

طراحی بهینه یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه ۲۵۰ کیلوواتی

علی ایزانلو^۱، سید احسان عبداللهی^{۲*}، سید اصغر غلامیان^۳

۱- دانشجوی دکتری، ۲- استادیار، ۳- دانشیار، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

(دریافت: ۱۳۹۸/۰۸/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۸/۱۰/۲۸)

چکیده

ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) یکی از مهم‌ترین ژنراتورهای است که در ساختار توربین‌های بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در سالیان اخیر، تعداد DFIG‌هایی که در ساختار توربین‌های بادی استفاده شده، افزایش چشم‌گیری نسبت به دیگر ژنراتورها داشته است. از آن‌جا که مقالات محدودی در زمینه طراحی DFIG‌ها ارائه شده و روند طراحی و فرمول‌های مورد نیاز به صورت ناقص مورد بررسی قرار گرفته، در این مقاله طراحی نمونه یک DFIG ۲۵۰ کیلوواتی به تفصیل ارائه شده است. در ابتدا محاسبات تحلیلی ابعاد، توزیع چگالی شار در استاتور و رتور و سایر کمیت‌های طراحی این ژنراتور ارائه شده و مدل تحلیلی-محاسباتی این طراحی به دست آمده است. همچنین الگوریتمی جدید که بر مبنای تکرار می‌باشد جهت حصول نتایج دقیق‌تر در طراحی انجام شده، ارائه شده است. سپس برای تأیید و صحت طراحی انجام شده از نرم‌افزار Ansys Maxwell که بر پایه آنالیز اجزای محدود می‌باشد استفاده شده است. در انتها نتایج حاصل از طراحی و آنالیز عددی با نتایج حاصل از آنالیز اجزای محدود مقایسه شده و این مقایسه صحت عملکرد طراحی انجام شده را نشان می‌دهد.

کلید واژه‌ها: ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG)؛ آنالیز اجزای محدود (FEA)؛ طراحی ژنراتور؛ توربین بادی؛ انرژی باد

۱. مقدمه

سنکرون با تحریک میدان (EESG) در ساختار آن‌ها استفاده شده است. دلیل عدم به‌کارگیری گیربکس در این ساختار امکان کارکرد این ژنراتورها در سرعت پایین می‌باشد [۲].

امروزه، ساختار نوع دوم یکی از پرکاربردترین ساختارها می‌باشد. DFIG‌ها مزایای زیادی از قبیل قابلیت کارکرد سرعت متغیر، قابلیت تزریق توان راکتیو به شبکه، استفاده از مبدل پشت به پشت با توان نامی ۲۵-۳۰ درصد توان نامی ژنراتور، هزینه کمتر و قابلیت اطمینان بیشتر دارند [۳]. در جدول (۱) مقایسه‌ای بین چند نوع ساختار توربین بادی که در آن‌ها از ژنراتورهای مختلف استفاده شده، انجام شده است [۴]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ساختار توربین بادی با DFIG وزن و هزینه‌ی بسیار کمتری نسبت به دو ساختار دیگر دارد، ولی تلفات کل آن بالاتر از دو ساختار دیگر است که بخش عمده آن مربوط به تلفات گیربکس می‌باشد. هزینه هر کیلووات انرژی در ساختار DFIG نسبت به دو ساختار دیگر اندکی بیشتر است ولی با توجه به دو ویژگی بسیار بهتر آن، میزان استفاده از این ساختار بسیار بیشتر و گسترده‌تر می‌باشد.

طراحی موتورهای القایی در مراجع مختلف به صورت گسترده مورد بررسی قرار گرفته است [۵-۸]، ولی در حوزه طراحی ماشین‌های القایی دو سو تغذیه منابع محدودی موجود می‌باشد

سرعت پیشرفت و استفاده از انرژی بادی در زمینه انرژی الکتریکی نسبت به سایر انرژی‌های تجدیدپذیر بسیار سریع‌تر و گسترده‌تر می‌باشد. پیش‌بینی شده است که میزان کل ظرفیت انرژی بادی نصب‌شده تا پایان سال ۲۰۱۹ به ۶۵۰ گیگاوات برسد. این به معنی آن است که انرژی بادی تا سال ۲۰۲۰ تقریباً ۸ درصد و تا سال ۲۰۳۰ تقریباً ۱۴/۹ درصد از انرژی الکتریکی مصرفی در سطح دنیا را تأمین می‌نماید [۱]. در توربین‌های بادی با قدرت بزرگ، به‌طور کلی سه نوع ساختار مورد استفاده قرار می‌گیرد. نوع اول، سامانه‌های توربین بادی سرعت ثابت هستند که در ساختار آن‌ها از یک گیربکس چندمرحله‌ای جهت افزایش سرعت رتور توربین و یک ژنراتور القایی قفس سنجابی (SCIG) که به صورت مستقیم به شبکه متصل است، استفاده می‌شود. نوع دوم، توربین‌های بادی سرعت متغیر هستند که در ساختار آن‌ها از یک گیربکس چند مرحله‌ای و یک DFIG که استاتور آن به صورت مستقیم و رتور آن از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل می‌شود، استفاده شده است و نوع سوم هم توربین‌های بادی سرعت متغیر و فاقد گیربکس هستند که از ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) یا ژنراتورهای

