اگر فرض شود که فقدان آهن P_i در مقدار مدار باز بی بار محاسبه شده W ۱۰۶,۸۱ برای ماشین سنتی و W ۱۳۱,۹۵ برای ماشین هیبریدی ثابت است. با چشمپوشی از اصطحاک و از دست دادن بار سرگردان در هر دو مورد، کارایی η توسط معادله زیر به دست می آید:

$$\eta = \frac{T_m \times \omega_r}{T_m \times \omega_r + P_i + P_{cu}} \quad (40)$$

در معادله ۴۰، T_m گشتاور پیچشی (در $N \cdot m$)، ω_r سرعت همگام (رادیان بر ثانیه) و P_{cu} مجموع همه از دست دادن های مس است. برای ماشین سنتی، از دست دادن مس از جریان اندازه گیری شده در سیم پیچ استاتور به دست می آید درحالیکه برای ماشین هیبریدی، از جریان سیم پیچ اصلی و کمکی اندازه گیری شده به دست می آید. از آنجا که سیم پیچها مشخص هستند، P_{cu} (برای ماشین هیبریدی) با استفاده از معادله زیر به دست می آید:

$$P_{cu} = 2 \times 3 \times (I_A^2 + I_a^2) r_s \quad (41)$$

نمودارهای کارایی اندازه گیری شده و محاسبه شده ماشینهای سنتی و هیبریدی در شکل ۷e نشان داده شده است. مقادیر بسیار نزدیک کارایی مطابق با کل گستره فعالیت ثبت شده است. کارایی ماشین هیبریدی در زوایای بار پایین شگفت انگیز است در حالیکه در زوایای بار بالاتر از ۱۷ درجه، کارایی ماشین سنتی بهتر است. این تفاوت‌های حداقلی مطابق با شکل ۷e میتوانند به جریان سیم پیچ کمکی بالاتر در ماشینهای هیبریدی در زوایای بار بالاتر نسبت داده شوند. به ویژه در زاویه بار ۲۲,۵ درجه، کارایی ماشین سنتی ۹۰,۱ درصد است در حالیکه کارایی ماشین سنتی ۹۱,۲۱ درصد است (فک کنم اینجا نویسنده مقاله اشتباهی دوبار سنتی رو نوشته، میخواسته یکی رو هیبریدی بنویسه!!!). این اختلاف در حضور فاکتورهای توان و گشتاورهای اندکی بالاتر ارائه شده توسط ماشین هیبریدی همانطور که در شکل ۷a و b نشان داده شده است و توانایی آن برای فعالیت در فاکتورهای توان عقبتر و جلوتر همانطور که قبلا بحث شد، قابل ملاحظه نیست.



۶. کاربردهای ممکن ماشین هیبریدی برای تولید

در بیان ژنراتور توربینها، همیشه برجستگیهای ذاتی وجود دارد اگرچه نقش آن در توان خروجی کلی PT معمولاً به دلیل نسبت موثر کم X_d/X_q ، بسیار کوچک است. توان خروجی ژنراتور را که توسط معادله زیر داده میشود را در نظر بگیرید:

$$P_T = P_E + P_R = \frac{3EV \sin \delta}{X_d} + \frac{3V^2}{2X_d}(k-1) \sin 2\delta \quad (42)$$

که $k=X_d/X_q$ است. نسبت جزء توان رلاکتانس، P_R به توان کلی PT برای $E=1.2$ pu مقدار $\delta=30^\circ$ برابر است با:

$$\frac{P_R}{P_T} = \frac{(\sqrt{3}/4)(k-1)}{0.6 + (\sqrt{3}/4)(k-1)} \quad (43)$$

درصد حضور توان رلاکتانس P_R و توان تحریک P_E به توان خروجی کلی PT همانطور که در شکل ۸ برای مقادیر مختلف k نشان داده شده، است.

