

طراحی ژنراتور الکتریکی سوئیچ رلوکتانس برای تبدیل انرژی بادی

جواد فیض و رضا فضائی

قطب علمی سیستم های الکترومغناطیسی کاربردی

گروه مهندسی برق و کامپیوتر - دانشکده فنی - دانشگاه تهران

ایران

واژه های کلیدی: ژنراتور سوئیچ رلوکتانس، مبدل انرژی بادی

فهرست علائم اختصاری

قطر استاتور، روتور، محور	D_{sh}, D_r, D_s
طول محور (Stack)	L_{stk}
طول شکاف هوایی	g
تعداد قطب های استاتور، روتور	N_r, N_s
تعداد فاز	m
کمان قطب استاتور، روتور	β_r, β_s
عرض قطب استاتور، روتور	t_r, t_s
عمق شیار استاتور، روتور	d_r, d_s
ضخامت طوقه استاتور، روتور	y_r, y_s
سطح شیار	A_{slot}
ضریب پر شدگی شیار استاتور	k_s
تعداد دور بر قطب	N_p
توان متوسط، حداکثر	P_{peak}, P
سرعت نامی بر حسب دور بر دقیقه	rpm
ضریب خروجی	K
چگالی شار اشباع	B_s

چکیده

در این مقاله یک ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۲۰ kW با سرعت نامی ۱۰۰ rpm برای استفاده در مبدل های انرژی بادی تحریک مستقیم طراحی شده است. در طراحی این ژنراتور مسائل مربوط به نویز آکوستیک و لرزش اجزای مکانیکی در جهت بهبود سازگاری ژنراتور در تبدیل انرژی بادی مورد توجه قرار گرفته اند.

پس از طراحی اولیه ابعاد ژنراتور، با استفاده از یک مدل تحلیلی مشخصه های شار پیوندی در ژنراتور محاسبه شده و منحنی های مربوط به کارکرد الکتریکی ژنراتور ارائه می شوند. با تعیین مدل شار در قسمت های مختلف ژنراتور تلفات آهنی، تلفات مسی و تلفات هدایتی مدار الکترونیک قدرت در آن محاسبه می شود. سپس بازده ژنراتور محاسبه، و بهینه سازی طرح با استفاده از روش سعی و خطا انجام می شود.

۱- مقدمه

ژنراتور سوئیچ رلوکتانس در کاربردهای با سرعت متغیر که مشخصه‌های ذاتی آن از لحاظ اقتصادی مهم است، در حال توسعه است. امروزه این کاربردها شامل سیستم‌های توان الکتریکی هوا فضا [۱]، استارت‌ر/آلترناتور خودروهای هایبری [۲] و مبدل‌های انرژی باد [۳] هستند. این ژنراتور می‌تواند بعنوان منبع اولیه توان الکتریکی، جایگزینی برای سایر ماشین‌های الکتریکی معمول در این موارد باشد. این جایگزینی عمدتاً بدلیل مشخصه‌های بی‌نظیر آن از لحاظ سادگی و استحکام مکانیکی است. علاوه بر این، ماشین دارای بازده زیاد، عملکرد با قابلیت اطمینان زیاد، سازگاری ذاتی با خطا، سادگی کنترل و توانایی کار بر روی محدوده وسیع سرعت می‌باشد.

ساختار روتور در این ماشین بسیار ساده و محکم است، زیرا تنها از ورقه‌های فولادی تشکیل شده است. استاتور دارای سیم پیچ‌های متمرکز بر روی قطب‌ها است، که هزینه ساخت را کاهش میدهد. سیم پیچ معمول ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس که دارای گام کوتاه است، باعث می‌شود هر سیم پیچی از لحاظ الکتریکی و مغناطیسی مستقل بوده و دارای قابلیت اطمینان بیشتری باشد.

ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس معایبی نیز دارند، که از کاربرد وسیع صنعتی آنها جلوگیری می‌کند. نویز آکوستیک زیاد یکی از مهمترین مشکلات این ماشین است. متأسفانه، روش‌های طراحی و کنترلی که چگالی توان و بازده ماشین را بهبود می‌دهند، نویز آن را زیادتر می‌کنند، بنابراین در طراحی این ماشین باید مصالحه‌ای بین این موارد صورت پذیرد.