بهینه یک DFIG با ظرفیت ۲۵۰ کیلووات به صورت کامل ارائه شده است. در بخش ۲ ابتدا مشخصات مربوط به ماشین مورد نظر ارائه شده و سپس فرمول‌های مربوط به محاسبات تحلیلی ابعاد ماشین و شیارهای رتور و استاتور، محاسبه اندازه یوغ‌های رتور و استاتور و محاسبه ولتاژهای مغناطیسی مورد بحث قرار گرفته است. در بخش ۳ نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی در نرم‌افزار Ansys Maxwell شده و سپس به وسیله نرم‌افزار Ansys Maxwell صحت‌سنجی انجام شده است.

۲. روند طراحی یک DFIG

۲-۱. پارامترهای اولیه طراحی

پارامترها و ویژگی‌های اصلی یک DFIG جهت طراحی، در جدول (۲) ارائه شده است. توان اکتیو استاتور منتقل شده به شبکه، ولتاژ نامی رتور و استاتور، سرعت نامی و تعداد قطب‌ها از پارامترهای اصلی طراحی هستند. همچنین برای یوغ رتور و استاتور از ورق M19-24G استفاده شده است.

جدول (۲): پارامترهای اولیه طراحی

پارامتر	سمبل (واحد)	استاتور	رتور
ویژگی‌های اولیه			
قدرت ژنراتور	P (kW)	۲۵۰	
بازده	η (%)	۹۵	
ولتاژ خط	$U_{s,r}$ (V)	۴۰۰	
حداکثر لغزش	S_{max}	۰/۲۵	
تعداد قطب‌ها	2p	۴	
تعداد فازها	m	۳	
فرکانس	f (Hz)	۵۰	
ضریب توان	PF	۱	
فرضیات			
چگالی جریان خطی	A (kA/m)	۵۰	
چگالی شار فاصله هوایی (بیک)	B_{δ} (T)	۰/۷۵	
چگالی شار دندانه‌ها	$B_{ds,r}$ (T)	۱/۶۵	
چگالی شار یوغ	$B_{ys,r}$ (T)	۱/۵	
چگالی جریان	$J_{s,r}$ (A/mm ²)	۴/۵	۶/۵
تعداد مسیرهای موازی جریان	$a_{s,r}$	۲	۱
شیار بر قطب بر فاز	$q_{s,r}$	۵	۴
ضریب اشباع	α_i	۰/۷	
ضریب فضای هسته	k_{fe}	۰/۹۸	
ضریب شکل‌دهی	k_f	۱/۰۷۵	
نسبت طول هسته به گام قطبی	λ	۱/۵	

۲-۲. ابعاد هندسی ژنراتور

طول ژنراتور و قطر خارجی استاتور مهم‌ترین ابعاد هندسی ژنراتور هستند، چون این دو مقدار ابعاد ژنراتور را تعیین می‌نمایند. در

جدول (۱): مقایسه بین سه ساختار توربین بادی با ژنراتورهای مختلف

نوع ژنراتور (۳ مگاوات)	DFIG	EESG	PMSG
وزن مواد مورد استفاده در ساختار ژنراتور بر حسب تن			
آهن	۴/۰۳	۳۲/۵	۱۸/۱
مس	۱/۲۱	۱۲/۶	۴/۳
آهنربا	-	-	۱/۷
وزن کل	۵/۲۵	۴۵/۱	۲۴/۱
هزینه بر حسب هزار یورو			
مواد فعال ژنراتور	۳۰	۲۸۷	۱۶۲
ساختار ژنراتور	۳۰	۱۶۰	۱۵۰
گیربکس	۲۲۰	-	-
مبدل پشت به پشت	۴۰	۱۲۰	۱۲۰
هزینه سیستم ژنراتور	۳۲۰	۵۶۷	۴۳۲
هزینه بخش‌های دیگر توربین	۱۳۰۰	۱۳۰۰	۱۳۰۰
میزان هزینه‌های متغیر	۲۵۰	۲۵۰	۲۵۰
هزینه کل	۱۸۷۰	۲۱۱۷	۱۹۸۲
انرژی سالیانه			
تلفات مسی (MWh)	۸۲	۴۵۶	۱۸۹
تلفات آهنی (MWh)	۷۰	۴۰	۸۹
تلفات مبدل (MWh)	۷۸	۲۴۳	۲۳۵
تلفات گیربکس (MWh)	۵۳۳	-	-
تلفات کل (MWh)	۷۶۳	۷۳۹	۵۱۳
انرژی حاصله (GWh)	۷/۷۳	۷/۸۸	۸/۰۴
انرژی حاصله سالیانه/هزینه کل			
کیلووات ساعت/یورو	۴/۱۳	۳/۷۲	۴/۰۵

