

# انتخاب تعداد قطب‌های سیم‌پیچ توان و کنترل ماشین القایی دو تحریکه بدون جاروبک برای کاربرد ژنراتور بادی با سرعت سنکرون ۵۰۰ دور بر دقیقه

حامد گرگین پور<sup>۱</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی - دانشگاه خلیج فارس - بوشهر - ایران - h\_gorgin@pgu.ac.ir

**چکیده:** تاکنون ساختارهای گوناگونی در توربین‌های بادی ارائه شده و به کار گرفته شده‌اند که ساختار مبتنی بر ژنراتور القایی دو تحریکه به دلیل مزایای فنی و اقتصادی مقبولیت بیش‌تری داشته است. در میان ساختارهای دیگر، ساختار مبتنی بر ژنراتور القایی دو تحریکه بدون جاروبک ویژگی‌های جالبی برای به کارگیری در توربین‌های بادی داراست که از جمله آنها می‌توان به عملکرد بدون جاروبک، ساختار مستحکم با قابلیت اطمینان بالاتر و هزینه تعمیرات و نگهداری کم‌تر، نیاز به تبدیلی با ظرفیت کاهش یافته و جبهه‌دنده‌ای با نسبت تبدیل کم‌تر و در نتیجه هزینه و وزن پایین‌تر و مواردی همانند قابلیت بالاتر در گذار از ولتاژ کم اشاره نمود. این ماشین دو سیم‌پیچ بر روی استاتور با نام سیم‌پیچ توان و کنترل و یک سیم‌پیچ قفسی با آرایش ویژه بر روی روتور با نام سیم‌پیچ حلقه آشیانه‌ای دارد. از مواردی که در طراحی ماشین بسیار حائز اهمیت است، انتخاب ترکیب تعداد قطب‌ها برای دو سیم‌پیچ استاتور جهت داشتن بهترین ویژگی‌های عملکردی است. نتایج بررسی‌های این مقاله با استفاده از مدار معادل الکتریکی و روش تابع توزیع سیم‌پیچی و همچنین مدل المان محدود دویعدی، نشان می‌دهد که ترکیب ۲ و ۴ جفت قطب به ترتیب برای سیم‌پیچ توان و کنترل، بهترین عملکرد را در سرعت‌های چرخش میانی حدود ۵۰۰ دور بر دقیقه نتیجه خواهد داد.

**واژه‌های کلیدی:** ژنراتور القایی دو تحریکه بدون جاروبک، روتور حلقه آشیانه‌ای، سیم‌پیچ توان، سیم‌پیچ کنترل

## Selection of Power and Control Windings Pole numbers of Brushless Doubly-Fed Induction Machine in Wind Generator Application with 500rpm Synchronous Speed

H. Gorginpour<sup>1</sup>, Assistant Professor

1- Engineering Department, Persian Gulf University, Bushehr, Iran, Email: [h\\_gorgin@pgu.ac.ir](mailto:h_gorgin@pgu.ac.ir)

**Abstract:** Up to now, several configurations have been proposed and implemented in wind turbine. The structure based on Doubly-Fed induction Generator (DFIG) is used widely because of its technical and economic benefits. Among other structures, Brushless Doubly-Fed Induction Generator (BDFIG) has interesting properties to be used as wind generator such as brushless operation, robust structure with higher reliability and lower operating and maintenance costs, needing partially rated converter and a gear box with lower speed ratio and also, better low voltage ride through capability. There are two 3-phase windings on stator namely power winding (PW) and control winding (CW) and one special cage winding on the rotor which is called nested loop winding. An important design issue is selection of PW and CW pole pair numbers in order to achieve good performance characteristics. In this paper, the analysis carried out using electric equivalent circuit model and 2D finite element model reveals that the 2 and 4 pole pairs combination for PW and CW respectively, results in the best performance for medium speed rotational speeds around 500rpm.

**Keywords:** Brushless doubly-fed induction generator, nested loop rotor, power winding, control winding.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۳

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۱/۲۳

نام نویسنده مسئول: حامد گرگین پور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - بوشهر - خیابان شهید ماهینی - دانشگاه خلیج فارس - دانشکده مهندسی

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مسائل زیست‌محیطی، سیاسی و اقتصادی سبب روی آوردن کشورهای جهان به سمت استفاده روزافزون از منابع انرژی‌های نو در تأمین انرژی مورد نیاز خود شده است. در این میان سهم انرژی باد به دلیل منابع در دسترس بیشتر و توسعه‌یافتگی سیستم‌های تبدیل انرژی، از سایر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر بیشتر بوده است. توربین‌های بادی هم می‌توانند در سرعت ثابت (تغییرات سرعت در حد ۱٪) و هم در سرعت متغیر کار کنند. در توربین‌های بادی سرعت ثابت، ژنراتور مستقیماً به شبکه وصل شده است، از اینرو سرعت تقریباً توسط فرکانس شبکه ثابت شده و غیرقابل کنترل است و همچنین ممکن نیست انرژی باد به شکل انرژی چرخشی ذخیره شود. بنابراین برای یک سیستم سرعت ثابت، اغتشاش در سرعت باد، تغییرات توان را نتیجه می‌دهد و بر روی کیفیت توان شبکه اثر می‌گذارد. برای یک توربین بادی سرعت متغیر، ژنراتور توسط تجهیزات الکترونیک قدرت کنترل می‌شود که کنترل دامنه و فرکانس ولتاژ خروجی را امکان‌پذیر می‌سازند. به این طریق نوسانات توان ناشی از تغییرات سرعت باد می‌تواند کم و بیش با تغییر سرعت روتور جبران شده و بنابراین تغییرات توان ناشی از تغییرات سرعت باد کاهش و کیفیت توان تولیدی در مقایسه با توربین سرعت ثابت بهبود یابد [۱].

سرعت چرخش یک توربین بادی نسبتاً پایین است (چند دوربردقیقه تا چند ده دوربردقیقه)، بنابراین باید با فرکانس شبکه تنظیم شود. این کار به دو روش انجام می‌گیرد: توسط جعبه‌دنده و یا با تعداد جفت قطب‌های ژنراتور. تعداد جفت قطب‌ها به گونه‌ای انتخاب می‌شود که سرعت مکانیکی ژنراتور با فرکانس شبکه هماهنگ شده و همچنین جعبه‌دنده سرعت روتور را با سرعت مکانیکی ژنراتور تنظیم می‌کند [۱].

تاکون ژنراتورهای گوناگونی برای کاربرد در توربین‌های بادی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند [۲] که اغلب به دلیل استفاده از عناصر کمیاب و همچنین پیچیدگی ساختار و هزینه بالای ساخت، ظرفیت بالای مبدل الکترونیک قدرت و پیچیدگی سیستم کنترل‌کننده و پایدار ساز، قادر به رقابت با ساختارهای موجود مبتنی بر ژنراتور القایی دوتحریکه<sup>۱</sup> نیستند. در حال حاضر بیش از ۷۰ درصد ظرفیت نصب‌شده توربین‌های بادی در جهان از ژنراتور القایی دوتحریکه<sup>۱</sup> استفاده می‌کنند [۳]. اما ژنراتور القایی دوتحریکه بدون جاروبک<sup>۲</sup> پتانسیل‌های خوبی را برای رقابت و تبدیل شدن به نسل بعدی ژنراتورهای بادی از خود نشان می‌دهد. مزایای BDFIG نسبت به DFIG نشان‌دهنده جاروبک و در نتیجه دارا بودن ساختار مستحکم و نیاز کم‌تر به تعمیرات و نگهداری و داشتن جعبه‌دنده‌ای با ابعاد و نسبت تبدیل کم‌تر برای انطباق سرعت چرخش توربین با سرعت ژنراتور برای تولید توان الکتریکی و همچنین مزایای دیگری همانند قابلیت گذار از ولتاژ کم<sup>۳</sup> بالاتر است [۴-۷]. لازم به ذکر است که حدود ۱۰٪ خطاهای یک توربین بادی مبتنی بر ژنراتور القایی دوتحریکه به ژنراتور آن برمی‌گردد و حدود ۳۰٪ از خطاهای ژنراتور نیز

