

طراحی، مدل سازی و تحلیل ژنراتور سنکرون سه فاز توان پایین به روش اجزاء محدود

سید مرتضی موسوی بفرویی^۱، مصطفی شاه نظری^۲، اکبر رهیده^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه یزد، یزد، s.morteza.m1996@gmail.com

^۲ استادیار، دانشگاه یزد، یزد، shahnazari@yazd.ac.ir

^۳ دانشیار، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، rahideh@sutech.ac.ir

چکیده

ژنراتورهای سنکرون توان پایین عموماً در کاربردهای مستقل از شبکه برای تولید همزمان حرارت و الکتریسیته برای مصارف خانگی و صنعتی، به عنوان منبع ذخیره^۱ و یا منبع اضطراری توان و همچنین ژنراتور متصل به محور در کشتی رانی و کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می گیرند. در این مقاله، روابط طراحی ابعاد فیزیکی و محاسبات مربوط به سیم بندی ژنراتورهای توان پایین ارائه شده و سپس بر مبنای این روابط یک ژنراتور سنکرون سه فاز ۳ کیلو ولت آمپر، ۴۰۰ ولت و ۴ قطب از نوع قطب برجسته طراحی و به روش اجزاء محدود مدل سازی و عملکرد آن تحلیل شده است. برای این منظور کمیت های ولتاژ القایی، توزیع شار و چگالی شار در نقاط مختلف ژنراتور در حالت بی باری و بار داری بررسی شده است.

واژه های کلیدی

چگالی شار، روش اجزای محدود، ژنراتور سنکرون قطب برجسته، طراحی و مدل سازی

۱. مقدمه

امروزه اگر چه استفاده از انرژی های تجدید پذیر به جای تولید انرژی الکتریکی بر مبنای سوخت های فسیلی بسیار مورد توجه قرار گرفته است، اما همچنان ژنراتورهای سنکرون نقش حیاتی در تولید انرژی الکتریکی بر عهده دارند. در این میان ژنراتورهای سنکرون توان پایین عموماً در کاربردهای مستقل از شبکه برای تولید همزمان حرارت و الکتریسیته برای مصارف خانگی و صنعتی، به منظور منبع ذخیره، پیک سایی و حتی تامین پیوسته بار در پست ها و یا بعنوان منبع اضطراری توان و ژنراتور متصل به محور در کشتی رانی و کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می گیرند [۱-۳]. این ژنراتورها غالباً توسط یک موتور دیزلی یا بنزینی با سرعتی برابر یا کمتر از ۱۵۰۰ دور بر دقیقه گردانده شده و بصورت قطب برجسته و با سیم بندی میدان متمرکز طراحی می شوند [۴-۵].

ملزومات طراحی ماشین در توان های پایین کاملاً متفاوت از طراحی در توان بالا است و نمی توان روابط و فرضیاتی که در توان های بالا مورد استفاده قرار می گیرند را مستقیماً بکار برد، برای مثال محدودیت سرعت مماسی، مقادیر بار گذاری الکتریکی ویژه و چگالی

شار فاصله هوایی کاملاً متفاوت بوده و نیز در توان پایین نیازی به مجراهای خنک سازی طولی و عرضی نمی باشد که در این حالت برخی روابط را تحت تاثیر قرار می دهد [۶-۱۰].

در تحقیقاتی که تاکنون صورت گرفته است به موضوع مدل سازی و طراحی ژنراتور سنکرون توان پایین کمتر پرداخته شده و بیشتر مطالعات منتشر شده مربوط به ژنراتورهای توان بالا و روتور قطب صاف می باشد [۱۱-۱۴]. لذا در این مقاله، یک ژنراتور سنکرون سه فاز ۳ کیلو ولت آمپر، ۴۰۰ ولت، ۴ قطب از نوع قطب برجسته طراحی شده و سپس به روش اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار اجزای محدود^۲ مدل سازی و عملکرد آن تحلیل خواهد شد.

در بخش ۱،۲ معادلات طراحی ابعاد اصلی ژنراتور و مشخصات ژنراتور نمونه طراحی شده داده می شود، سپس در بخش ۲،۲ محاسبات مربوط به تعداد دور سیم پیچ ها و نحوه فاز بندی ارائه می شود، نتایج حاصل از طراحی و مدل سازی و مقایسه هر دو با یکدیگر در بخش ۳ تشریح می شود و در نهایت نتیجه گیری صورت گرفته در بخش ۴ ارائه می شود.

۲. طراحی و مدل سازی ژنراتور سنکرون قطب برجسته

از آنجا که ماشین های سنکرون قطب برجسته غالباً در سرعت های پایین مورد استفاده قرار می گیرند، در این حالت طول فاصله هوایی در سطح ماشین یکسان نبوده و از آنجا که ولتاژ القایی ناشی از فوران فاصله هوایی می باشد بنابراین سیم بندی بودن ولتاژ تولیدی در این حالت به طور مستقیم وابسته به طول فاصله هوایی در فاصله x از مرکز قطب نسبت به نوک قطب می باشد بنابراین در طراحی فاصله هوایی ژنراتور ملاحظات بیشتری را باید در نظر گرفت.