در [۹] محاسبات تحلیلی مربوط به یک DFIG با ظرفیت ۲،۵ مگاوات به صورت جامع انجام شده است. در [۱۰] یک DFIG جهت کار با یک گیربکس یک مرحله‌ای طراحی شده است. در [۱۱] مشخصات یک DFIG ۵ کیلوواتی به وسیله یک سری معادلات از روی مشخصات یک DFIG ۲/۵ مگاواتی با هدف به کارگیری در موارد آزمایشگاهی، تخمین و سپس ساخته شده و مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۲] ساختاری از DFIG، طراحی شده که در آن رتور به صورت مستقیم و استاتور از طریق یک مبدل پشت به پشت به شبکه متصل شده است. در [۱۳] امکان‌سنجی ساخت یک DFIG با ظرفیت ۱۰ مگاوات و ۶۰۰ قطب جهت استفاده به صورت Direct-Drive (عدم استفاده از گیربکس) انجام شده است.

در مراجع ذکر شده مربوط به DFIG، روال طراحی DFIG، فرمول‌های مربوط به آن و مشخصات کامل یک DFIG جهت طراحی، به صورت کامل ذکر نشده است، لذا در این مقاله طراحی

تعداد شیارهای استاتور و رتور برابر است با:

$$Q_{s,r} = 2pmq_{s,r} \quad (۸)$$

گام قطبی برحسب متر و تعداد شیار و همچنین گام شیار برحسب متر عبارتند از:

$$\tau_{ps,r} = \frac{\pi D_{s,r}}{2p} \quad (۹)$$

$$y_{Qs,r} = \frac{Q_{s,r}}{2p} \quad (۱۰)$$

$$\tau_{us,r} = \frac{\pi D_{s,r}}{Q_{s,r}} \quad (۱۱)$$

که $Q_{s,r}$ تعداد شیارهای استاتور و رتور می باشد. ضریب سیم پیچی از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می باشد:

$$k_{ws,r1} = \sin\left(\frac{y_{s,r}}{y_{Qs,r}} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{1}{2q_{s,r} \sin\left(\frac{\pi}{6q_{s,r}}\right)} \quad (۱۲)$$

که $y_{s,r}$ گام کلاف و $y_{Qs,r}$ گام قطبی می باشد. در این ماشین از یک سیم پیچی دوطبقه برای سیم پیچی رتور و استاتور استفاده شده و همچنین سیم پیچی جهت کاهش هارمونیک به صورت گام کسری می باشد که نسبت گام کلاف/گام قطبی برای استاتور و رتور به ترتیب به صورت $۱۵/۱۲$ و $۱۲/۱۰$ انتخاب شده است. تعداد دوره های کلاف سری در یک فاز برای استاتور (N_s) به وسیله معادله زیر محاسبه می شود:

$$N_s = \frac{\sqrt{2}E_m}{\omega k_{ws1} l' \tau_{ps} \alpha_i B_\delta} \quad (۱۳)$$

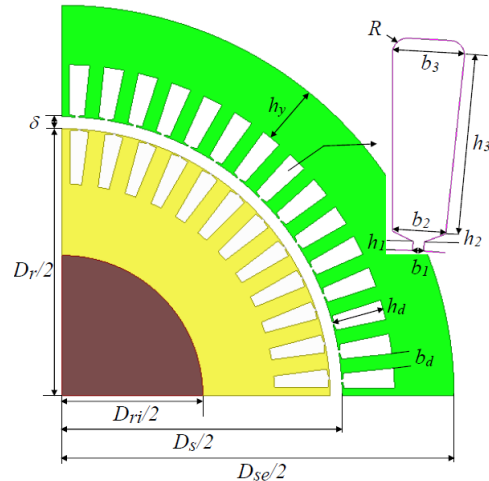
$$E_m = \frac{c_m U_s}{\sqrt{3}} \quad (۱۴)$$

τ_{ps} گام قطبی استاتور است، همچنین مقدار c_m برای ماشین های القایی در مُد موتوری می تواند عددی بین (۰/۹۸-۰/۹۳) و در مُد ژنراتوری عددی بین (۱/۱-۱/۰۳) انتخاب شود. همان طور که در جدول ۲ نشان داده شد، مقدار ولتاژ خط برای رتور و استاتور یکسان در نظر گرفته شد. این به معنی آن است که هیچ تبدیل ولتاژ خاصی برای سمت رتور نیاز نیست و مبدل قدرت به صورت مستقیم به شبکه متصل می شود. بنابراین برای $U_s = U_r$ در S_{max} ، نسبت دور بین رتور و استاتور به صورت زیر به دست می آید [۹]:

$$k_{rs} = \frac{1}{|S_{max}|} \quad (۱۵)$$

تعداد دوره های رتور در هر مسیر جریان (N_r) برابر خواهد بود با:

مورد ابعاد هندسی ژنراتور می توان به قطر داخلی و خارجی هسته استاتور، ارتفاع یوغ و دندانه، عرض دندانه، و ابعاد شیارها اشاره نمود. همچنین در مورد ابعاد رتور قطر داخلی و خارجی رتور از مهم ترین ابعاد هستند. توپولوژی ژنراتور که شامل ابعاد هندسی است، در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱): توپولوژی ژنراتور جهت نمایش ابعاد هندسی

معادلات مربوط به طراحی موتورهای القایی و ماشین های سنکرون به ترتیب در مراجع [۹]، [۱۴] و [۱۵] ارائه شده است. معادلات مربوط به طراحی DFIG با استفاده از این مراجع استخراج شده و در ادامه بیان شده است. قطر داخلی استاتور (D_s) به وسیله معادله زیر قابل محاسبه می باشد [۱۴]:

$$D_s = \sqrt[3]{\frac{2p}{\pi \lambda} \cdot \frac{1}{C_o} \cdot \frac{p}{f_s} \cdot k_E S_{gap}} \quad (۱)$$

ضریب Esson (C_o)، ضریب k_E و مقدار توان ظاهری فاصله هوایی (S_{gap}) برای ماشین های آسنکرون به قرار زیر می باشند:

$$C_o = k_f \alpha_i k_{ws1} \pi^2 AB_\delta \quad (۲)$$

$$k_E = 0.98 - 0.005 \times p \quad (۳)$$

$$S_{gap} = \frac{P_s}{\eta \times PF} \quad (۴)$$

مقدار λ که برابر نسبت طول هسته به گام قطبی می باشد به صورت زیر محاسبه خواهد شد. لذا با استفاده از این رابطه می توان مقدار طول پشته و طول مؤثر را محاسبه نمود [۱۵].

$$\lambda = \frac{l}{\tau_{ps}} = \frac{2lp}{\pi D_s} \quad (۵)$$

$$l' = l + 2\delta \quad (۶)$$

که مقدار فاصله هوایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\delta = (0.1 + 0.012 \sqrt[3]{P_s}) 10^{-3} \quad (۷)$$

در معادلات فوق، علامت‌های مثبت و منفی به ترتیب برای شیار استاتور و رتور می‌باشند. همچنین عرض دندان $(b_{ds,r})$ از طریق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$b_{ds,r} = \frac{l' \tau_{us,r}}{k_{fe} l} \cdot \frac{B_{\delta}}{B_{ds,r}} + 0.1 \text{ mm} \quad (25)$$

عدد ۰/۱ در رابطه فوق جهت اثر پانچ و پرمابیلیته آهن در نظر گرفته شده است.

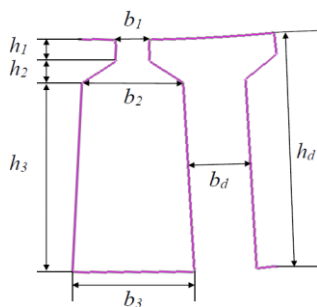
اکنون با حل معادلات (۲۰)، (۲۱) و (۲۳) مقادیر $h_{3s,r}$ و $h_{3s,r}$ تعیین می‌شوند. مقادیر $b_{1s,r}$ ، $h_{1s,r}$ و $h_{2s,r}$ به ترتیب ۱، ۱ و ۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه ارتفاع دندان عبارت است از:

$$h_{ds,r} = h_{1s,r} + h_{2s,r} + h_{3s,r} \quad (26)$$

با استفاده از رابطه (۲۵)، چگالی شار در بالا، میانه و انتهای دندان محاسبه شده و سپس به وسیله منحنی BH ورق مورد استفاده، مقادیر شدت‌های میدان مغناطیسی در سه نقطه فوق تعیین می‌شود. در نهایت ولتاژ مغناطیسی دندان به صورت زیر خواهد بود:

$$U_{mds,r} = \frac{H_{1ds,r} + 4H_{2ds,r} + H_{3ds,r}}{6} \cdot h_{ds,r} \quad (27)$$

که $H_{1ds,r}$ ، $H_{2ds,r}$ و $H_{3ds,r}$ به ترتیب شدت‌های میدان مغناطیسی در بالا، میانه و انتهای دندان می‌باشند.