ناشی از جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان آن است. البته مشکلات مربوط به این بخش‌ها تابعی از شرایط آب و هوایی بوده و به‌خصوص در نصب‌هایی که درون دریا صورت می‌گیرد، مشکلات ایجاد شده و هزینه‌های مربوطه نیز، بیش‌تر خواهد بود [۸]. همچنین به‌طور مثال درصد قیمتی و درصد وزنی اجزای تشکیل‌دهنده یک توربین بادی در جدول ۱ آمده است. گران‌قیمت‌ترین و سنگین‌ترین قطعه موجود در ناسل، جعبه‌دنده است. طرح‌های موجود و صنعتی DFIG برای داشتن کارایی مناسب، اغلب ۴ قطب یا ۶ قطب هستند بنابراین نیاز به جعبه‌دنده‌های ۳ مرحله‌ای حجیم و گران‌قیمت دارند. مشخصات یک جعبه‌دنده ۳ مرحله‌ای در جدول ۲ ذکر شده است. طرح‌های موجود BDFIG تاکنون همگی دارای سرعت‌های عملکرد در محدوده ۵۰۰ دوربردقیقه تا ۶۰۰ دوربردقیقه بوده‌اند که برای کاربرد در یک توربین بادی، نیازمند یک جعبه‌دنده ۲ مرحله‌ای می‌باشند. بر این اساس هرچند یک جعبه‌دنده ۲ مرحله‌ای تفاوت چشم‌گیری در وزن نسبت به یک جعبه‌دنده ۳ مرحله‌ای ندارد اما هزینه آن به اندازه قابل‌ملاحظه‌ای کم‌تر است.

بخش قابل توجهی از معایب BDFIG در این مقایسه به طراحی آن برمی‌گردد مانند ابعاد بزرگ‌تر، بازده کم‌تر و هزینه ساخت بیشتر، و بخشی دیگر مربوط به پیچیده‌تر بودن سیستم کنترل و بهره‌برداری آن می‌باشد [۹]. این نکته لزوم مطالعه و تحقیق بیشتر بر روی بهینه‌سازی ساختار BDFIG را جهت ارتقاء موقعیت آن در برابر سایر گزینه‌های موجود نشان می‌دهد.

از الزامات پیش از ورود به طراحی ژنراتور، مشخص کردن مواردی مانند ولتاژهای نامی، فرکانس، توان و تعداد قطب‌های دو سیم‌پیچ توان و کنترل استاتور است. در [۵] طراحی بهینه BDFIG با استفاده از مدل‌های الکترومغناطیسی و حرارتی و با در نظر گرفتن محدودیت‌های مغناطیسی، حرارتی، مکانیکی و ساختی ارائه شده است. یکی از مزایای مهم این ژنراتور داشتن سرعت سنکرون کم و در نتیجه نیاز به یک جعبه‌دنده با نسبت تبدیل کم است و سرعت سنکرون نیز بستگی به تعداد قطب‌های دو سیم‌پیچ استاتور دارد. ترکیب تعداد قطب‌ها بر روی ابعاد و ویژگی‌های عملکردی و ظرفیت مبدل الکترونیک قدرت تغذیه‌کننده سیم‌پیچ کنترل تأثیر مستقیم دارد.

در این تحقیق، هدف مطالعه و بررسی تأثیرات انتخاب ترکیب جفت قطب‌های مختلف است. این مسئله در واقع یک تحلیل حساسیت<sup>۴</sup> خواهد بود. در این تحلیل حساسیت بایستی همه متغیرهای دیگر ثابت نگه داشته شده و تنها تعداد قطب‌های دو سیم‌پیچ استاتور تغییر داده شود. اما با تغییر تعداد قطب‌های یک سیم‌پیچ، مواردی مانند جابجایی کلاف‌ها در شیار بایستی مدنظر قرار گیرد. علاوه بر آن با توجه این که تعداد آشیانه‌های روتور نیز برابر حاصل جمع تعداد جفت قطب‌ها است و عملکرد ژنراتور بسیار وابسته به ساختار روتور می‌باشد، پس این نکات نیز باید در مطالعه لحاظ شود.

در این مقاله ابتدا به معرفی ساختار ماشین و نحوه کارکرد آن پرداخته شده و سپس بر روی انتخاب ترکیب بهینه تعداد جفت

حالت عملکرد کلی بهتر است و همچنین سیم‌پیچ‌ها می‌توانند برحسب نیاز کاربردی دارای ظرفیت‌های متفاوتی باشند [۱۱].

روتور دارای ساختاری است که ساختار تک‌لایه و چندمداره نامیده می‌شود و یک آرایش قفسی ویژه است. این روتور شامل تعدادی قطب یا آشیانه<sup>۵</sup> است که هر یک شامل تعدادی حلقه اتصال کوتاه‌شده توسط یک رینگ انتهایی می‌باشد. ساختار باز شده روتور که در آن هر آشیانه شامل ۳ حلقه با نام Inner loop، Middle loop و Outer loop می‌باشد، در شکل ۲ نشان داده شده است. تعداد آشیانه‌های روتور باید برابر حاصل جمع جفت قطب‌های دو سیم‌پیچ استاتور باشد [۵] و [۱۲]. عملکرد BDFIM بر پایه ارتباط دو سیم‌پیچ استاتور از طریق عمل واسطه‌ای این روتور قفسی ویژه، قرار دارد [۱۳].

توزیع مکانی میدان فاصله هوایی در حالت عملکرد سنکرون که از نتایج شبیه‌سازی FE به دست آمده ماشین D180 دانشگاه کمبریج در شکل ۳-الف نشان داده شده است. مشخصات ژنراتور دانشگاه کمبریج در پیوست ارائه شده است. مؤلفه‌های  $P_c$  و  $P_p$  جفت قطب این میدان به‌همراه حاصل جمع آن‌ها نیز در شکل رسم شده است. توزیع هارمونیک‌های مکانی میدان فاصله هوایی به‌همراه عوامل ایجادکننده هریک از این مؤلفه‌ها نیز در شکل ۳-ب ارائه شده است. لازم به‌ذکر است که دامنه هارمونیک‌های غیرمطلوب با اشباع مغناطیسی دندانه‌های روتور افزایش یافته و اشباع مغناطیسی سبب ایجاد مؤلفه‌های هارمونیک  $nP_r \pm 3P_p$  و  $nP_r \pm 3P_c$  می‌گردد [۱۰].

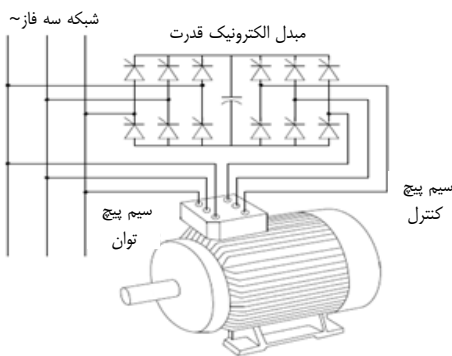
قطب‌های سیم‌پیچ توان و کنترل برای داشتن ویژگی‌های مناسب در سرعت‌های چرخش میانی حدود ۵۰۰ دوربردقیقه بحث می‌شود.