۱،۲. ابعاد استاتور و روتور

در یک طراحی باید پارامترهایی مانند توان خروجی ماشین، ولتاژ نامی ماشین، سرعت، فرکانس، نوع ماشین، نوع قطب، نوع سیم بندی، محدودیت های دمایی و جزئیات سیم پیچ های استاتور و روتور مدنظر قرار بگیرد [۶-۸]. به طور کلی قطر داخلی و طول ناخالص استاتور ابعاد اصلی را تشکیل می دهند. برای به دست آوردن ابعاد اصلی، لازم است که ارتباط بین خروجی و ابعاد اصلی ماشین به دست آید. این موضوع

² Ansoft Maxwell

¹ standby

از طریق رابطه (۱) که به رابطه خروجی معروف است تعیین می‌شود [۱۳].

$$Q = 11 \times B_{av} \times \beta \times K_w \times 10^{-3} \times D^2 L n_s \text{ [KVA]} \quad (1)$$

در این رابطه D قطر داخلی استاتور، L طول ناخالص استاتور، n_s سرعت سنکرون، B_{av} چگالی شار متوسط فاصله هوایی، β بارگذاری الکتریکی ویژه و K_w ضریب سیم‌پیچی استاتور می‌باشد. از رابطه خروجی ماشین می‌توان مشاهده نمود که حجم ماشین به‌طور مستقیم با خروجی ماشین ارتباط دارد و به‌طور معکوس متناسب با سرعت ماشین است. بدین ترتیب با افزایش سرعت حجم و در نتیجه هزینه کاهش خواهد یافت. همچنین از رابطه خروجی دیده می‌شود که انتخاب بارگذاری الکتریکی ویژه بالاتر و چگالی شار متوسط بزرگ‌تر در فاصله هوایی منجر به کاهش هزینه و اندازه ماشین می‌شود. مقدار مناسب بارگذاری الکتریکی ویژه با در نظر گرفتن تلفات مسی، ولتاژ، راکتانس سنکرون و تلفات سرگردان تعیین می‌شود. همچنین مقدار چگالی شار متوسط با توجه به تلفات آهنی، ولتاژ و جریان اتصال کوتاه گذرا مشخص می‌شود.

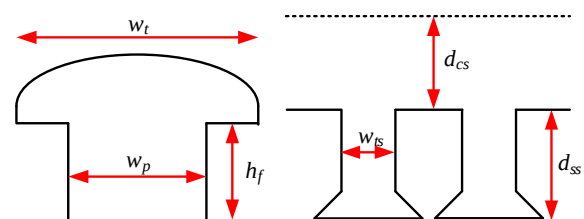
در مطالعات گذشته [۱۴-۱۰] مقادیر این دو پارامتر برای توان‌های بالا ارائه شده است، در ژنراتورهای سنکرون توان پایین مقدار مناسب این دو پارامتر را می‌توان با توجه به جداول (۱) و (۲) که با استفاده از روابط گرمایی و تحلیل حرارتی به‌دست آمده است، انتخاب نمود.

جدول ۱: بارگذاری الکتریکی ویژه

کیلو ولت آمپر	۵۰۰	۱۰۰-۵	۱۵-۱۰	۲۰-۱۵
قطب برجسته	۸۰۰۰	۹۰۰۰	۱۰۰۰۰	۱۳۰۰۰
قطب صاف	۸۵۰۰	۱۱۰۰۰	۱۳۰۰۰	۱۵۰۰۰

جدول ۲: چگالی شار متوسط فاصله هوایی

کیلوولت، آمپر	۵۰۰	۱۰۰-۵	۱۵-۱۰	۲۰-۱۵
قطب برجسته	۰/۵	۰/۵۲	۰/۵۴	۰/۵۶
قطب صاف	۰/۵۱	۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۵۷



شکل ۱: ابعاد قسمت‌های مختلف ژنراتور سنکرون قطب برجسته: (الف) استاتور (ب) روتور

قطر داخلی و طول ناخالص استاتور از روی رابطه خروجی محاسبه می‌گردد. جداسازی مناسب این دو پارامتر با توجه به نوع ژنراتور انجام می‌شود. بهتر است در ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته

قطر ماشین بزرگ‌تر از طول محوری در نظر گرفته شود [۷-۸]. در ژنراتورهای سنکرون قطب برجسته نسبت قوس قطب به گام قطب ۰/۶ تا ۰/۷ در نظر گرفته می‌شود [۵-۶]. انتخاب نسبت بزرگ‌تر باعث بالا رفتن شار نشتی بین دو قطب و همچنین بالا رفتن چگالی شار در بدنه قطب می‌شود که باعث به هم خوردن توزیع شار در استاتور خواهد شد. کوچک‌تر بودن آن نیز معایبی در پی خواهد داشت که از جمله می‌توان به کاهش فضای مورد نیاز برای هادی‌های تحریک اشاره نمود. بنابراین نسبت مناسب قوس قطبی به گام قطبی برای یک ژنراتور سنکرون قطب صاف بین ۰/۸ تا ۳ در نظر گرفته می‌شود [۷]. با این حال هنگامی که این مقادیر تعیین می‌شود قطر ماشین باید محدودیت سرعت مماسی را برآورده کند تا روتور بتواند نیروهای گریز از مرکز تولیدی را تحمل کند. براساس تحلیل دینامیک تنش‌های مکانیکی انجام‌شده در یک ژنراتور قطب برجسته توان پایین سرعت مماسی باید بین ۸ تا ۲۵ متر بر ثانیه باشد، این مقدار برای توان‌های بالا در [۸] ۷۵ متر بر ثانیه ارائه شده است.

پس از مشخص شدن ابعاد اصلی باید پهنای یوغ استاتور و دندان‌های شیار به‌گونه‌ای طراحی شود که هیچ نقطه‌ای به اشباع نرفته و همچنین مساحت شیارها نیز باید برای جا دادن هادی‌های موردنظر مناسب باشد. در شکل (۱) ابعاد قسمت‌های مختلف استاتور و روتور ژنراتور سنکرون نشان داده شده است.

در شکل (۱) d_{cs} ضخامت شعاعی یوغ استاتور، w_{ts} پهنای دندان‌های استاتور، d_{ss} عمق شیار استاتور، w_t پهنای کفشک قطب، w_p پهنای قطب و h_f ارتفاع قطب می‌باشد.

برای تعیین حداقل ضخامت شعاعی یوغ استاتور و حداقل پهنای دندان‌های استاتور در مدل یاد شده از روابط (۲) و (۳) استفاده شده است [۸].

$$d_{cs} = \frac{\varphi}{2 \times B_{cs_{max}} \times L_i} \quad (2)$$

$$w_{ts} = \frac{p\varphi}{S \times B_{ts_{max}} \times L_i} \quad (3)$$

که φ شار مربوط به هر قطب بوده و $B_{cs_{max}}$ و $B_{ts_{max}}$ به ترتیب برابر با ۱/۵ تسلا و ۱/۸ تسلا در نظر گرفته می‌شود. همچنین L_i طول مؤثر ماشین بوده که از طول ناخالص به دست می‌آید. پس از انتخاب یوغ مناسب با استفاده از رابطه (۴) شعاع داخلی (فاصله از مرکز موتور تا انتهای شیار استاتور) R_{sb} با در نظر گرفتن ضخامت شعاعی یوغ استاتور به دست می‌آید.

$$R_{sb} = \frac{[D_{os} - [2 \times d_{cs}]]}{2} \quad (4)$$

که در این رابطه D_{os} قطر خارجی استاتور می‌باشد.

$$A_s = d_{ss} \left[\frac{2\pi}{S_s} \left[R_{sb} - \frac{d_{ss}}{2} \right] - w_{ts} \right] \quad (5)$$

که S_s تعداد شیار استاتور تعریف می‌شود.

انتخاب فاصله هوایی در طراحی ماشین اهمیت بالایی دارد، زیرا شکل موج ولتاژ القایی تولیدشده توسط ژنراتور برای اطمینان از عملکرد مناسب بار متصل شده باید بسیار نزدیک به یک شکل موج سینوسی باشد. تمام تجهیزات الکتریکی براساس این فرض طراحی می‌شوند که شکل موج عرضه به آن‌ها سینوسی می‌باشد. برای دست یافتن به شکل موج رضایت‌بخش در ژنراتور سنکرون قطب برجسته طول فاصله هوایی به تدریج از مرکز قطب به سمت نوک قطب باید افزایش یابد. طول فاصله هوایی در نوک قطب باید ۱/۵ تا ۲/۵ برابر از مرکز قطب باشد برای به دست آوردن طول فاصله هوایی در مرکز قطب ابتدا آمپر دور هر قطب براساس رابطه (۶) مشخص می‌شود، سپس با استفاده از رابطه (۷) آمپر دور بی‌باری هر قطب تعیین می‌شود [۹].

$$AT_a = \frac{1.35 \times I_{ph} \times T_{ph} \times K_w}{P} \quad (6)$$

$$AT_g = 0.75 AT_{f0} \quad (7)$$

که AT_a آمپر دور هر قطب آرمیچر، AT_g آمپر دور فاصله هوایی، AT_{f0} آمپر دور بی‌باری، I_{ph} جریان فاز، T_{ph} تعداد دور هر فاز، k_w ضریب سیم‌پیچی و P تعداد قطب می‌باشد.