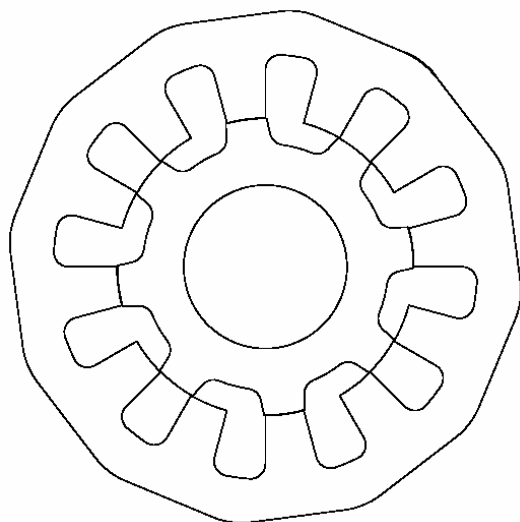
کاربرد در هوا فضا و خودرو هایبرید عموماً با سرعت زیاد و کاربرد در انرژی بادی، با سرعت کم و گشتاور زیاد مشخص می‌شود. سیستم‌های انرژی بادی معمول از جعبه دنده به عنوان واسطه محور سرعت کم و محور ژنراتور استفاده می‌کنند. جعبه دنده یک جزء پر هزینه از کل سیستم است و برداشتن آن اجزاء متحرک واسطه را حذف می‌کند، که باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌شود. در ضمن بازده سیستم بهبود می‌یابد.

در مواردی که از انرژی بادی استفاده می‌شود، توان محور با مکعب سرعت متناسب است و با صعود سرعت، گشتاور و توان تا حد زیادی افزایش می‌یابند، از اینرو عملکرد ژنراتور با سرعت متغیر می‌تواند برای دستیابی به انرژی بیشتر از جریان باد و کاهش فشار مکانیکی بر سیستم مورد استفاده قرار گیرد.

خاصیت سوئیچ شونددگی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس آنرا برای عملکرد سرعت متغیر در کاربرد انرژی بادی مناسب می‌سازد.

روش‌های مختلفی برای تعیین منحنی‌های عملکرد ماشین سوئیچ رلوکتانس ارائه شده‌اند، که تحلیل اجزاء محدود تا مدل‌های مدار مغناطیسی غیر خطی را شامل می‌شود. مدل‌های ارائه شده برای این ماشین عمدتاً عددی هستند و از اینرو استفاده از آنها برای ایجاد آگاهی در طراحی و تعیین ابعاد این ماشین مشکل است. علاوه بر این، به دلیل تعداد تکرار زیاد مراحل طراحی باید از مدلی استفاده می‌شد که بتواند شار پیوندی ماشین را با تغییر ابعاد آن سریعاً محاسبه کند، که مدل‌های مذکور این امکان را فراهم نمی‌سازند.

مدل تحلیلی که در کار حاضر بکار رفته، ضمن ملحوظ کردن اشباع آهن، تنها به ابعاد ماشین و مشخصات مواد به عنوان ورودی نیاز دارد. نتایج بدست آمده از مدل، این امکان را فراهم می‌کند که تأثیر ابعاد ماشین، چگالی جریان سیم پیچ و مشخصه‌های آهن بر عملکرد ماشین را مشاهده کرد.



شکل ۱. مقطع ژنراتور ۱۲/۸ مورد نظر

۲- عملکرد ژنراتوری ماشین سوئیچ رلوکتانس

عمل ژنراتوری با تغییر موقعیت زاویه‌ای ولتاژ اعمالی به سیم پیچ فاز حاصل می‌شود. اگر هنگامی که قطب‌های روتور از موقعیت هم‌خطی خارج می‌شوند، یعنی هنگامی که اندوکتانس کاهش می‌یابد، در سیم پیچ جریان برقرار شود، گشتاور الکتریکی عکس جهت چرخش تولید می‌شود. در این حالت انرژی مکانیکی به الکتریکی تبدیل شده و بصورت جریان به منبع داده می‌شود.

۳- طراحی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس

ژنراتور سوئیچ رلوکتانس ۳ فاز ۱۲/۸ برای طراحی مبدل انرژی بادی تحریک مستقیم استفاده شده است. شکل ۱ مقطع ژنراتور طرح شده را نشان می‌دهد.

دلایل زیادی در مورد انتخاب این پیکربندی برای ماشین وجود دارد. ماشین‌های سوئیچ رلوکتانس ۳ یا ۴ فاز، معمولاً بهترین کارایی و درایو را دارا هستند [۴]. این ماشین‌ها را می‌توان با ترکیب‌های مختلفی از تعداد قطب‌های روتور و استاتور در نظر گرفت. تعداد زیاد قطب‌ها تموج گشتاور را کاهش می‌دهد، اما نسبت اندوکتانس هم خطی بر اندوکتانس نا هم خطی کاهش می‌یابد و ممکن است، باعث افزایش ولت آمپر کنترلی و کاهش توان خروجی شود.