جدول ۱: درصد قیمتی و درصد وزنی اجزای تشکیل‌دهنده یک توربین بادی ۱/۵ مگاوات

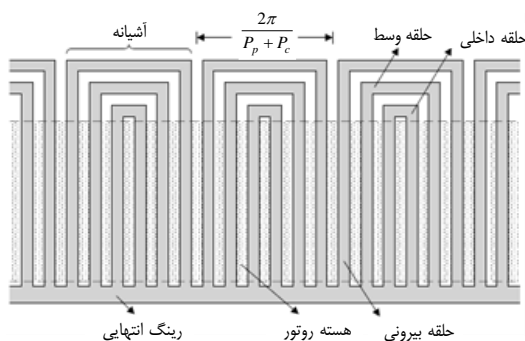
نام قطعه	درصد	درصد وزنی
ناسل	۵/۱٪	۱۰۰٪ ( $60.7 \times 10^3 \text{kg}$ )
محور اصلی	۳/۰۷٪	
یاطاقان اصلی	۲/۵۴٪	
جعبه دنده و سیستم خنک‌کننده (نسبت تبدیل ۱:۹۴)	۱۸/۴۶٪	۲۸/۳۴٪
سیستم Yaw	۶/۶۸٪	
سیستم Pitch	۹/۲۳٪	
سیستم ترمز	۱/۲۲٪	
سیستم هیدرولیک	۰/۷٪	
هاب	۲/۰۷٪	
پره‌ها (۳۷/۵ متر)	۱۸/۰۱٪	
ژنراتور (۱۵۰۰ کیلووات، ۶۹۰ ولت، کلاس عایقی H)	۸/۰۸٪	۱۱/۸۶٪
مبدل (۴۸۰ کیلوولت آمپر، ۷۷۰ ولت، هوا)	۹/۲۴٪	
سایر اجزاء	۱۵/۵۶٪	

جدول ۲: مشخصات یک جعبه‌دنده ۳ مرحله‌ای

مرحله ۱	مرحله ۲	مرحله ۳	
۸	۴	۳	نسبت تبدیل سرعت
۱۰۰٪	۱۲/۵٪	۳/۱٪	درصد گشتاور
۸۶/۵٪	۱۰/۸٪	۲/۷٪	درصد وزن



شکل ۱: سیستم ماشین القایی دوتحریکه بدون جاروبک و نحوه تغذیه سیم‌پیچ‌های آن [۱۳]



شکل ۲: ساختار باز شده یک روتور حلقه آشیانه‌ای با سه حلقه در هر آشیانه [۱۳]

## ۲- ماشین القایی دوتحریکه بدون جاروبک

ماشین القایی دوتحریکه بدون جاروبک دارای دو سیم‌پیچی سه‌فاز توزیع شده بر روی استاتور است که به‌لحاظ فیزیکی مجزا هستند [۱۰]. یکی از سیم‌پیچ‌ها که مستقیماً به شبکه وصل می‌شود، سیم پیچ توان و سیم‌پیچ دیگر که از طریق یک مبدل الکترونیک قدرت تغذیه می‌شود، سیم‌پیچ کنترل نامیده می‌شوند. سیستم BDFIM در شکل ۱ نشان داده شده است. هر دو سیم‌پیچ استاتور در شیارهای یکسانی پیچیده شده‌اند و دارای مدار مغناطیسی مشترکی هستند. برای جلوگیری از ارتباط مغناطیسی مستقیم بین دو سیم‌پیچ استاتور، آن‌ها باید دارای تعداد قطب‌های نابرابر باشند. به‌علاوه این اختلاف باید بیش از یک قطب باشد تا از ایجاد کشش‌های نامتعادل روی روتور جلوگیری شود [۵]. اگرچه آرایش یک سیم‌پیچ روی استاتور به‌گونه‌ای که دو میدان متفاوت تولید کند، امکان‌پذیر است [۱۱]، ولی ترجیح داده می‌شود که دو سیم‌پیچ سه‌فاز مجزا وجود داشته باشد زیرا در این

در سیم‌پیچ توان می‌شود [۱۱]. با تنظیم دامنه ولتاژ سیم‌پیچ کنترل، می‌توان دامنه ولتاژ تولیدی در سیم‌پیچ توان و در نتیجه توان راکتور را تنظیم نمود.

در شبیه‌سازی که نتایج آن در شکل ۴ آورده شده، محور ماشین D180 با سرعت ثابت ۸۰۰ دور بر دقیقه چرخانده شده و سیم‌پیچ کنترل با ولتاژ ۳۰ هرتز تغذیه گردیده است. ولتاژ القاشده در سیم‌پیچ توان برای چند سیکل در حالت ماندگار نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، مؤلفه اصلی ولتاژ القایی دارای فرکانس ۵۰ هرتز است.

### ۳- انتخاب تعداد قطب‌ها

#### ۳-۱- مرور مراجع

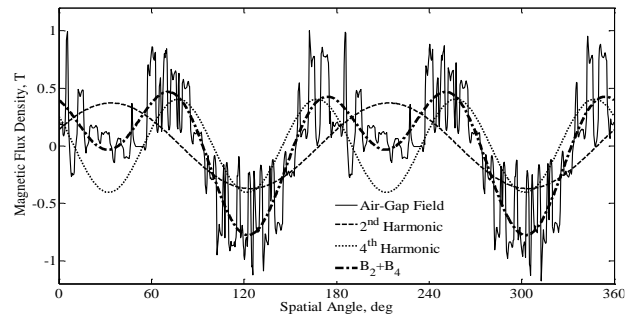
در مرجع [۱۴] به مسئله انتخاب بهینه تعداد قطب ماشین القایی استاندارد پرداخته شده است. به‌ازای داشتن محدودیت‌های ابعادی و عملکردی یکسان در طراحی یک ماشین القایی، با افزایش تعداد قطب از ۲ قطب به ۴ قطب، وزن کاهش یافته و در نتیجه چگالی وزنی توان بیش‌تر می‌شود. همچنین مقدار ضریب توان نیز برای تعداد قطب ۴ می‌تواند مقدار بیش‌تری باشد.

همچنین در [۱۵] با بررسی ویژگی‌های عملکردی و مسائل عملی روند ساخت، تعداد قطب ۴ برای ماشین القایی سرعت متغیر به عنوان تعداد قطب بهینه به‌دست آمده است. در طراحی DFIG نیز همین نکته رعایت شده و ماشین با تعداد قطب کم طراحی می‌شود. سپس برای انطباق سرعت چرخش توربین با سرعت عملکرد ماشین از جعبه‌دنده استفاده شده که به‌دلیل اختلاف زیاد این دو سرعت، معمولاً جعبه‌دنده چندمرحله‌ای و پیچیده بوده و بخش قابل توجهی از هزینه توربین را تشکیل می‌دهد.

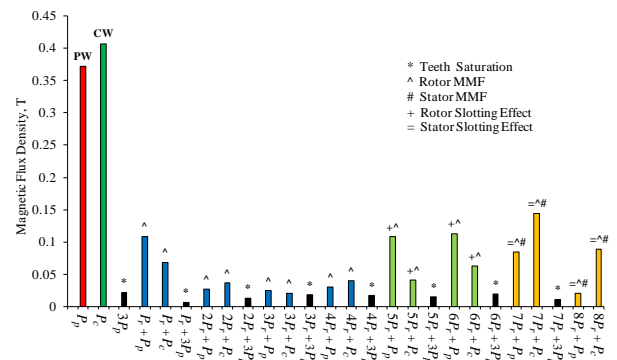
اما BDFIG دارای شرایط کاملاً متفاوتی است زیرا سرعت عملکرد آن متفاوت از سرعت سنکرون هر دو سیم‌پیچ می‌باشد. این ماشین اغلب برای عملکرد در بازه سرعتی  $\pm 30\%$  حول سرعت طبیعی (رابطه (۲)) طراحی می‌شود.

$$n_n = \frac{60 f_{pw}}{P_p + P_c} \quad (2)$$

در این رابطه  $f_{pw}$  فرکانس شبکه متصل به سیم‌پیچ توان است. پس سرعت طبیعی بستگی به تعداد جفت قطب‌های دو سیم‌پیچ استاتور دارد که به‌طور مثال در مورد ماشین D180 دانشگاه کمبریج با آرایش ۲ و ۴ جفت قطب (۲/۴) و فرکانس شبکه ۵۰ هرتز، برابر ۵۰۰ دور بر دقیقه است. سرعت طبیعی نسبت به سرعت طراحی DFIG بسیار کم‌تر است که این به معنای نیاز سیستم به جعبه‌دنده‌ای با نسبت دور کم‌تر و ارزان‌تر می‌باشد. لازم به ذکر است که پره‌های توربین‌های باد معمولاً طولی بین ۲۰ تا ۴۰ متر و سرعت دورانی بین ۱۰ تا ۲۲ دور بر دقیقه دارند که سرعت‌های بسیار پائینی هستند.