به‌منظور محاسبه آمپر دور بی‌باری از رابطه (۸) استفاده می‌شود که در آن نسبت اتصال کوتاه (SCR^2) در توان‌های پایین براساس تحلیل‌های صورت گرفته بهتر است بین ۲/۵ تا ۶ انتخاب شود.

$$AT_{f0} = SCR \times AT_a \quad (8)$$

حال براساس رابطه (۹) مقدار فاصله هوایی به دست می‌آید [۷].

$$AT_g = 0.796 \times B_g \times K_g \times L_g \times 10^6 \quad (9)$$

که B_g چگالی شار فاصله هوایی، K_g ضریب فاصله هوایی که بین ۱/۱۲ تا ۱/۱۸ انتخاب می‌شود و L_g طول فاصله هوایی می‌باشد.

همان‌گونه که گفته شد برای تولید یک میدان نسبتاً سینوسی طول فاصله هوایی در فاصله x از مرکز قطب خیلی مهم می‌باشد، می‌توان از رابطه (۱۰) که در مدل‌سازی به‌دست‌آمده برای بدست آوردن این فاصله استفاده کرد.

$$L_{g_x} = \frac{L_g}{\cos\left(\frac{\pi x}{\tau_p}\right)} \quad (10)$$

که τ_p گام قطب می‌باشد.

به‌منظور به دست آوردن ابعاد روتور در بیشتر مطالعات، طول محوری روتور برابر با طول هسته استاتور در نظر گرفته می‌شود اما در برخی از مراجع کمی کوچکتر از طول هسته استاتور در نظر گرفته شده تا روتور بتواند آزادانه گردش کند. پهنای قطب‌های روتور را می‌توان از روابط (۱۱) و (۱۲) به دست آورد [۸].

$$A_p = \frac{\varphi_p}{B_p} \quad (11)$$

$$W_p = \frac{A_p}{L_{ip}} \quad (12)$$

که A_p سطح مقطع قطب، φ_p شار در بدنه قطب و B_p چگالی شار در بدنه قطب و W_p پهنای بدنه قطب می‌باشد.

ضریب نشستی برای قطب ممکن است ۱/۱ تا ۱/۵ در نظر گرفته شود. همچنین چگالی شار در بدنه قطب نیز ۱/۴ تا ۱/۶ تسلا فرض می‌شود. ارتفاع قطب تحریک باید به‌گونه‌ای باشد که بتواند به‌راحتی آمپر دور تحریک بار کامل را در خود جای دهد؛ بنابراین با محاسبه ارتفاع هادی تحریک می‌توان ارتفاع قطب را مشخص نمود. آمپر دور تحریک بار کامل هر قطب ۱/۷ تا ۲ برابر آمپر دور هر قطب آرمیچر در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین ارتفاع هادی‌های تحریک را می‌توان توسط (۱۳) تعیین کرد [۸].

$$h_f = \frac{I_f \times T_f}{10^4 \sqrt{(d_f \times s_f \times p_f)}} \quad (13)$$

که I_f جریان در سیم‌پیچ تحریک، T_f تعداد دور هادی تحریک، d_f عمق هادی‌های تحریک، s_f ضریب فضای مس، p_f تلفات مجاز در هر مترمربع می‌باشد.

پهنای کفشک قطب را براساس رابطه تحلیلی به‌دست‌آمده در (۱۴) می‌توان محاسبه نمود.

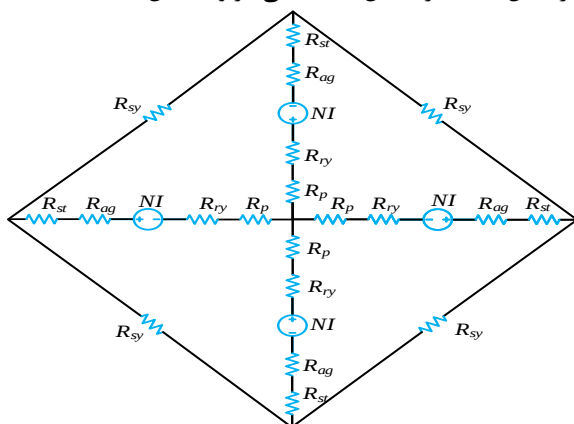
$$W_t = (D - 2L_{g_{max}}) \sin\left(\frac{\lambda \times \pi}{P}\right) \quad (14)$$

در رابطه (۱۴) متغیر λ نسبت قوس قطب به گام قطب می‌باشد که به‌صورت زیر تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{\alpha}{\tau_p} \quad (15)$$

این نسبت باید در محدوده‌ای که در بخش ۱،۲ گفته شده انتخاب گردد.