در طراحی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس بهتر است از ترکیب‌هایی استفاده کرد که بیش از یک جفت قطب فعال دارد. زیرا بیضی شدگی (Ovalisation) هسته استاتور برای تحریک چند قطبه نسبت به تحریک ۲ قطبه بسیار کمتر است. با استفاده از ترکیب‌هایی با بیش از یک جفت قطب فعال می‌توان نسبت اندوکتانس را بزرگتر، سیم پیچ‌های انتهایی را کوتاهتر، تلفات مسی را حداقل، قاب را کوتاهتر و اندوکتانس نا هم خطی را کاهش و بالاخره، مسیر شار میدان مغناطیسی را کوتاهتر کرد.

در [۴] ترکیب‌های قطب رایج برای ماشین‌های ۳ و ۴ فاز ذکر شده و نمونه‌های مناسب آن بر اساس نسبت اندوکتانس و فرکانس مغناطیسی انتخاب شده است. در میان این نمونه‌ها تنها ترکیب ۱۲/۸ دارای تعدد (Multiplicity) ۲ می‌باشد، که

برای کاهش سطح نویز ژنراتور از اهمیت زیادی برخوردار است. بدین ترتیب ترکیب ۱۲/۸ که تعدد ۲ ترکیب ۶/۴ است، انتخاب می‌شود.

در [۵] به منظور بررسی تأثیر تعداد قطب‌های استاتور و روتور بر عملکرد ژنراتور سوئیچ رلوکتانس سرعت کم برای استفاده در مبدل‌های انرژی بادی تحریک مستقیم، مطالعه طراحی بر روی ماشین‌های سه فاز صورت گرفته است. نتایج تحقیق مزبور نشان می‌دهد ماشین ۱۲/۸ می‌تواند به خوبی ترکیب‌هایی با تعداد قطب بیشتر عمل کند. بعلاوه، این ماشین بهترین ضریب توان را داراست.

طراحی اولیه ابعاد ژنراتور بر اساس روابط ارائه شده در [۶] صورت گرفته است و شکل ۲ الگوریتم طراحی ژنراتور را نشان می‌دهد.

برای پرهیز از طویل شدن مقاله تنها به نکات عمده در روند طراحی پرداخته می‌شود.

در معادله خروجی ماشین سوئیچ رلوکتانس عبارتست از:

$$T = K \cdot D_r^2 \cdot L_{stk} \quad (1)$$

که در آن مقدار اولیه ۶ برای ضریب خروجی K انتخاب می‌شود و در مراحل مختلف طراحی ابعاد ماشین، مقدار بهینه‌ای برای آن محاسبه می‌شود، تا ابعاد روتور حداقل گردد.

مقدار $\frac{D_r}{D_s}$ بگونه‌ای انتخاب می‌شود که فضای لازم برای

سیم پیچ‌ها بر اساس حداکثر چگالی جریان وجود داشته باشد و D_s نیز حداقل گردد.

مقدار اولیه N_p قطب با استفاده از رابطه زیر برای هر سیم پیچ محاسبه می‌شود:

$$N_p = \frac{46500V_p}{rpm \cdot m \cdot t_s \cdot L_{stk} \cdot N_r \cdot B_s} \quad (3)$$

که در آن V_p ولتاژ تغذیه DC سیم پیچ هر قطب استاتور است. با توجه به اینکه در این ژنراتور هر یک از فازها از ۴ سیم پیچ قطب تشکیل شده است، i_{peak} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$i_{peak} = \frac{P_{peak}}{2N_p B_s D_r L_{stk}} \quad (4)$$

جدول ۱. مشخصات ژنراتور سوئیچ رلوکتانس

D_s	67.51 Cm	d_r	3.39 Cm
D_f	39.83 Cm	y_s	5.21 Cm
L_{stk}	31.86 Cm	y_f	5.54 Cm
L_e	43.34 Cm	D_{sh}	21.96 Cm
g	0.06 Cm	A_{slot}	57.63 Cm ²
B_s	16	A_w	3.8 mm ²
B_f	15	N_p	379 turns
t_s	5.21 Cm	V_p	380 V
t_f	5.54 Cm	rpm	100
d_s	8.56 Cm		