از شکل ۸ میتوان دید که برای $k=4$ ، توان حاضر با رلاکتانس، تقریباً ۲ برابر است، به دلیل تحریک dc. برای مقادیر بسیار زیاد k ، جزء توان به دلیل تحریک dc در مقایسه با آنچه منتج از رلاکتانس است، قابل چشم پوشی میشود. با این وجود، تحریک dc به این منظور که ماشین بتواند به عنوان ژنراتور مستقل عمل کند، مورد نیاز است.

فرض کنید که ژنراتور توربین سنتی با بخشی برجسته و بخشی گرد اصلاح شده است، بهبود نسبت Xq/Xd ماشین تا هر مقدار مورد نظر از طریق بار ظرفیت مجموعه سیم پیچهای کمکی باید ممکن باشد. خروجی مرکب به دلیل تحریک نرمال و این به دلیل رلاکتانس، تولید توان بیشتری میکند، که تنها با سرعت کنداکتور محدود میشود و به وضوح ماشینی پایدارتر و سختتر میدهد.

۷. نتیجه گیری

یک ماشین رلاکتانس همگام هیبریدی با یک نسبت XD/XQ بسیار بالا در فاکتور توان خوب ارائه شده است. انتظار میرود ماشین جدید ویژگی همگام بهتری نسبت به ماشین رلاکتانس همگام سنتی داشته باشد، زیرا اختلاف بین راکتانس محور d و محور q در ماشین رلاکتانس همگام سنتی تعریف نشده است. بنابراین گشتاور داخلی، به عنوان نسبت گشتاور کشیدن بزرگتر خواهد بود. پایداری ماشین دارای بار میتواند با تغییر ظرفیت بعد از اینکه ماشین همگام شد، افزایش یابد. نشان داده شده است که ماشین هیبریدی کارایی بهتری نسبت به ماشین سنتی دارد و منجر به فاکتور توان بهتر در زوایای پایین و بهبود گشتاور در زوایای بار بالا میشود. اینها تنها با مقدار جریانی که سیم پیچ کمکی میتواند تحمل کند محدود میشوند. یک طراحی بهینه ممکن است نیازمند کنداکتور سیم پیچ کمکی، بزرگتر از کنداکتور سیم پیچ اصلی است، بنابراین مقادیر ظرفیت بالاتر برای کارایی بهتر انتخاب شدند.

ماشین هیبریدی که از یک اتوبوس معمول فعالیت میکند و نیازمند تحریک dc نیست، انتظار میرود ماشینی قویتر و ارزانتر نسبت به ژنراتورهای همگام سنتی باشد چرا که حلقه های لغزش و ابزارهای تحریک و متعلقاتشان کاملاً زدوده شده اند. غیاب سیم پیچهای چرخان منجر به ابعاد روتور بزرگتر D میشود که توان خروجی ماشین را با فاکتور D^2 تقویت میکند. بنابراین، اجازه استفاده از سرعتهای روتور بالاتر را میدهد، از

آنجا که نیروهای سانتریفوژی در سیم پیچ کاملاً غایب هستند. اگر تعداد قطبهای ماشین داده شده از ۴ قطب به ۲ قطب نصف شود، سرعت روتور مانند توان خروجی برای ابعاد داده شده روتور، دوبرابر میشود و منجر به دانسیته توان بالاتر میشود. در نتیجه، برای یک جرم روتور، طول محوری ماشین میتواند کوتاه شود و این برخی مشکلات مکانیکی منجر شده از طول محوری بزرگ مانند تضعیف و چرخش را حل میکند. به علاوه، اینرسی ماشین افزایش می یابد و بنابراین پایداری بهبود می یابد. اثرات اضافه شده ابعاد روتور بزرگتر و سرعت بالاتر میتواند توان خروجی را برای یک اندازه ماشین چهار برابر کند. ماشین هیبریدی دارای کنترل فاکتور توان است، که میتواند تقدم یا تاخر را بسته به تغییر بار ظرفیت سیم پیچ کمکی ایجاد کند، یک ویژگی که در ماشینهای رلاکتانس همگام سنتی نمیتوان دید. کارایی شروع خط و استقلال از نزدیک برای موتوربندی، تولید و خازن همگام با یک میله دمپر در اختیار روتور و سیم پیچ میدانی بررسی شد.