مدار معادل مغناطیسی ژنراتور سنکرون پیشنهادی از: هسته روتور، قطب، فاصله هوایی، دندانه استاتور و هسته استاتور تشکیل شده است. در شکل (۲) مدار معادل مغناطیسی مربوط نشان داده شده است.



شکل ۲: مدار معادل مغناطیسی ژنراتور سنکرون قطب برجسته

در شکل (۲) R_{sy} رلوکتانس بخشی از یوغ استاتور، R_{st} رلوکتانس دندانه‌های استاتور زیر یک قطب، R_g رلوکتانس فاصله هوایی، NI

³Short Circuit Ratio

آمپر دور تولیدی سیم پیچ تحریک در هر قطب، R_p رلوکتانس هر قطب تحریک و R_{ry} رلوکتانس بخشی از هسته روتور می باشد. برای محاسبه آمپر دور هر بخش می توان از مرجع [۸] استفاده نمود. مشخصات و ابعاد اصلی ژنراتور سنکرون نمونه که براساس روابط فوق محاسبه شده است مطابق جدول (۳) می باشد.

جدول ۳: مشخصات و ابعاد اصلی ژنراتور سنکرون سه فاز قطب برجسته

پارامتر	مقدار
توان ظاهری [KVA]	۳
ولتاژ خط به خط [V]	۴۰۰
فرکانس [Hz]	۵۰
تعداد قطب	۴
سرعت [RPM]	۱۵۰۰
تعداد شیار استاتور	۳۶
قطر خارجی استاتور [mm]	۱۹۵
قطر داخلی استاتور [mm]	۱۳۳
طول ناخالص استاتور [mm]	۱۵۵
فاصله هوایی در مرکز قطب [mm]	۱/۳۵
فاصله هوایی در نوک قطب [mm]	۲/۴۳
پهنای کف شک قطب [mm]	۶۶/۹۵
قطر خارجی رتور [mm]	۱۳۰/۳
قطر محور [mm]	۲۵

۲.۲. سیم بندی استاتور و روتور

سیم پیچ استاتور شامل هادی های تک دوری یا چند دوری می باشد. تعداد دور سیم پیچ هر فاز را می توان براساس رابطه (۱۶) مشخص کرد [۱۳].

$$E_{ph} = 4.44 \times F \times T_{ph} \times \varphi \times K_w \quad (16)$$

که E_{ph} ولتاژ القایی هر فاز و f فرکانس می باشد.

سیم پیچ هر فاز باید به درستی در داخل شیارهای مربوط به همان فاز جازده شود به طوری که ولتاژ القایی در تمامی فازها اندازه و فرکانس برابر، با اختلاف ۱۲۰ درجه الکتریکی نسبت به یکدیگر داشته باشند. با توجه به رابطه (۱۷) زاویه الکتریکی هر شیار مشخص می شود.

$$\alpha_{ez} = \frac{180 \times P}{S_s} \quad (17)$$

تعداد شیار هر فاز زیر هر قطب را می توان براساس رابطه (۱۸) مشخص کرد.

$$S_t = \frac{Z_s}{P \times m} \quad (18)$$

که S_t تعداد شیار هر فاز زیر هر قطب و m تعداد فاز می باشد.

همانگونه که اشاره شد در حالت ژنراتوری داشتن ولتاژ تولیدی سینوسی حائز اهمیت می باشد. لذا در این مقاله، از سیم پیچ دو لایه استفاده شده است که به منظور کاهش هارمونیک های پنجم و هفتم در آن $\epsilon = 5/6$ در نظر گرفته شده است که ϵ ضریب کوتاهی گام می -

باشد. از دیگر مزایای سیم پیچ دو لایه می توان به صرفه جویی در مس مصرف شده در سیم پیچ استاتور و امکان استفاده در ساختار شیار کسری اشاره کرد.

طراحی سیم پیچ میدان باید به گونه ای باشد که بتواند آمپر دور لازم به منظور ایجاد شار مورد نیاز مدار مغناطیسی و جبران عکس العمل آرمیچر در حالت بارداری را تأمین کند. برای محاسبه تعداد دور تحریک ابتدا با در نظر گرفتن ولتاژ تحریک، ولتاژ تحریک هر قطب را با استفاده از رابطه (۱۹) به دست آورده و سپس با توجه به ابعاد مشخص شده طول متوسط هر هادی تحریک را براساس رابطه (۲۰) به دست می آوریم [۸].

$$V_c = \frac{V_F}{P} \quad (19)$$

$$L_{mf} = 2(L_p + w_p) + \pi(d_f + 2t_i) \quad (20)$$

که V_F ولتاژ تحریک، L_p طول قطب و t_i ضخامت عایق قطب می - باشد.