شکل (۲): پیکربندی شیار و دندان استفاده شده در رتور و استاتور

۴-۲. مقدار ولتاژ مغناطیسی فاصله هوایی

به منظور محاسبه ولتاژ مغناطیسی فاصله هوایی در ابتدا ضریب کارتر رتور و استاتور محاسبه شده و سپس فاصله هوایی معادل تعیین می‌شود. این مقادیر عبارتند از [۱۵]:

$$\kappa_{s,r} = \frac{b_{1s,r} / \delta}{5 + b_{1s,r} / \delta} \quad (28)$$

$$N_r = \frac{k_{rs} N_s k_{ws1}}{k_{wr1}} \quad (16)$$

در صورتی که مقدار $N_{s,r}$ محاسبه شده عدد صحیح نبود، نزدیک‌ترین عدد صحیح به عدد قبلی به عنوان تعداد دور در نظر گرفته می‌شود. تعداد هادی در هر شیار عبارت است از:

$$z_{Qs,r} = \frac{2a_{s,r} m}{Q_{s,r}} N_{s,r} \quad (17)$$

$z_{Qs,r}$ باید دارای مقدار زوج باشد. با توجه به مقدار جدید $z_{Qs,r}$ مقدار $N_{s,r}$ دوباره به وسیله (۱۷) محاسبه شده و در ادامه مقدار چگالی شار فاصله هوایی با استفاده از (۱۳) به دست می‌آید.

۳-۲. ابعاد شیارها و دندانها

در این طراحی، از شیارهای نیمه بسته برای رتور و استاتور استفاده شده است که توپولوژی آن در شکل (۲) نشان داده شده است. در این توپولوژی، مقدار R صفر و عرض دندانها ثابت در نظر گرفته شده است. مساحت هادی‌های رتور و استاتور برابر است با [۱۵]:

$$S_{cs,r} = \frac{I_{s,r}}{a_{s,r} J_{s,r}} \quad (18)$$

$I_{s,r}$ مقدار جریان سیم‌پیچی‌های رتور و استاتور می‌باشد. بنابراین مساحت شیارهای رتور و استاتور اکنون با در نظر گرفتن ضریب پرشدگی شیار ($k_{cus,r}$) قابل محاسبه است:

$$S_{us,r} = \frac{z_{Qs,r} S_{cs,r}}{k_{cus,r}} \quad (19)$$

پرشدگی شیارها به عواملی مانند سطح ولتاژ، مواد و نوع سیم‌پیچی وابسته است. مقدار آن برای ماشین‌های با سطح ولتاژ پایین عددی بین (۰/۵-۰/۶) و برای ماشین‌های با سطح ولتاژ بالا عددی بین (۰/۳-۰/۴۵) است.

با توجه به شکل ۲ مساحت هندسی شیارها را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود:

$$S_{us,r} = \frac{1}{2} (b_{2s,r} + b_{3s,r}) h_{3s,r} \quad (20)$$

مقادیر $b_{2s,r}$ و $b_{3s,r}$ به قرار زیر می‌باشند:

$$b_{2s,r} = \tau_{2us,r} - b_{ds,r} \quad (21)$$

$$\tau_{2us,r} = \frac{\pi(D_{s,r} \pm 2h_{1s,r} \pm 2h_{2s,r})}{Q_{s,r}} \quad (22)$$

$$b_{3s,r} = \tau_{3us,r} - b_{ds,r} \quad (23)$$

$$\tau_{3us,r} = \frac{\pi(D_{s,r} \pm 2h_{1s,r} \pm 2h_{2s,r} \pm 2h_{3s,r})}{Q_{s,r}} \quad (24)$$

$$h_{ys,r} = \frac{\alpha_i B_\delta \tau_{ps,r} l'}{2k_{fe} l B_{ys,r}} \quad (34)$$

$$U_{mys,r} = cH_{ys,r} \tau_{ys,r} \quad (35)$$

$$= cH_{ys,r} \frac{\pi(D_{s,r} \pm 2h_{ds,r} \pm h_{ys,r})}{2p}$$

در معادلات بالا، علامت مثبت و منفی به ترتیب برای یوغ استاتور و رتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین ضریب C به وسیله مقدار ماکزیمم چگالی شارهای یوغ رتور و استاتور تعیین می‌شود که دیاگرام آن در ضمیمه الف ارائه شده است

۲-۷. فرآیند طراحی DFIG

فرآیند طراحی یک DFIG به صورت خلاصه در شکل ۳ نمایش داده شده است. بعد از تعیین پارامترهای اولیه، در مرحله بعد ابعاد هندسی ژنراتور شامل طول موثر استاتور (رتور)، ابعاد رتور و طول فاصله هوایی محاسبه می‌شوند. در ادامه، تعداد شیارها، ضریب سیم‌پیچی و تعداد دورهای رتور و استاتور محاسبه شده و سپس چگالی شار فاصله هوایی به دست آمده است. در مرحله ۸ و ۹ ابعاد شیارهای رتور و استاتور، ارتفاع و عرض دندانها و مقدار ضریب اشباع جدید حاصل شده است. در مرحله ۱۰ ضریب اشباع جدید با ضریب اشباع قدیم مقایسه شده و در صورتی که اختلاف بین آنها از خطای در نظر گرفته شده ($0/001$) کمتر بود فرآیند طراحی ادامه پیدا می‌کند، در غیر این صورت چگالی شار فاصله هوایی جدید بر اساس ضریب اشباع جدید محاسبه می‌شود و محاسبات از مرحله ۷ تکرار می‌شود. این فرآیند آنقدر تکرار می‌شود تا اختلاف بین دو ضریب اشباع قدیم و جدید کمتر از مقدار خطای در نظر گرفته شده باشد.