۴- ملاحظات نویز و مدهای لرزشی در طراحی ژنراتور

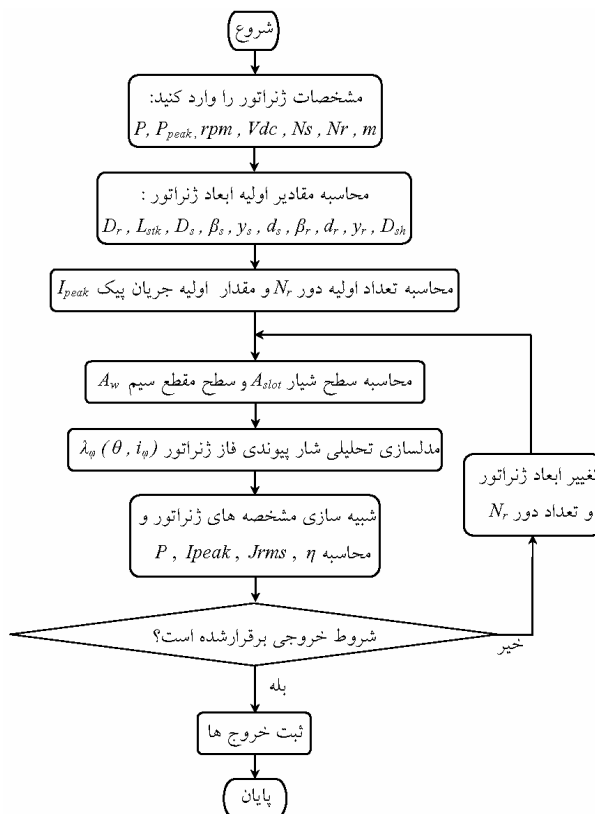
سوئیچ رلوکتانس

منابع اصلی نویز در ماشین سوئیچ رلوکتانس، لرزش شعاعی و پیچش مقید طوقه استاتور و تکان‌های جانبی قطب‌های استاتور هستند [۷ و ۸].

لرزش استاتور از مکانیزم تولید گشتاور در ماشین سوئیچ رلوکتانس ناشی می‌شود. گشتاور با اعمال جریان به سیم پیچ فازی که تمایل به کشاندن روتور به موقعیت هم خطی دارد، تا حداقل رلوکتانس را برای شار استاتور فراهم سازد، تولید می‌شود. گشتاور بر روی جفت دندانه‌های استاتور مقابل هم که تحریک شده‌اند، وارد می‌شود و تمایل دارد دندانه‌ها را خم کرده و شکل استاتور را بر هم بزند. با حرکت قطب‌های روتور به موقعیت هم خطی، نیروی مماسی تولید گشتاور کاهش یافته و نیروی شعاعی نیز تولید می‌شود. این نیروی شعاعی، استاتور را در طول محور قطب‌های تحریک شده، فشرده می‌کند و تمایل دارد آن را از شکل دایره ای به حالت بیضی شکل در آورد. از آنجا که در نقطه کموتاسیون شار قطب حداکثر مقدار خود را داراست، نیروی شعاعی در این نقطه حداکثر است. در نقطه کموتاسیون قاب استاتور در حداکثر جابجایی خود به سمت مرکز استاتور قرار دارد.

پس از کموتاسیون استاتور به حالت اصلی خود باز می‌گردد و ضربه ای بر قاب استاتور وارد می‌شود. در نتیجه استاتور با لرزش میرا شونده‌ای، نوسان می‌کند. این لرزش‌های شعاعی نویز آکوستیک ایجاد می‌کنند. جهت شتاب گیری قاب

برای محاسبه مدل شار پیوندی به مقدار I_{peak} نیاز است.



شکل ۲. الگوریتم طراحی ژنراتور ۱۲/۸

با استفاده از مقدار N_p و سطح قابل دسترس شیار، سطح

مقطع سیم بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$A_w = \frac{A_{slot} \cdot K_s}{2N_p} \quad (5)$$

در مرحله بعد، شار پیوندی با استفاده از مدل تحلیلی محاسبه شده و ژنراتور شبیه سازی می‌شود. خروجی‌های شبیه سازی با شروط بهینه سازی مقایسه می‌شود. در این طراحی شروط بهینه سازی بازده و وزن ژنراتور طراحی شده است، که در مبدل‌های انرژی بادی از اهمیت زیادی برخوردارند.

در صورتی که شروط خروجی تأمین نشود، ابعاد ژنراتور و تعداد دور در محدوده مجاز تغییر داده شده و مراحل طراحی دوباره تکرار می‌شوند.

نتایج حاصل از طراحی ژنراتور در جدول ۱ آمده است.

تیز کردن قطب روتور نه فقط تأثیر چندانی در بهبود مشخصه‌های ماشین سوئیچ رلوکتانس ندارد، بلکه موجب افزایش وزن روتور نیز می‌شود.

سطح نويز در ماشین سوئیچ رلوکتانس با افزایش بار زیاد می‌شود. یعنی وقتی ماشین در بارهای کم، با چگالی شار و جریان کمتر کار می‌کند و سطح نويز آن کاهش می‌یابد [۹] افزایش ضخامت طوقه استاتور، گرد کردن ته شیار استاتور و نوک تیز کردن قطب‌های استاتور باعث کاهش سطح سیم پیچ قابل دسترس می‌شود، بنابراین چگالی جریان و تلفات مسی افزایش می‌یابد. علاوه بر این چگالی شار در فولاد کاهش می‌یابد، که می‌تواند باعث کاهش تلفات هسته و نويز آکوستیک گردد.