الف



ب

شکل ۳: الف- توزیع مکانی میدان فاصله هوایی، ب- هارمونیک‌های مکانی این توزیع در حالت عملکرد سنکرون که از نتایج شبیه‌سازی FE به‌دست آمده ماشین D180 دانشگاه کمبریج

در ادامه نحوه عملکرد ماشین به‌عنوان ژنراتور نیروگاه بادی و این‌که چگونه دامنه و فرکانس ولتاژ تولیدی در ترمینال‌های سیم‌پیچ توان با وجود تغییرات سرعت چرخش، ثابت نگه داشته می‌شود، بررسی شده است. فرض کنید که نیروی باد محور ماشین را با سرعت زاویه‌ای متغیر  $\omega_m$  بچرخاند و ترمینال‌های سیم‌پیچ توان مدار باز باشند. همچنین فرض کنید که ژنراتور به هیچ شبکه‌ای وصل نباشد و تغذیه سیم‌پیچ کنترل توسط باتری و اینورتر صورت می‌گیرد. این سیم‌پیچ نقش سیم‌پیچ میدان ژنراتور سنکرون معمولی را دارد. میدان مغناطیسی چرخان این سیم‌پیچ در روتور ولتاژ و جریان القاء می‌کند.

اگر  $\omega_p$  فرکانس مطلوب (فرکانس شبکه) باشد بایستی ولتاژ القایی ژنراتور نیز دارای این فرکانس باشد. پس باید با تغییر  $\omega_m$ ، فرکانس زاویه‌ای سیم‌پیچ کنترل ( $\omega_c$ ) نیز طبق رابطه (۱) توسط اینورتر تغییر داده شود تا ماشین همچنان به‌صورت یک ماشین سنکرون در سرعت  $\omega_m$  کار کند [۱۱].

$$\omega_c = P_r \omega_m - \omega_p \quad (1)$$

جریان القایی در روتور سبب تولید میدان مغناطیسی با تعداد جفت قطب‌های  $P_c + hP_r$  و  $P_p + hP_r$  می‌گردد. در این روابط  $P_c$  و  $P_p$  به ترتیب تعداد جفت قطب‌های سیم‌پیچ توان و کنترل و  $P_r$  تعداد آشیانه‌های روتور است. همچنین  $h$  شماره هارمونیک مکانی شامل ۰، ۱، ۲، ... است. مؤلفه با  $P_c$  جفت قطب با میدان سیم‌پیچ کنترل کوپل شده و مؤلفه با  $P_p$  جفت قطب سبب القای ولتاژی با فرکانس مطلوب  $\omega_p$

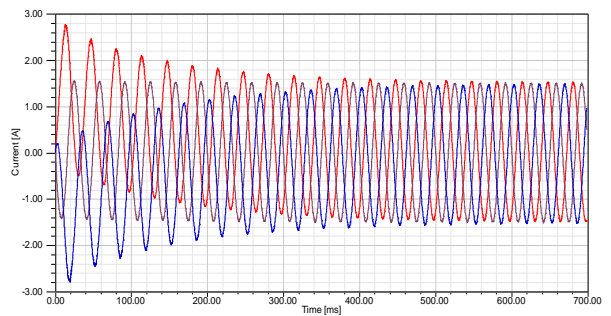
ساخته شده در دانشگاه Durham). البته در صورت برهم خوردن تعادل تغذیه سیم‌پیچ‌ها در اثر وقوع خطا در داخل یا خارج ماشین، آن‌ها مستقیماً به یکدیگر نیرو وارد می‌کنند که می‌تواند بسیار خطرناک باشد. در [۱۷] آرایش‌های ۱/۳ و ۲/۴ از نظر ظرفیت مبدل مورد نیاز و ویژگی‌های عملکرد در یک بازه سرعتی با یکدیگر مقایسه شده‌اند که آرایش ۲/۴ دارای عملکرد بهتری بوده است.

### ۳-۲- مقایسه ماشین ۱/۴ جفت قطب با ماشین ۲/۴ جفت قطب

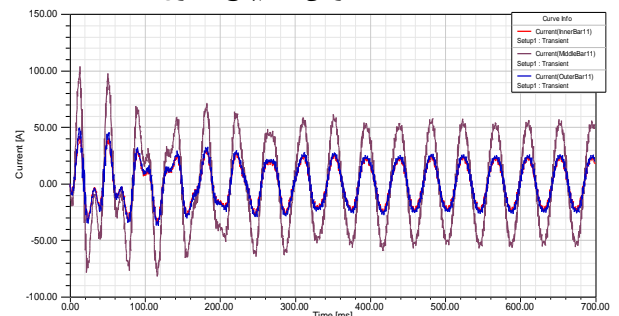
یکی از مسائلی که سبب کاهش سطح عملکرد مؤثر BDFIG نسبت به نوع جاروبک‌دار آن می‌شود، اختصا صاف یافتن فضای شیار استاتور به کلاف‌های دو سیم‌پیچ است. علاوه بر تخصیص یافتن فضای شیار به دو سیم‌پیچ، از آنجاکه این سیم‌پیچ‌ها باید نسبت به یکدیگر و نسبت به هسته عایق‌بندی شوند، ضریب پرشدگی شیار باز هم کاهش بیشتری پیدا می‌کند. در این صورت سیم‌پیچ یا نمی‌تواند به اندازه ماشین القایی با ابعاد مشابه دور داشته باشد و یا برای داشتن تعداد دور برابر بایستی از سیم نازک‌تر با مقاومت بالاتر استفاده نمود. در هر دو صورت توان قابل استحصال از سیم‌پیچ ژنراتور کاهش یافته و چگالی حجمی توان کم می‌شود. امکان افزایش بیش از حد عمق شیار نیز وجود ندارد زیرا علاوه بر افزایش شار نشتی سیم‌پیچ، برای جلوگیری از افزایش بیش از حد چگالی شار یوغ، قطر خارجی و در نتیجه ابعاد ماشین بایستی افزایش پیدا کند. بنابراین به‌دلیل اینکه در طراحی حالتی بینابین انتخاب می‌شود، معمولاً اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی سیم‌پیچ‌های BDFIG کوچک‌تر از ماشین القایی با ابعاد مشابه بوده و به همین علت درصد جریان مغناطیس‌کنندگی به جریان نامی سیم‌پیچ بزرگ‌تر از مقدار ۳۰٪-۲۵٪ معمول در ماشین‌های القایی می‌شود. به‌طور مثال در مورد ماشین D180 این مقدار برابر ۸۵٪ است.

یک روش برای نیل به این هدف، استفاده از سیم‌پیچی تک‌لایه به‌جای سیم‌پیچی دو لایه است زیرا در صورت دو لایه بودن سیم‌پیچ، کلاف‌های فازهای مختلف یک سیم‌پیچ نیز بایستی نسبت به یکدیگر عایق شوند. اما این تغییر سبب افزایش اغتشاش هارمونیک مکانی در فاصله هوایی می‌شود. اغتشاش هارمونیک نیرومحرکه تولیدی یک سیم‌پیچ ۴ قطب در دو حالت گام کامل و گام کسری به‌اندازه ۰/۸ گام قطبی، به‌ازای مقادیر مختلف تعداد شیار در هر قطب و در هر فاز در شکل ۵ رسم شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، بیش‌ترین کاهش به‌ازای ۲ شیار در هر قطب و در هر فاز اتفاق می‌افتد. بنابراین می‌توان در حالت ژنراتوری که سرعت عملکرد نسبت به سرعت چرخش مؤلفه‌هایی که در اثر گام کامل بودن ایجاد می‌شوند، فاصله زیادی دارد، سیم‌پیچ‌ها را تک‌لایه طراحی نمود. راه‌حل دیگر برای افزایش ضریب پرشدگی شیار، استفاده از سیم‌پیچ‌های با تعداد قطب کم‌تر است.