$$k_{s,r} = \frac{\tau_{us,r}}{\tau_{us,r} - \kappa_{s,r} b_{ls,r}} \quad (29)$$

$$\delta_e = k_s k_r \delta \quad (30)$$

که $k_{s,r}$ ضریب کارتر رتور و استاتور و δ_e فاصله هوایی معادل می‌باشد. در نهایت ولتاژ مغناطیسی فاصله هوایی از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{m\delta} = \frac{B_\delta}{\mu_0} \delta_e \quad (31)$$

۲-۵. محاسبه ضریب اشباع جدید

ضریب اشباع عبارت است از [۱۵]:

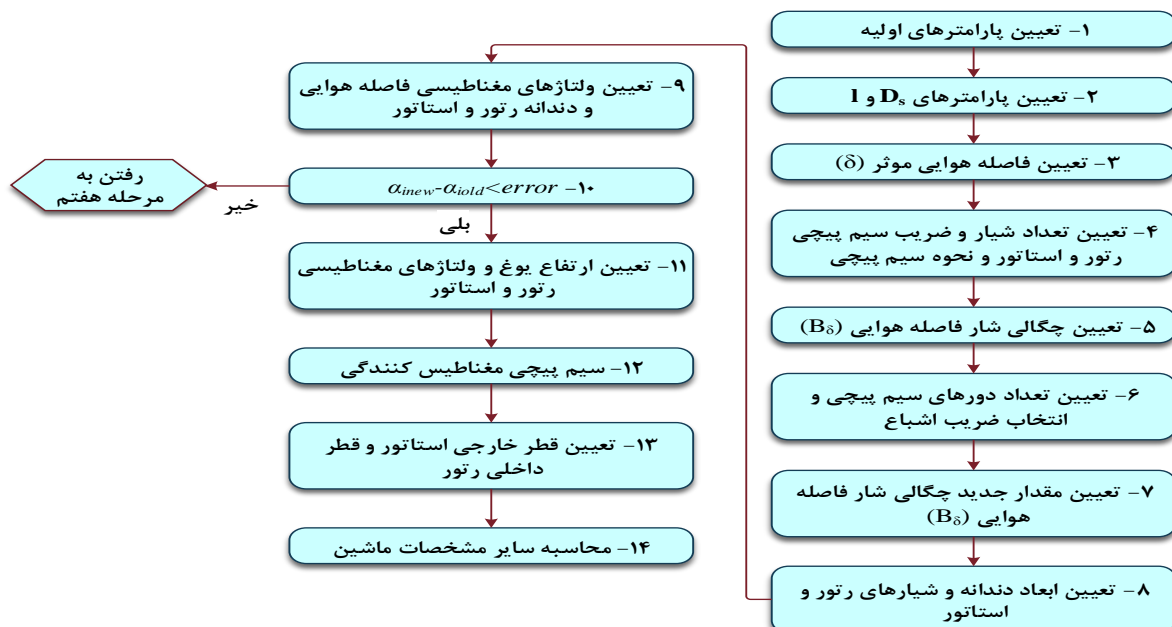
$$k_{sat} = \frac{U_{m\delta s} + U_{m\delta r}}{U_{m\delta}} \quad (32)$$

$$\alpha_i = \frac{1.24k_{sat} + 1}{1.42k_{sat} + 1.57} \quad (33)$$

اگر ضریب اشباع جدید به ضریب اشباع در نظر گرفته شده نزدیک بود، محاسبات به اتمام می‌رسد، در غیر این صورت محاسبات از سر گرفته می‌شود تا اختلاف بین ضرایب اشباع از مقدار خطای در نظر گرفته شده کمتر شود.

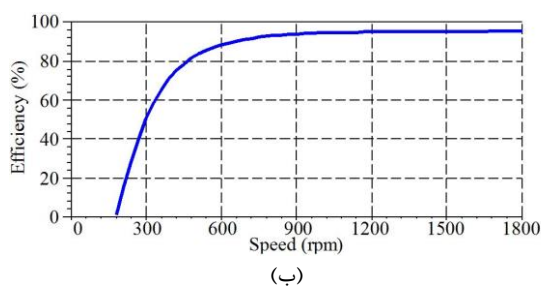
۲-۶. تعیین ارتفاع یوغ رتور و استاتور

ارتفاع یوغ رتور و استاتور ($h_{ys,r}$) و همچنین ولتاژهای مغناطیسی را می‌توان به صورت زیر محاسبه نمود [۱۵]:



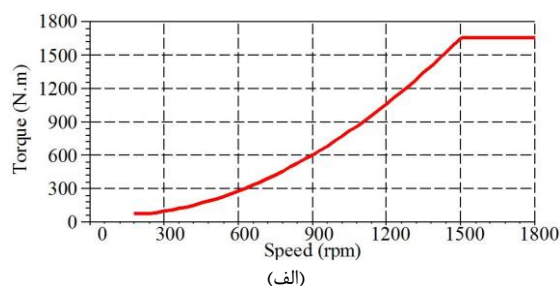
شکل (۳): فرآیند طراحی یک DFIG

گشتاور در حالت دائمی تقریباً $1/6$ کیلونیوتن متر می‌باشد. دلیل منفی بودن آن عملکرد ژنراتوری ماشین می‌باشد. شکل (۵-ب) شکل موج جریان‌های ورودی رتور می‌باشد. در نهایت شکل (۵-ج) شکل موج ولتاژهای القا شده در سیم‌پیچی‌های استاتور را نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، این ولتاژها کاملاً سینوسی و متقارن بوده و دارای دامنه و فرکانس مناسب می‌باشند.



در شکل (۵) تعدادی از نمودارهای خروجی ماشین طراحی شده ارائه شده است. شکل (۵-الف) نمودار تغییرات گشتاور بر حسب تغییرات سرعت و شکل (۵-ب) نمودار تغییرات راندمان بر حسب تغییرات سرعت را نشان می‌دهند.

در شکل (۶) نیز تعدادی دیگر از شکل موج‌های مربوط به DFIG طراحی شده نمایش داده شده است. تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی در شکل (۵-ا) نمایش داده شده است. مقدار

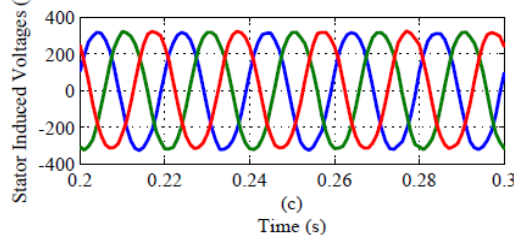
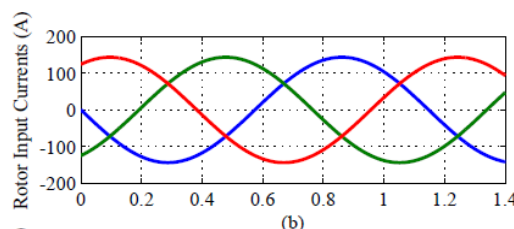
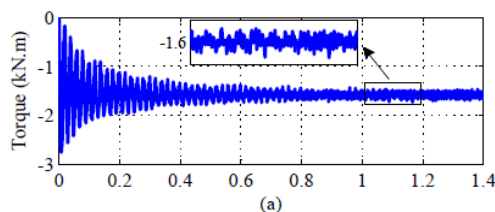


شکل (۵): نمایش شکل‌های خروجی DFIG طراحی شده (الف) نمودار تغییرات گشتاور الکترومغناطیسی بر حسب تغییرات سرعت (ب) نمودار تغییرات راندمان بر حسب تغییرات سرعت

فرضیات در نظر گرفته شده برای DFIG، (چگالی‌های جریان رتور و استاتور، چگالی‌های شار رتور و استاتور در فاصله هوایی، یوغ، دندانه و غیره) ابعاد هندسی به وسیله معادلات استخراج و سپس یک مدل دو بعدی در نرم‌افزار Maxwell ساخته شد. نتایج به دست آمده صحت و کارآمدی روش طراحی انجام گرفته را نشان می‌دهد.

۵. مراجع

- [1] Global Wind Energy Council: "Global wind energy outlook 2018" November 2018.
- [2] A. Izanlo, S. A. Gholamian, M. V. Kazemi, "Comparative Study Between Two Sensorless Methods for Direct Power Control of Doubly fed Induction Generator," *Revue Roumaine des Sciences Techniques-Electrotechnique Et Energ.*, Vol. 62, No. 4, pp. 358-363, 2017.
- [3] A. Izanlo, S. A. Gholamian, M. V. Kazemi, "Using of Four Switch Three Phase Converter in the Structure DPC of DFIG Under Unbalanced Grid Voltage Condition," *Electrical Engineering Journal*, Vol. 100, No. 3, pp. 1925-1938, 2018.
- [4] H. Polinder, F. Pijl, G. Vilder, and P. Tavner, "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for Wind Turbines," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 3, pp. 725-733, 2006.
- [5] D. H. Cho, H. K. Jung, C. G. Lee, "Induction Motor Design for Electric Vehicle Using a Niching Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 37, No. 4, pp. 994-999, 2001.
- [6] Y. Duan, R. G. Harley, "A Novel Method for Multiobjective Design and Optimization of Three Phase Induction Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 47, No. 4, pp. 1707-1715, 2011.
- [7] D. Zhang, C. S. Park, C. S. Koh, "A New Optimal Design Method of Rotor Slot of Three Phase Squirrel Cage Induction Motor for Nema Class D Speed-Torque