افزایش نسبی اندکی در شکاف هوایی به کاهش نويز آکوستیک کمک می‌کند [۹]، اما باعث کاهش اندوکتانس هم خطی و نسبت اندوکتانس‌ها نیز می‌شود. کاهش نسبت اندوکتانس‌ها، گشتاور تولیدی را کاهش و جریان چرخشی نسبی را افزایش می‌دهد. این امر اندازه ترانزیستورها، دیودهای توان و خازن فیلتر را افزایش می‌دهد.

۵- شبیه‌سازی ژنراتور سوئیچ رلوکتانس و محاسبه تلفات

با استفاده از روش تحلیلی [۱۴ و ۱۳]، مدل شار برای قطب استاتور در ژنراتوری با ابعاد دلخواه محاسبه می‌شود. مشخصه‌های شار پیوندی یک قطب ژنراتور شکل ۱ در شکل ۳ دیده می‌شود.

معادله ولتاژ یک قطب از ژنراتور سوئیچ رلوکتانس را می‌توان بصورت زیر نوشت:

$$v = Ri + \frac{\partial \psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \omega \quad (6)$$

به ازای جریان و زاویه روتور مشخص، از $\frac{\partial \psi}{\partial i}$ و $\frac{\partial \psi}{\partial \theta}$ مشخصه‌های شار پیوندی سیم پیچ فاز محاسبه می‌شود. با جایگذاری آنها در معادله ولتاژ (۹) جریان سیم پیچ فاز و شار دور قطب ژنراتور در هر نقطه کار محاسبه می‌گردد.

استاتور، در آغاز از حالت فشرده آن در جهت خلاف مرکز می‌باشد.

در [۷] قسمت عمده نويز آکوستیک به ۳ مد لرزشی مربوط به حرکت شعاعی قطب‌های مقابل هم نسبت داده شده است: مد استوانه‌ای مرتبه ۲، مد مرتبه ۴ و مد شعاعی یکنواخت.

در [۹] ۲ مد لرزشی با خمش دندان‌های استاتور بعنوان مد ۳ و ۹ نامگذاری شده‌اند و ممکن است در سرعت‌های معین تحریک شوند. همچنین ثابت شده است که فرکانس طبیعی مربوط به مد ۲، بستگی زیادی به ضخامت طوقه استاتور دارد.

در [۱۰] ثابت شده است که طوقه استاتور برای مد ۲، که تنها به بیضی شدگی مربوط می‌شود و برای مد مکند (Aspiration)، تحت فشار زیادی قرار دارد. فشارهای مدهای ۴ و ۶ در نزدیک اتصال دندانه به طوقه اهمیت دارند. دو راه برای کاهش لرزش و نويز در ماشین سوئیچ رلوکتانس وجود دارد:

۱) استفاده از کنترل‌های مناسب [۸ و ۷] و ۲) طراحی ساختار و ابعاد مناسب ماشین [۱۰ و ۱۱].

در [۱۰] ثابت شده است که در ضخامت‌های زیاد طوقه استاتور، فرکانس مد ۲ می‌تواند به ۲/۵ و فرکانس مد ۳ در ۳ ضرب شود. فرکانس‌های طبیعی مدهای ۴ و ۶ تنها برای مقادیر زیاد شعاع گرد شدن پایه دندان‌های استاتور، به میزان قابل توجه ای افزایش می‌یابد.

در [۱۱] ثابت شده است که طوقه استاتور چند ضلعی-گرد و قطب‌های استاتور نوک تیز (Tapered) مطابق شکل ۱ کمترین لرزش را در بین مدل‌های تحلیل شده دارند. از اینرو این مدل از طوقه استاتور و دندان‌های قطب برای طراحی ژنراتور انتخاب شده است.

نوک تیز کردن (Tapering) قطب‌های استاتور، باعث کاهش رلوکتانس در قطب‌ها و طوقه استاتور می‌شود، بنابراین شار بازای mmf مفروض افزایش می‌یابد، از اینرو اندوکتانس افزایش یافته و مشخصه گشتاور در نزدیکی موقعیت هم خطی بهبود می‌یابد [۱۲] نوک تیز کردن قطب‌های استاتور تأثیری در نزدیکی موقعیت نا هم خطی ندارد. نوک

با استفاده از شکل موج شار قطب استاتور می توان شکل موج شار و چگالی شار را در تمام قسمت های ژنراتور بدست آورد. شکل ۵ شکل موج های چگالی شار را در قسمت های مختلف ژنراتور نشان می دهد.