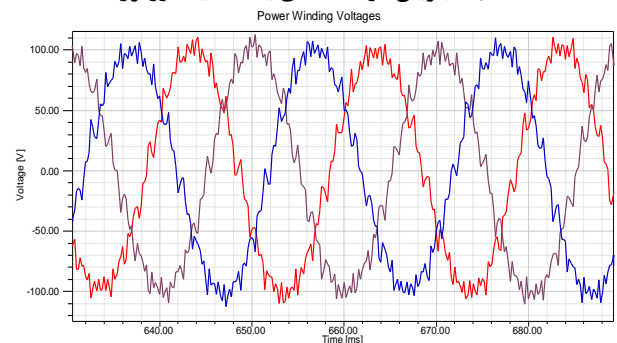
با کاهش تعداد قطب‌ها به‌دلیل افزایش تعداد شیار به‌ازای هر قطب، می‌توان تعداد دور کلاف‌ها را کاهش داد. بر این اساس با توجه به محدوده سرعت موردنظر، می‌توان تعداد جفت‌قطب‌های سیم‌پیچ توان



الف- جریان سیم‌پیچ کنترل



ب- جریان در حلقه‌های یک آشیانه روتور



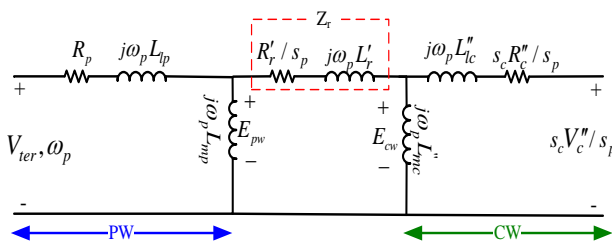
ج- ولتاژ القا شده در سیم‌پیچی توان در شرایط مدار باز

شکل ۴: نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود ماشین D180 در حالت ژنراتوری (محور ماشین با سرعت ثابت ۸۰۰ دور بر دقیقه چرخانده شده و سیم‌پیچ کنترل با ولتاژ ۳۰ هرتز تغذیه می‌شود)

بنابراین در BDFIG با انتخاب محدوده سرعت و سرعت طبیعی، مجموع تعداد جفت‌قطب‌های دو سیم‌پیچ به‌دست می‌آید. در [۱۶] قواعد کلی برای انتخاب تعداد قطب‌ها ارائه شده است که بر مبنای عدم ایجاد هارمونیک‌های مکانی با تعداد قطب یک سان در میدان تولیدی دو سیم‌پیچ و در نتیجه صفر شدن اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌ها است. بر این اساس باید یا تعداد جفت قطب‌های یک سیم‌پیچ زوج و دیگری فرد باشد یا هر دو دارای تعداد زوج جفت قطب باشند به شرط آنکه نسبت آن دو عددی فرد نباشد. همچنین تنها در صورتیکه نسبت دو جفت قطب مضربی از ۳ باشد، هر دو سیم‌پیچ می‌توانند تعداد جفت قطب‌های فرد داشته باشند زیرا در حالت تغذیه متعادل، هارمونیک‌های مضرب ۳ حذف شده و با وجودی که فازهای دو سیم‌پیچ اندوکتانس متقابل دارند اما میدان‌های دو سیم‌پیچ مؤلفه هم قطب ندارند. بنابراین آرایش ۱ و ۳ جفت قطب (۱/۳) نیز می‌تواند وجود داشته باشد (ماشین

پس با تغییر تعداد قطب‌های سیم‌پیچ توان به ۱ جفت قطب، همان‌طور که مشاهده می‌شود برای داشتن عملکرد مطلوب بایستی تعداد دورهای سیم‌پیچی هر دو سیم‌پیچ توان و کنترل کاهش یابد. این کار امکان استفاده از سیم‌های با سطح مقطع بالاتر را به‌زای ثابت ماندن ضریب پرشدگی شیار فراهم می‌کند.

با کاهش تعداد دورهای سیم‌پیچ توان، به‌دلیل افزایش اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی، جریان بی‌باری افزایش پیدا نمی‌کند اما این مسئله در مورد سیم‌پیچ کنترل برقرار نبوده و با کاهش اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی، جریان کشیده‌شده از مبدل در تمامی شرایط کاری بیش‌تر می‌شود (شکل ۷).



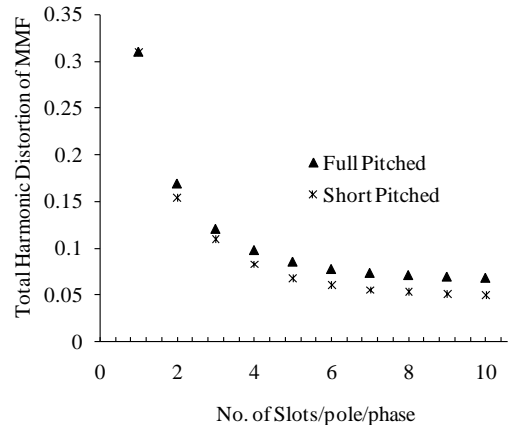
شکل ۶: مدار معادل BDFIG

با داشتن پارامترهای مدار معادل، تحقیق جنبه‌های عملکردی ماشین به‌راحتی امکان‌پذیر است. در ادامه تأثیر تغییرات تعداد قطب بر میزان توانایی روتور حلقه آشیانه‌ای در ایجاد تزویج متقابل با انجام شبیه‌سازی اجزای محدود بررسی شده است. سیم‌پیچ کنترل با ولتاژ ۷۰/۷ ولت مؤثر و ۵۰ هرتز در هر فاز تغذیه شده و سرعت چرخش در سرعت سنکرون تثبیت شده است. نتایج شبیه‌سازی در جدول ۴ آورده شده است.

با تغییرات تعداد قطب‌ها و ابعاد و اندازه‌های هندسی ماشین، پارامترهای مدار معادل دچار تغییر شده و در نتیجه ظرفیت مبدل نیز تغییر می‌کند. این ظرفیت با استفاده از روابط ساده مداری در مدار معادل شکل ۶ قابل محاسبه است. برای انجام این محاسبه سیم‌پیچ توان به بار نامی متصل شده و ولتاژ بار برابر ولتاژ نامی فرض می‌شود. سپس ولتاژ و جریان و در نتیجه ظرفیت در ترمینال سیم‌پیچ کنترل محاسبه می‌گردد. اگر در این محاسبات سرعت چرخش مکانیکی برابر ۷۰٪ سرعت طبیعی در نظر گرفته شود، ظرفیت حداکثر مبدل به دست می‌آید.