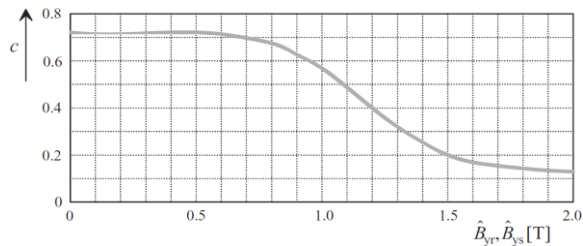


شکل (۶): نمایش شکل‌های خروجی DFIG طراحی شده (الف) گشتاور الکترومغناطیسی (ب) جریان‌های ورودی رتور و (پ) ولتاژهای القا شده استاتور

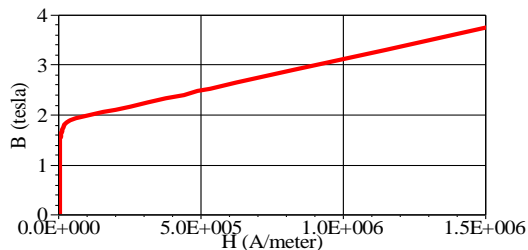
۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله فرآیند طراحی یک DFIG و اعتبارسنجی آن ارائه شد. اعتبارسنجی به وسیله یک نرم‌افزار اجزای محدود که در اینجا Ansys Maxwell بود، انجام شد. در ابتدا با استفاده از مقادیر و

ضمیمه الف



شکل (الف-۱): اثر حداکثر چگالی شار یوغ رتور و استاتور در تعیین ضریب c ، که برای تعیین ولتاژ مغناطیسی به کار گرفته می‌شود [۱۵]



شکل (الف-۲): منحنی BH ورق مورد استفاده در ساختار هسته استاتور و رتور (M19-24G) [۹]

Characteristic Using Multi-Objective Optimization Algorithm,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 48, No. 2, pp. 879-882, 2012.

- [8] J. Barta, N. Uzhegov, P. Losak, C. Ondrusek, M. Mach, J. Pyrhonen, “Squirrel Cage Rotor Design and Manufacturing for High Speed Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 66, No. 9, pp. 6768-6778, 2019.
- [9] I. Boldea, “Variable Speed Generators,” Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2006.
- [10] H. Dehnavifard, A. D. Lilla, M. A. Khan, P. Barendse, “Design and Optimization of DFIGs With Alternate Voltage and Speed Ratings for Wind Applications,” Electrical Machines Conference (ICEM), Chicago, IL, USA, pp. 2008-2013, 2014.
- [11] H. Dehnavifard, M. A. Khan, P. S. Barendse, “Development of a 5kW Scaled Prototype of a 2.5MW Doubly fed Induction Generator,” IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 52, No. 6, pp. 4688-4698, 2016.
- [12] O. I. Olubamiwa, N. Gule, “The Optimal Design and Autonomous Testing of a Rotor-Tied DFIG,” IEEE AFRICON, South Africa, 2017.
- [13] V. D. Colli, F. Marignetti, C. Ataianese, “Analytical and Multiphysics Approach to the Optimal Design of a 10-MW DFIG for Direct-Drive Wind Turbines,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 7, pp. 2791-2799, 2012.
- [14] I. Boldea, S. Nasar, “The Induction Machines Design Handbook,” Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2010.
- [15] J. Pyrhonen, T. Jokinen, V. Hrabovcova “Design of Rotating Electrical Machines,” Wiley, Second Edition, 2014.
- [16] R. Rouhani, S. Ehsan Abdollahi, S. Asghar Gholamian, “Presentation of a Generalized Method for Rotor Design of Synchronous Reluctance Machine,” Journal of Applied Electromagnetics, Vol. 7, No. 1, pp. 39-51, 2019. (in Persian)

Optimal Design of a 250 Kw Doubly Fed Induction Generator

A. Izanlo¹, S. E. Abdollahi^{*2}, S. A. Gholamian³

Electrical Engineer, babol Noshirvani University of Technology

(Received: 05/11/2019; Accepted: 18 /01/2020)

Abstract

Doubly Fed Induction Generator (DFIG) is one of the important generators that is used in the wind turbine structures. In the past few years, DFIG-based wind turbine systems that have been installed in the onshore and offshore wind farms are greater in number, than any other generator. Since the number of references that present the DFIG designing field are limited and equations and the design process are incompletely reviewed, in this paper the complete design process of a 250kW DFIG is presented. First, the optimal design equations of DFIGs are reviewed and then a model for the study of generator operation is presented. The detailed design of the DFIG is done next, and finally the Finite Element Analysis (FEA) is used to verify the design. The results show the effectiveness of the presented design process for the DFIG.

Keywords: DFIG, FEA, Generator Design, Wind Turbine, Wind Energy

* Corresponding author E-mail: e.abdollahi@nit.ac.ir