مقاومت هادی های تحریک را می توان با استفاده از رابطه (۲۱) به دست آورد.

$$R_f = \frac{\rho \times L_{mf} \times T_f}{a_f} \quad (21)$$

از طرفی با استفاده از قانون اهم نیز مقاومت تحریک به صورت رابطه (۲۲) تعریف می شود.

$$R_F = \frac{V_F}{I_F} \quad (22)$$

حال چنانچه رابطه (۲۱) و (۲۲) را مساوی هم قرار دهیم می توان سطح مقطع هادی های تحریک را به دست آورد. سپس با در نظر گرفتن چگالی جریان مناسب، جریان تحریک را محاسبه کرده و در نهایت تعداد دور تحریک با استفاده از رابطه (۲۳) به دست می آید.

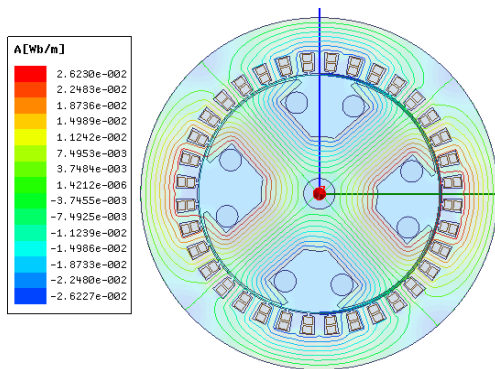
$$T_f = \frac{AT_{\theta}}{I_f} \quad (23)$$

به طوری که AT_{θ} آمپر دور بارداری می باشد.

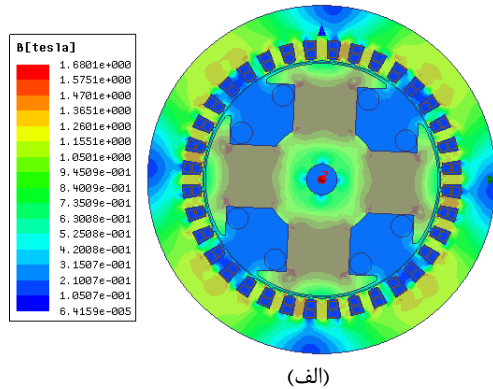
لازم به ذکر است که برای محاسبه تلفات آهنی نیز از روش مرسوم می که در ماشین های الکتریکی استفاده می شود می توان استفاده کرد بدین صورت که برای مثال در دندانه های استاتور از روی مساحت آن حجم مربوطه را محاسبه می کنیم و سپس وزن مربوط به دندانه را به دست آورده و با استفاده از چگالی شار مربوط به آن تلفات را مشخص می کنیم. جدول (۴) مشخصات سیم پیچ آرمیچر و تحریک ژنراتور نمونه را نشان می دهد.

جدول ۴: مشخصات سیم پیچ آرمیچر و تحریک

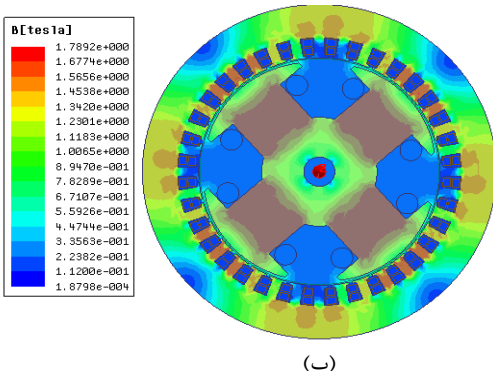
پارامتر	مقدار
تعداد دور هادی در هر شیار استاتور	۲۲
تعداد دور هادی هر قطب تحریک	۸۳
جریان تحریک بر حسب آمپر [A]	۱۶/۵
ولتاژ تحریک [V]	۱۲
چگالی جریان تحریک [A/mm ²]	۴



شکل ۴: خطوط شار ژنراتور سنکرون در حالت بی‌باری



(الف)



(ب)

شکل ۵: چگالی شار ژنراتور سنکرون در حالت:
(الف) بی‌باری، (ب) باردار

مقدار متوسط چگالی شار بررسی شده برای نقاط مختلف دندانه-های استاتور، هسته استاتور، هسته روتور و فاصله هوایی ژنراتور سنکرون در جدول (۵) نشان داده شده که کاملاً مشخص است نتایج شبیه‌سازی نزدیک به مقادیر به‌دست‌آمده در طراحی می‌باشد.