برای محاسبه تلفات هسته از نتایج ارائه‌شده در [۱۰] بر مبنای روش Steimetz اصلاح شده استفاده گردیده است. با توجه به سطح بالاتر اشباع و مقادیر بیستر چگالی شار در قسمت‌های مختلف هسته ماشین ۱/۴ جفت قطب به ویژه در یوغ‌های استاتور و روتور و همچنین سطح بالاتر هارمونیک‌های مکانی روتور در این ماشین، تلفات هسته مقدار بیش‌تری نسبت به ماشین ۲/۴ جفت قطب دارد. همچنین مقدار توان خروجی نیز کاهش یافته است. بنابراین توانایی روتور با ۵ آشیانه در ایجاد تزویج متقابل بین میدان‌های استاتور نسبت به روتور با ۶ آشیانه کمتر است. در حالت کلی نتایج مطالعات نشان می‌دهد که هر

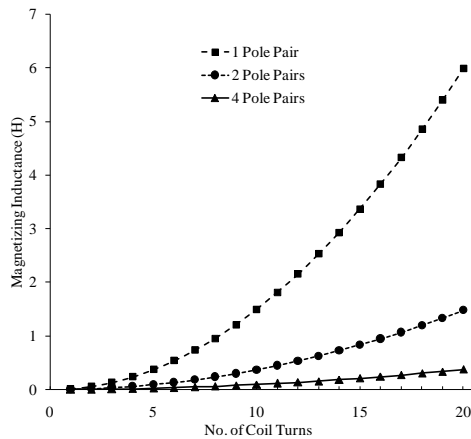
را از ۲ به ۱ کاهش داده و همزمان تعداد دورهای آن را نیز کم‌تر نمود زیرا در یک سیم‌پیچ سه‌فاز هرچه تعداد قطب‌های سیم‌پیچی کم‌تر باشد، به‌زای تعداد دور ثابت در هر کلاف، اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی آن بیش‌تر است. اما بایستی تأثیر این تغییر از جهات دیگر نیز بررسی گردد.



شکل ۵: اغتشاش هارمونیک نیروی محرکه تولیدی یک سیم‌پیچ ۴ قطب در دو حالت گام کامل و گام کسری به‌اندازه ۰/۸ گام قطبی

برای محاسبه مشخصه‌های عملکردی ماشین از مدار معادل الکتریکی استفاده شده است (شکل ۶). پارامترهای مدار معادل برای طراحی پایه ماشین D180 که دارای ترکیب ۲/۴ است و چند طرح با ترکیب ۱/۴ جفت قطب در جدول ۳ آورده شده است. این پارامترها با استفاده از روش تابع توزیع سیم‌پیچی از روی اطلاعات ابعاد و اندازه هندسی ساختار و مشخصات الکتریکی و مغناطیسی محاسبه می‌شود. روند محاسبه به‌صورت یک کد در نرم‌افزار MATLAB نوشته شده است. لازم به‌ذکر است که در یک ماشین القایی ساده ابتدا اندوکتانس مغناطیسی اشباع‌نشده را محاسبه نموده و سپس با محاسبه نسبت نیرومحرکه مغناطیسی در فاصله هوایی به نیروی محرکه مغناطیسی در کل مسیر عبور شار، ضریب اشباع محاسبه شده و اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی اشباع‌شده به دست می‌آید. اما در BDFIG قطب‌های مغناطیسی و مسیر عبور شار چندان مشخص نبوده و الگوهای عبور شار به‌دلیل سرعت‌های متفاوت چگالی شارهای P<sub>p</sub> و P<sub>c</sub> جفت قطب، با زمان تغییر می‌کند. بنابراین امکان محاسبه ضریب اشباع به‌روش مشابه ماشین القایی معمولی وجود نداشته و راه‌حل استفاده از شبیه‌سازی به‌روش المان محدود و یا روش مدار معادل مغناطیسی [۹] است. به‌همین دلیل اختلاف اندکی بین نتایج واقعی با نتایج مدار معادل وجود دارد. اندوکتانس نشستی با کاهش تعداد جفت قطب و همزمان کاهش تعداد دور حتی می‌تواند کاهش نیز داشته باشد. بررسی تغییرات پارامترهای مدار معادل مربوط به روتور نشان می‌دهد که با تغییر تعداد قطب‌های سیم‌پیچ توان به ۱ جفت قطب و کاهش تعداد دورهای آن، مقاومت منتقل شده روتور می‌تواند حتی کاهش یابد اما راکتانس منتقل شده مقداری بزرگ‌تر خواهد بود که البته به‌دلیل کاهش تعداد آشیانه‌ها، امکان طراحی بهینه‌تر روتور و بهبود این مشکل وجود دارد.





شکل ۷: تغییرات اندوکتانس مغناطیس‌کنندگی بر حسب تعداد قطب و تعداد دور در هر کویل سیم‌پیچی

سطح مقطع دوبعدی مش‌بندی شده ماشین در شکل ۸ نشان داده شده است. تعداد مش‌ها در قسمت‌های مختلف ساختار به‌گونه‌ای تنظیم شده که دقت محاسبات از کیفیت مطلوبی برخوردار باشد. تعداد کل مش‌ها ۲۰۲۹۰ می‌باشد.

چه فاصله بین سرعت طبیعی با سرعت سنکرون سیم‌پیچ‌های استاتور بیش‌تر باشد، ماشین در محدوده مطلوب سرعت، عملکرد بهتری دارد.

### ۳-۳- شبیه‌سازی المان محدود ۲ بعدی

در این بخش طراحی بهینه ژنراتور با ترکیب مورد مطالعه ۱/۴ جفت قطب با استفاده از روش ارائه‌شده در [۵] انجام شده و با ژنراتور ۲/۴ جفت قطب دانشگاه کمبریج [۱۰] مقایسه شده است. این طراحی با یکسان فرض کردن ابعاد کلی طول و قطر خارجی و طول فاصله هوایی، صورت گرفته و ساختارهای این دو ژنراتور توسط نرم افزار Maxwell شبیه‌سازی المان محدود گردیده است. لازم به‌ذکر است که تعداد آشیانه‌ها در ماشین ۱/۴ جفت قطب ۵ عدد بوده و همانند ماشین دانشگاه کمبریج دارای ۳ حلقه اتصال کوتاه در هر آشیانه است. بنابراین تعداد شیارهای روتور این ماشین ۳۰ عدد می‌باشد.

جدول ۳: پارامترهای مدار معادل برای طراحی پایه ماشین D180 که دارای ترکیب ۲/۴ است و چند طرح با ترکیب ۱/۴ جفت قطب

۱	$P_p=2, P_c=4, N_{rs}=36, N_p=10, N_c=20$									
	$R_p(\Omega)$	$L_p(mH)$	$L_{mp}(mH)$	$R_r(\Omega)$	$L_r(mH)$	$R_c(\Omega)$	$L_c(mH)$	$L_{mc}(mH)$	$N_1/N_2$	
	۲/۳۲۱۲	۵	۳۴۴/۸	۰/۷۹	۳۱/۷	۲/۰۳۵۶	۶/۹	۱۸۱/۱	۰/۷۲	
۲	$P_p=1, P_c=4, N_{rs}=30, N_p=10, N_c=20$									
	$R_p(\Omega)$	$L_p(mH)$	$L_{mp}(mH)$	$R_r(\Omega)$	$L_r(mH)$	$R_c(\Omega)$	$L_c(mH)$	$L_{mc}(mH)$	$N_1/N_2$	
	۳/۱	۷	۱۴۱۷/۲	۱/۹۸۰۵	۱۴۰/۹	۴/۸۸	۱۷/۶	۴۴۱/۲	۱/۱۱۳۱	
۳	$P_p=1, P_c=4, N_{rs}=30, N_p=5, N_c=25$									
	$R_p(\Omega)$	$L_p(mH)$	$L_{mp}(mH)$	$R_r(\Omega)$	$L_r(mH)$	$R_c(\Omega)$	$L_c(mH)$	$L_{mc}(mH)$	$N_1/N_2$	
	۰/۷۷۴۸	۱/۷	۳۶۷/۸	۰/۴۹۵۱	۳۵/۲	۰/۹۷۶	۴/۴	۱۱۰/۳	۰/۴۴۵۳	
۴	$P_p=1, P_c=4, N_{rs}=30, N_p=5, N_c=15$									
	$R_p(\Omega)$	$L_p(mH)$	$L_{mp}(mH)$	$R_r(\Omega)$	$L_r(mH)$	$R_c(\Omega)$	$L_c(mH)$	$L_{mc}(mH)$	$N_1/N_2$	
	۰/۷۷۴۸	۱/۷	۳۶۷/۸	۰/۴۹۵۱	۳۵/۲	۰/۸۱۳۲	۴/۴	۱۱۰/۳	۰/۷۴۲۱	