تلفات آهنی در هر قسمت از هسته در ژنراتور سوئیچ رلوکتانس از رابطه زیر محاسبه می شود [۱۵]:

$$\rho_v = \frac{1}{T} C_m f_{\sin,eq}^{\alpha-1} B^\beta \quad (7)$$

که ρ_v چگالی تلفات بر حسب وات بر متر مکعب، T پریود شکل موج شار بر حسب ثانیه، $f_{\sin,eq}$ فرکانس شکل موج شار سینوسی معادل بر حسب هرتز، B مقدار چگالی شار بر حسب تسلا و C_m ، α و β ثوابت ماده می باشند. تلفات از حاصلضرب حجم موثر هر قسمت در ρ_v مربوطه بدست می آید.

برای شکل موج شار در هر قسمت از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$f_{\sin,eq} = \frac{2}{\pi} \sum_{k=2} \left(\frac{B_k - B_{k-1}}{B_{Max} - B_{Min}} \right)^2 \cdot \frac{1}{t_k - t_{k-1}} \quad (8)$$

که در آن B_k در یک شکل موج شار قطعه ای خطی، چگالی شار در زمان t_k می باشد.

تلفات مسی برای هر فاز ژنراتور سوئیچ رلوکتانس از رابطه زیر محاسبه می شود:

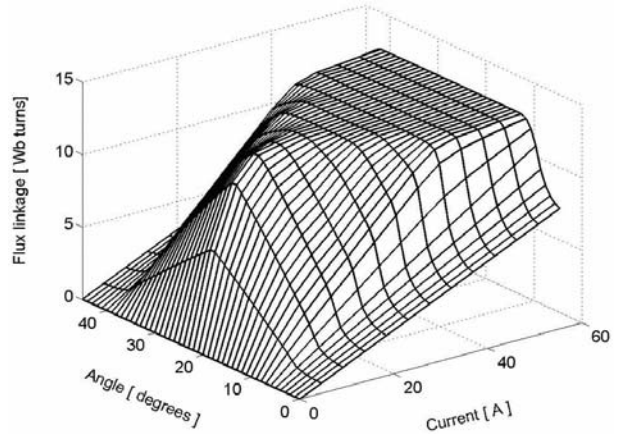
$$P_{cu} = I_{rms}^2 R_s \quad (9)$$

که در آن P_{cu} تلفات مسی، R_s مقاومت و I_{rms} جریان موثر فاز هستند.

تلفات هدایتی ادوات الکترونیک قدرت برای یک فاز ژنراتور سوئیچ رلوکتانس و در توپولوژی نیم پل نامتقارن از رابطه زیر محاسبه می شود:

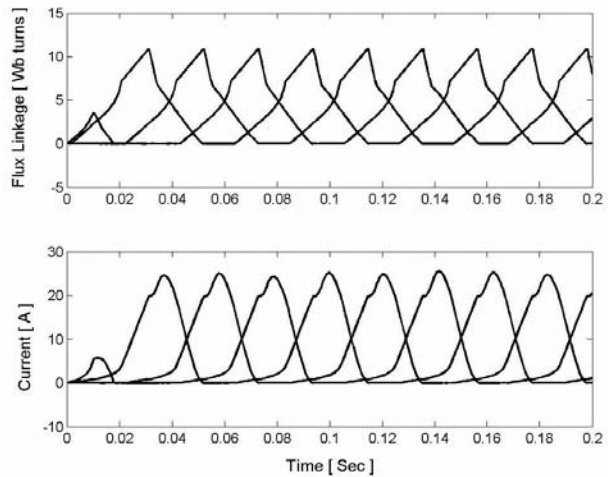
$$P_{con} = \frac{2}{T} \left[\int_0^T v_{ce} \cdot i_c dt + \int_0^T v_D \cdot i_D dt \right] \quad (10)$$

که v_{ce} ولتاژ کلکتور- امیتر ترانزیستورها و ولتاژ مستقیم (Forward) دیودها است. i_c و i_D بترتیب جریان ترانزیستور و دیود می باشند.