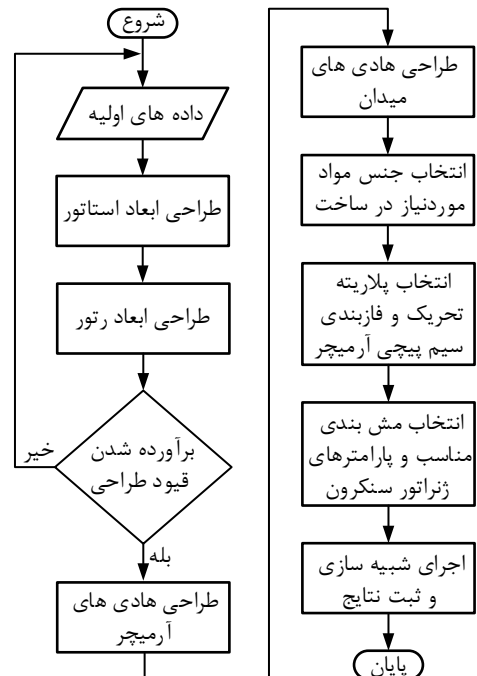
جدول ۵: مقایسه چگالی شار مغناطیسی در نواحی مختلف ماشین

متوسط چگالی شار مغناطیسی	طراحی	بی‌باری	بارداری
دندانه استاتور	۱/۸	۱/۶۸	۱/۷۸
هسته استاتور	۱/۵	۱/۲	۱/۳۴
هسته روتور	۱/۵	۱/۳۶	۱/۴۵
فاصله هوایی	۰/۵	۰/۴۵	۰/۴۸

۳. نتایج طراحی و مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

ژنراتور سنکرون سه فاز قطب برجسته روتور سیم بندی شده که در بخش دوم طراحی آن ارائه شده، با استفاده از روش اجزای محدود دو بعدی تحلیل و بررسی شد. شکل (۳) فلوچارت مدل‌سازی و طراحی را نشان می‌دهد.

شبیه‌سازی در حالت گذرا و ماندگار برای ژنراتور صورت گرفته است. مش‌بندی انجام شده در این مدل به منظور افزایش دقت محاسبه، چگالی گره‌ها در شیارها و لبه دندانه‌ها بسیار بالاتر از بخش‌های دیگر در نظر گرفته شده است. این امر بدین دلیل است که به طور معمول چگالی شار در دندانه‌ها و لبه‌ها نسبت به سایر بخش‌های ماشین بیشتر است و امکان به اشباع رفتن این قسمت‌ها زیاد است. ارزیابی چگالی شار در بخش‌های مختلف ماشین از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا اگر چگالی شار هسته یا دندانه به اشباع برود، حرارت ایجاد شده در این نقاط باعث افزایش تلفات شده که در نتیجه راندمان ژنراتور کاهش یافته و عملکرد آن مطلوب نخواهد بود. توزیع خطوط شار و چگالی شار مغناطیسی در ماشین برای شرایط بی‌باری و بارداری در شکل (۴) و (۵) نشان داده شده است. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که بخش‌های آهن ماشین اشباع نشده‌اند. حداکثر چگالی شار به‌دست‌آمده برای بار کامل تقریباً ۱/۷۸۹۲ تسلا می‌باشد درحالی‌که مقدار اشباع استیل ۱۰۱۰ در ۱/۸ تسلا قرار دارد.



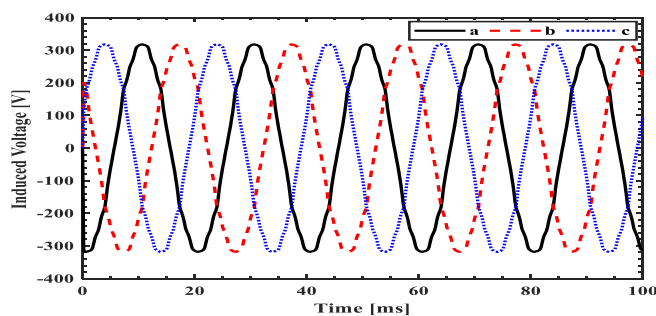
شکل ۳: فلوچارت طراحی و مدل‌سازی ژنراتور سنکرون قطب برجسته

سپس به منظور تحلیل عملکرد این ژنراتور و اعتبارسنجی طراحی کمیت‌های ولتاژ القایی، توزیع شار و چگالی شار در نقاط مختلف ژنراتور در حالت بی باری و باردار بررسی گردید. نتایج حاصل صحت طراحی انجام گرفته را نشان می‌دهد.