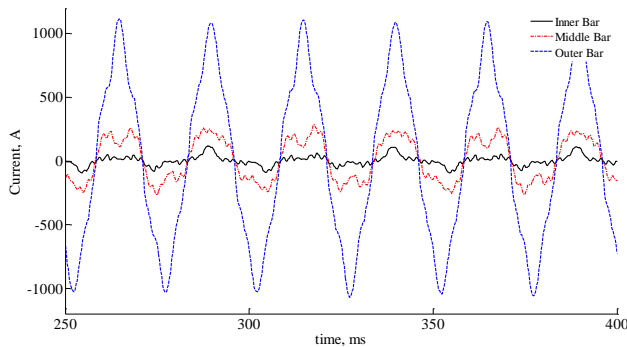
جدول ۴: نتایج شبیه‌سازی اجزای محدود برای بررسی تغییرات تعداد قطب را بر میزان توانایی روتور حلقه آشیانه‌ای

	$P_p=1, N_p=5, N_c=15, n_m=540 \text{ rpm}$	$P_p=2, N_p=10, N_c=20, n_m=450 \text{ rpm}$
تلفات هسته کل	۱۲۰ W	۸۰ W
گشتاور	-۶۰ Nm	-۹۰ Nm
جریان سیم‌پیچ توان	۴/۸ A <sub>rms</sub>	۵/۶۶ A <sub>rms</sub>
ولتاژ القایی در سیم‌پیچ توان	۲۴۵/۳۶ V <sub>rms</sub>	۲۷۶/۴۸ V <sub>rms</sub>

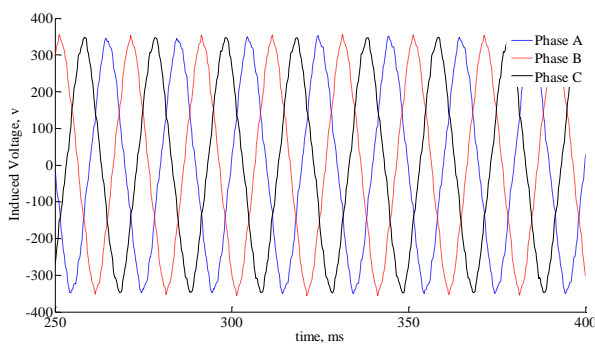
می‌افتد. برای مقایسه قابلیت روتورهای ماشین ۱/۴ جفت قطب و ماشین ۲/۴ جفت قطب در ایجاد ارتباط متقابل بین سیم‌پیچ‌های استاتور، مقدار چگالی شار سیم‌پیچ کنترل برای القای ولتاژ نامی ۲۴۰ ولت در سیم‌پیچ توان با شبیه‌سازی المان محدود محاسبه شده است. میزان چگالی شار لازم در ماشین ۱/۴ جفت قطب تقریباً ۱۳٪ بزرگ‌تر از مقدار چگالی شار موردنیاز در ماشین ۲/۴ جفت قطب است. این نشان‌دهنده توانایی بالاتر روتور ۱۶ آشیانه‌ای نسبت به روتور ۵ آشیانه‌ای است. شکل موج‌های جریان حلقه‌های روتور و ولتاژ القایی در سیم‌پیچ

همچنین توزیع دوبعدی خطوط شار مغناطیسی و چگالی شار در سطح مقطع ماشین ۱/۴ جفت قطب طراحی شده و ماشین ۲/۴ جفت قطب دانشگاه کمبریج به‌ترتیب در شکل ۹-الف و ۹-ب نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، توزیع خطوط شار مغناطیسی بسیار پیچیده‌تر از یک ماشین القایی معمولی است و در این حالت قطب‌ها واضح نیستند. دامنه چگالی شار در قسمت‌های مختلف در محدوده قابل قبول است. لازم به‌ذکر است که چگالی شارهای بزرگ به صورت نقطه‌ای در نقاط با شعاع کوچک همانند دهانه شیارها اتفاق

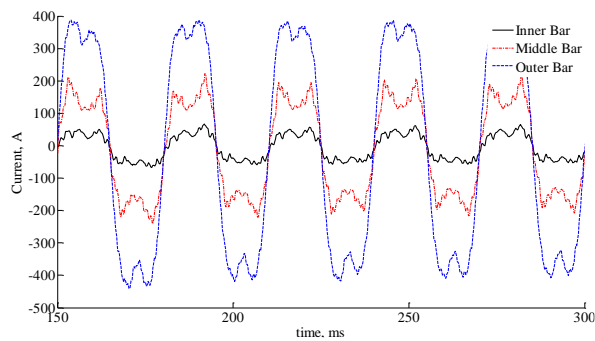
۲/۴ جفت قطب تناسب بهتری داشته و رسیدن به دامنه مطلوب چگالی شار به‌ازای دامنه جریان کم‌تر و در نتیجه تلفات و حرارت کم‌تری امکان‌پذیر است.



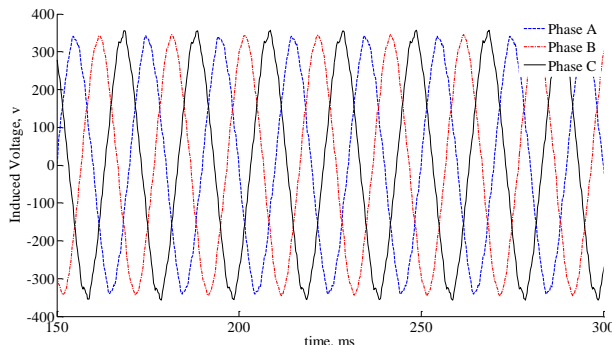
الف



ب



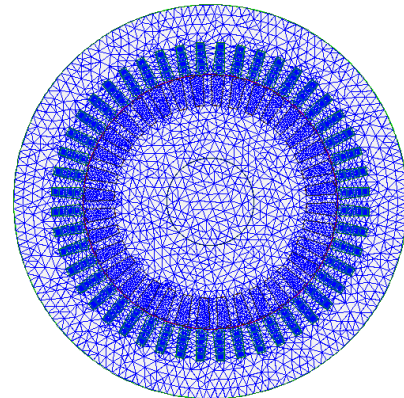
ج



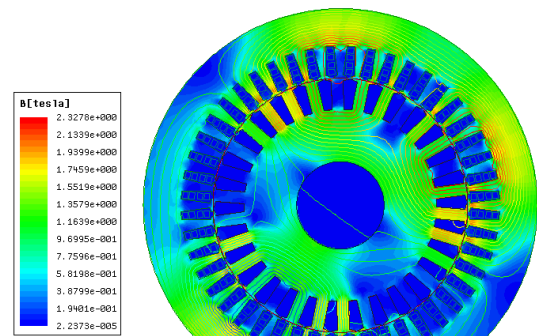
د

شکل ۱۰: الف - شکل موج جریان حلقه‌های یک آشیانه، ب - شکل موج ولتاژ القایی در فازهای سیم‌پیچ استاتور ماشین ۱/۴ جفت قطب، ج - شکل موج جریان حلقه‌های یک آشیانه، ب - شکل موج ولتاژ القایی در فازهای سیم‌پیچ استاتور ماشین ۲/۴ جفت قطب

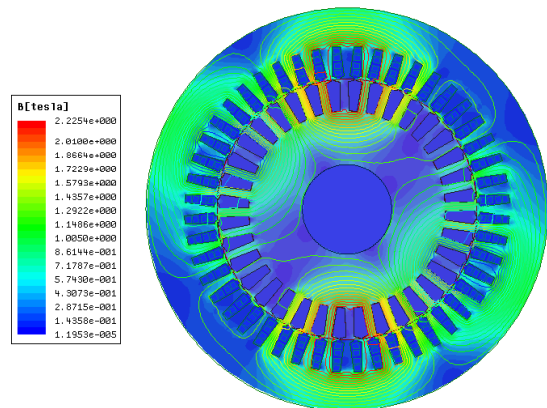
توان در حالت عملکرد ماندگار برای هر دو ماشین مورد مطالعه در شکل ۱۰ نشان داده شده است.