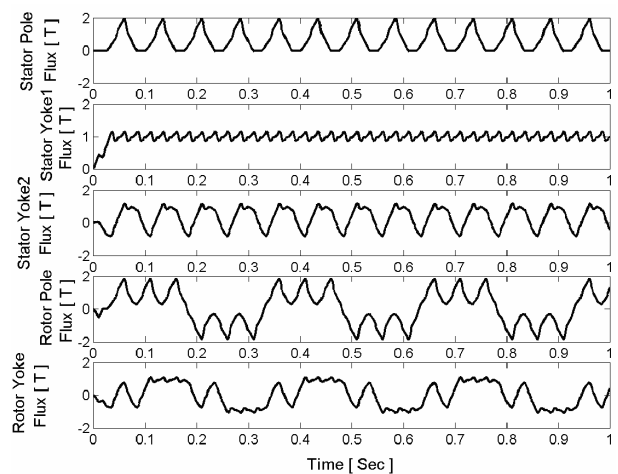


شکل ۳. مشخصه شار پیوندی فاز ژنراتور طراحی شده

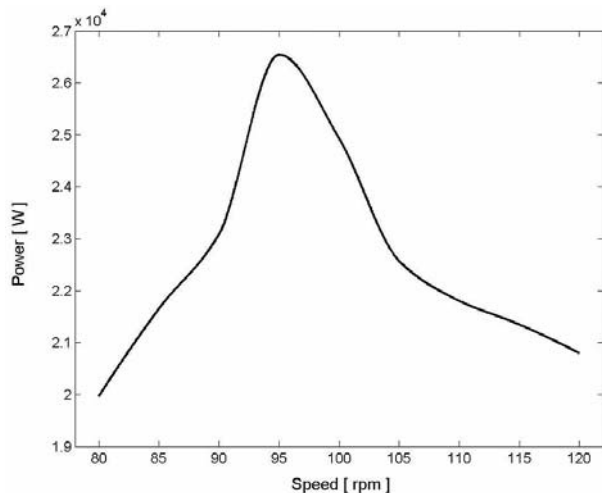
شکل ۴ منحنی شار- دور قطب و جریان سیم پیچ را بر حسب زمان نشان می دهد.



شکل ۴. تغییرات زمانی منحنی شار- دور قطب و جریان سیم پیچ ژنراتور طراحی شده

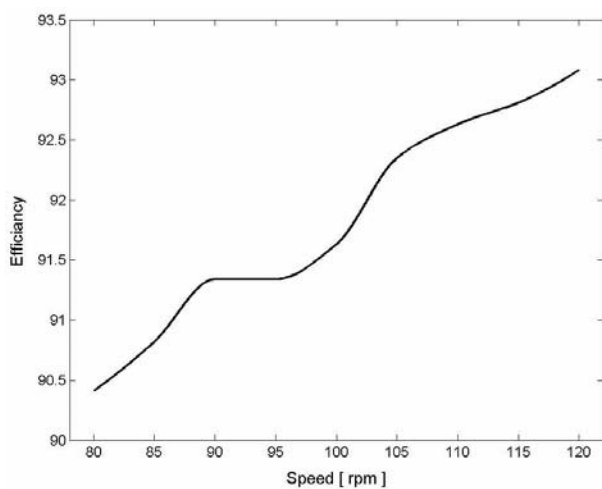


شکل ۵. شکل موج های چگالی شار در قسمت های مختلف هسته ژنراتور



شکل ۷. توان خروجی ژنراتور بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده

در شکل ۸ بازده ژنراتور بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده نشان داده شده است. همانگونه که دیده می شود، با افزایش سرعت بازده افزایش می یابد. با صعود سرعت نیروی ضد محرکه در ژنراتور افزایش می یابد، و این امر باعث می شود، حتی پس از خاموشی ترانزیستورها و معکوس شدن ولتاژ سیم پیچ ژنراتور، جریان افزایش یابد. این افزایش باعث افزایش نسبت جریان دیودها (جریان تولیدی) بر جریان ترانزیستورها (جریان تحریک) می گردد، که به معنی افزایش بازده ژنراتور است.

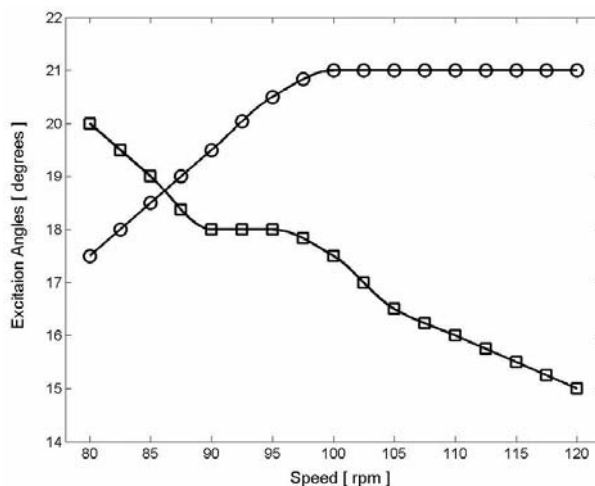


شکل ۸. بازده ژنراتور بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده

در محاسبه تلفات از داده های ترانزیستور IGBT مدل GT40M301 ساخت شرکت توشیبا و دیود قدرت مدل T85HFL100 ساخت شرکت I.R. استفاده شده است.