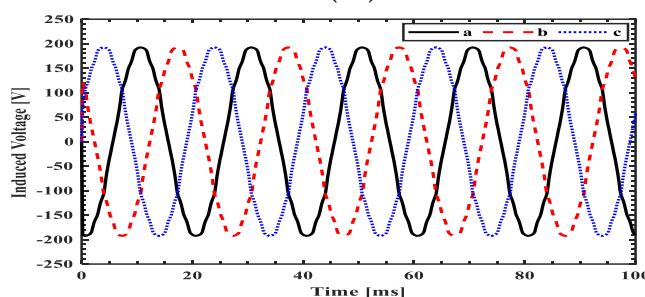
مراجع و منابع

- [1] A.D. Gioia, I.P. Brown, Y. Nie, R. Knippel, D.C. Ludois, J. Dai, S. Hagen, and C. Altheld, "Design of a wound field synchronous machine for electric vehicle traction with brushless capacitive field excitation", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-8, 2016.
- [2] M. Chapariha, F. Therrien, J. Jatskevich, and H.W. Dommel, "Explicit formulations for constant-parameter voltage-behind-reactance interfacing of synchronous machine models", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 28, No. 4, pp.1053-1063, 2013.
- [3] S.D. Pekarek and E.A. Walters, "An accurate method of neglecting dynamic saliency of synchronous machines in power electronic based systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 4, pp.1177-1183, 1999.
- [4] M. Wallin, M. Ranl f, and U. Lundin, "Design and construction of a synchronous generator test setup", The XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM), IEEE, pp. 1-5, 2010.
- [5] A.M. Cramer, B.P. Loop, and D.C. Aliprantis, "Synchronous machine model with voltage-behind-reactance formulation of stator and field windings", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 27, No. 2, pp.391-402, 2012.
- [6] M. Cosovic, S. Smaka, S. Masic, I. Salihbegovic, H. Steinhart, "Design of wound rotor low-voltage synchronous generator", Information Communication and Automation Technologies (ICAT) 2011 XXIII International Symposium on, pp. 1-5, 27-29 Oct. 2011.
- [7] P. Rasilo, A. Arkkio, J. Kivioja, Low-voltage Synchronous Generator Excitation Optimization and Design, Jul. 2007.
- [8] I. Boldea, Synchronous Generators (The Electric Generators Handbook), USA, FL, Boca Raton: CRC, 2015.
- [9] A. Hussain, S. Atiq, B. I. Kwon, "Optimal design and experimental verification of wound rotor synchronous machine using subharmonic excitation for brushless operation", Energies, vol. 11, no. 3, pp. 554, Mar. 2018.
- [10] S. Talpur, "Testing and model validation of round rotor synchronous generator (GENROU)", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 80, pp.880-887, 2017.
- [11] M. Jenal, E. Sulaiman, M.Z. Ahmad, S.N.U. Zakaria, W.M. Utomo, S.A. Zulkifli, and A.A. Bakar, "Design study of single and three-phase synchronous generator using J-MAG designer", IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CEAT), IEEE, Malaysia, pp. 226-231, 2013.
- [12] P. C. Krause, O. Wasynczuk, S. D. Sudhoff, Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, Piscataway, NJ/New York: IEEE Press/Wiley Interscience, 2002.
- [13] J. Pyrh nen, T. Jokinen, V. Hrabovcov, Design of Rotating Machines, U.K., Chichester: Wiley, 2009.
- [14] M. Chapariha, T. Francis, J. Jatskevich, and H.W. Dommel, "Implementation of constant-parameter directly-interfaced VBR synchronous machine models in SimPowerSystems, ASMG, and PLECS toolboxes", IEEE Power & Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-5, 2013.

در ساختار مورد مطالعه با توجه به بهره‌گیری از سیم‌پیچ میدان، به راحتی می‌توان با افزایش و کاهش جریان تحریک dc بدون نیاز به مبدل‌های الکترونیک قدرت پیچیده و گران قیمت، شار تولیدی توسط سیم‌پیچ را کنترل کرد که در نتیجه ولتاژ تولیدی برای محدوده وسیعی قابل کنترل می‌باشد. در شکل (۶) ولتاژ القایی بی‌باری تحت جریان تحریک ۱۶/۵ آمپر و ۸ آمپر نشان داده شده است.



(الف)

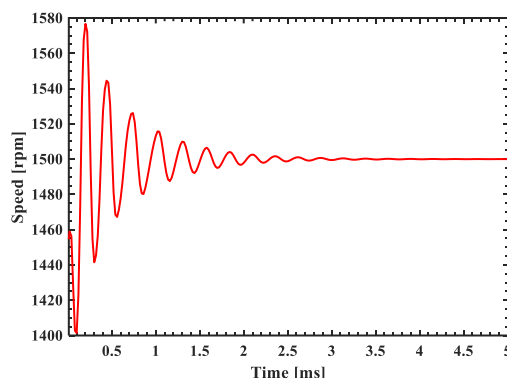


(ب)

شکل ۶: ولتاژ القایی بی‌باری به ازای جریان تحریک:

(الف) ۱۶/۵ آمپر (ب) ۸ آمپر

حفظ سنکرونیزم ژنراتورهای سنکرون یکی از الزامات شبکه‌های قدرت می‌باشد نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۷) تأیید می‌کند که ژنراتور سنکرون طراحی شده چنانچه از شرایط سنکرونیزم خارج شود قابلیت برگشت به‌سرعت سنکرون را دارد.



شکل ۷: تغییرات سرعت ژنراتور به هنگام خروج از سنکرونیزم

۴. نتیجه‌گیری

یک ژنراتور سنکرون سه فاز ۳ کیلو ولت آمپر، ۴۰۰ ولت و ۴ قطب از نوع قطب برجسته طراحی و به روش اجزاء محدود مدل‌سازی شد.