۶- داده های کارکرد ژنراتور

در شکل ۶ زوایای تحریک انتخاب شده برای دستیابی به عملکرد مناسب ژنراتور نشان داده شده اند. علامت مربع زاویه روشن شدن و علامت دایره زاویه هدایت را نشان می دهند. این زوایا بر اساس حداکثر جریان سیم پیچ ۴۰ A انتخاب شده اند. از آنجایی که حداکثر زاویه هدایت می تواند نصف گام قطب ژنراتور باشد، محدودیت ۲۱ درجه برای زاویه هدایت در نظر گرفته شده است.



شکل ۶. زوایای تحریک (□) زاویه روشن شدن، (○) زاویه هدایت

شکل ۷ توان خروجی ژنراتور را بر حسب سرعت و زوایای تحریک انتخاب شده نشان می دهد. در سرعت های کمتر از ۱۰۰ rpm با افزایش سرعت ژنراتور، توان خروجی افزایش می یابد، اما در ورای ۱۰۰ دور بر دقیقه به دلیل محدودیت زاویه هدایت و ناتوانی ژنراتور برای برقراری جریان تحریک مناسب، توان خروجی کاهش می یابد.

- [8] C.Y. Wu and C. Pollock, "Analysis and reduction of vibration modes and acoustic noise in the switched reluctance drive, IEEE Trans. Ind Appl. , vol. 31, No. 1, Jan/Feb 1995, pp.91-98.
- [9] R.S. Colby, F. M. Mottier, and T. J. E. Miller, " Vibration modes and acoustic noise in four-phase switched reluctance motor," IEEE Trans. Ind. Appl. , vol. 32, Nov/Dec 1996, pp. 1357-1364.
- [10] M. Besbes, C. Picod, F. Camus, and M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behavior and electromagnetic performances of switched reluctance motors," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 145, No. 5, Sep 1998, pp. 462-468.
- [11] J.P. Hong, K. H. Ha, and J. Lee, "Stator pole and yoke design for vibration reduction of switched reluctance motor," IEEE Trans. Magnetics, vol. 38, No. 2, Mar 2002, pp. 929-932.
- [12] C. Neagoe, A. Foggia, and R. Krishnan, "Impact of pole tapering on the electromagnetic torque of the switched reluctance motor," IEEE Conf. Elect. Mach. and drives, May 1997, pp. WA1/5.1-WA1/5.3.
- [13] A. Radun, "Analytical calculation of the switched reluctance motor's unaligned inductance," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 35, No. 6, Nov. 1999, pp. 4473-4481.
- [14] A. Radun, "Analytically computing the flux linked by a switched reluctance motor phase when the stator and rotor poles overlap," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 36, No. 4, Jul. 2000, pp. 1996-2003.
- [15] J. Reinert, R. Inderka and R. W. De Donker, "A novel method for the prediction of losses in switched reluctance machines", EPE'97, pp.3.608-3.612.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله طراحی یک ژنراتور سوئیچ رلوکتانس برای تبدیل مستقیم انرژی بادی ارائه شد. با توجه به اهمیت موضوع نویز در ژنراتور سوئیچ رلوکتانس، پس از تحلیل عملکرد نویز و تأثیر ابعاد ماشین بر آن، ساختاری برای ژنراتور انتخاب شد که حداقل نویز را تولید کند. با استفاده از ساختار انتخاب شده و الگوریتم ارائه شده برای طراحی ژنراتور، ابعاد بهینه‌ای به روش سعی و خطا و با تعداد تکرار زیاد، بدست آمد.

مراجع

- [1] D.E. Cameron, and J. H. Lang, "The control of high-speed variable-reluctance generators in electric power systems," IEEE Trans. Ind. Applicat., Vol. 29, Nov./Dec. 1993, pp. 1106-1109
- [2] J.M. Kokernak, D. A. Torrey, and M. Kaplan, "A switched reluctance starter/alternator for hybrid electric vehicles," in Proc. PCIM'99, 1999, pp. 74-80.
- [3] R. Cardenas, W. F. Ray, and G. M. Asher, "Switched reluctance generators for wind energy applications," in Proc. IEEE PESC'95, 1995, pp. 559-564.
- [4] T.J.E. Miller, "Optimal design of switched reluctance motors," IEEE Trans. on Ind. Electronics, Vol. 49, No.1, Feb. 2002, pp. 15-27.
- [5] M.A. Mueller, "Design of low speed switched reluctance machines for wind energy converters," IEE Conf. on Electrical Machines and Drives, No. 468, 1999, pp. 60-64.
- [6] T.J.E. Miller, Switched reluctance motor and their control. Oxford, U.K.: Magna Physics Clarendon, 1993.
- [7] D.E. Cameron, J. H. Lang, and S. D. Umans, "The origin and reduction of acoustic noise in doubly salient variable-reluctance," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 28, No. 6, 1992, pp. 1250-1255.