شکل ۸: سطح مقطع دوبعدی مش‌بندی شده



الف



ب

شکل ۹: توزیع دوبعدی خطوط شار مغناطیسی و چگالی شار در سطح مقطع، الف - ماشین ۱/۴ جفت قطب طراحی شده، ب - ماشین ۲/۴ جفت قطب دانشگاه کمبریج

همان‌طور که مشاهده می‌شود، جریان حلقه بیرونی آشیانه در روتور ماشین ۱/۴ جفت قطب، دارای دامنه بسیار بزرگ‌تری نسبت به دو حلقه دیگر آشیانه بوده و این به معنای اهمیت کم‌تر این دو حلقه در شار مغناطیسی روتور است. در حالیکه دامنه جریان حلقه‌ها در ماشین



#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله به انتخاب تعداد قطب‌های دو سیم‌پیچ توان و کنترل ژنراتور القایی دوتحریکه بدون جاروبک پرداخته شد. بررسی‌ها با استفاده از مدل مدار معادل الکتریکی و شبیه‌سازی المان محدود انجام گردید. برای محاسبه پارامترهای مدار معادل با تغییر مشخصات ابعادی و اندازه‌های ساختار، از روش تابع توزیع سیم‌پیچی استفاده شده است. براساس مطالعات انجام‌شده و همچنین با در نظر گرفتن جنبه‌های دیگر مربوط به ساخت و بهره‌برداری مانند مشکل‌تر بودن ایجاد سیم‌پیچی و تأثیرات شدیدتر غیریکنواختی فاصله هوایی و خارج از مرکز بودن روتور بر عملکرد ماشین، مناسب‌ترین ترکیب تعداد جفت قطب برای سرعت‌های عملکرد میانی حول ۵۰۰ دوربردقیقه، ترکیب ۲/۴ است. لازم به‌ذکر است که برای محدوده‌های سرعت عملکرد دیگر بایستی مطالعات مشابهی صورت گرفته و بهترین ترکیب تعداد قطب‌ها از بین ترکیب‌های ممکن انتخاب شود.

#### پیوست

مشخصات ژنراتور D180 دانشگاه کمبریج در جدول ۵ آورده شده است.

جدول ۵: مشخصات ژنراتور D180 دانشگاه کمبریج [۱۰]

۴۸	$N_{ss}$	تعداد شیارهای استاتور
۲	$P_p$	تعداد جفت‌قطب سیم‌پیچ توان
۴	$P_c$	تعداد جفت‌قطب سیم‌پیچ کنترل
۲۷۰ mm	$D_{so}$	قطر خارجی استاتور
۱۷۵ mm	$D_{si}$	قطر داخلی استاتور
۱۰	$N_p$	تعداد دور سیم‌پیچ توان
۲۰	$N_c$	تعداد دور سیم‌پیچ کنترل
۳۶	$N_{rs}$	تعداد شیارهای روتور
۱۷۴/۵ mm	$D_{ro}$	قطر خارجی روتور
۳۰ mm	$D_{ri}$	قطر محور
۶	$P_r$	تعداد آشیانه‌های روتور
۳	$N_{rl}$	تعداد حلقه در هر آشیانه
۱۹۹/۵ mm	$l_{fe}$	طول محوری هسته
۰/۱۴۳ Nmkg <sup>2</sup>	$J$	اینرسی

#### مراجع

- [۲] محسن دارابیان و ابوالفضل جلیلود، «کنترل پیش‌بین با رویکرد بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت در حضور مزارع بادی با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی ابرخازنی و SSSC»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۲، صفحات ۵۹-۷۳، تابستان ۹۵.
- [3] H. Li and Z. Chen, "Overview of Different Wind Generator Systems and Their Comparisons," *IET Renewable Power Generation*, vol. 2, no. 2, pp. 123-138, 2008.
- [4] H. Gorginpour, B. Jandaghi and H. Oraee, "A novel rotor configuration for brushless doubly-fed induction generators," *IET Electric Power Applications*, vol. 7, no. 2, pp. 106-115, Feb. 2013.
- [5] H. Gorginpour, H. Oraee and Richard A. McMahon, "Electromagnetic-Thermal Design Optimization of the Brushless Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1710-1721, April 2014.
- [6] H. Gorginpour, H. Oraee and R. A. McMahon, "A Novel Modeling Approach for Design Studies of Brushless Doubly Fed Induction Generator Based on Magnetic Equivalent Circuit," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 28, no. 4, pp. 902-912, Dec. 2013.
- [7] S. Tohidi, H. Oraee, M. Zolghadri, S. Shao and P. Tavner, "Analysis and Enhancement of Low Voltage Ride-through Capability of Brushless Doubly Fed Induction Generator," *IEEE Transactions Industrial Electronics*, vol. 60, no. 3, pp. 1146-1155, 2013.
- [8] P. Tavner, *Offshore Wind Turbines: reliability, availability and maintenance*, 1<sup>st</sup> edition, The Institute of Engineering and Technology (IET), 2012.
- [9] H. Gorginpour, B. Jandaghi, H. Oraee and E. Abdi, "Magnetic equivalent circuit modelling of brushless doubly-fed induction generator," *IET Renewable Power Generation*, vol. 8, no. 3, pp. 334-346, April 2014.
- [10] H. Gorginpour, H. Oraee and E. Abdi, "Calculation of Core and Stray Load Losses in Brushless Doubly Fed Induction Generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 7, pp. 3167-3177, July 2014.
- [11] H. Gorgin, B. Jandaghi and H. Oraee "Electromagnetic Analysis of Different Operating Modes of the Brushless Doubly Fed Machine," *Journal of Electromagnetic Analysis and Applications*, vol. 3, no. 12, pp. 490-512, Dec 2011.
- [12] J. Chen and W. Zhang, "Harmonics in Brushless Doubly Fed Induction Generator for Torque Ripple Analysis and Modeling," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 50, no. 11, pp. 1-4, Nov 2014.
- [13] E. Abdi-Jalebi, *Modeling and Instrumentation of Brushless Doubly-Fed (Induction) Machines*, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, UK, 2006.
- [14] Y. Duan and R. G. Harley, "A Novel Method for Multiobjective Design and Optimization of Three Phase Induction Machines," *IEEE Transactions Industrial Applications*, vol. 47, no. 4, pp. 1707-1715, 2011.
- [15] A. G. Yepes, F. Baneira, J. Malvar, A. Vidal, D. P´erez-Est´evez, O. L´opez and J. Doval-Gandoy, "Selection Criteria of Multiphase Induction Machines for Speed-Sensorless Drives Based on Rotor Slot Harmonics," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 8, pp. 4663-4673, Aug 2016.
- [16] P. C. Roberts, *A study of brushless doubly-fed (induction) machines*, Ph.D. dissertation, University of Cambridge, UK, 2005.
- [17] A. Oraee, E. Abdi and R. A. McMahon, "Converter rating optimisation for a brushless doubly fed induction generator," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 4, pp. 360-367, Apr 2015.

- [۱] محسن رحیمی و محمدرضا اسماعیلی، «طراحی کنترل‌کننده توان و بهبود میرایی نوسانات پیش‌بینی در توربین بادی DFIG-710kW نصب‌شده در سایت بینالود»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، جلد ۴۶، شماره ۴، صفحات ۱۲۳-۱۳۴، زمستان ۹۵.

<sup>4</sup> Sensitivity Analysis

<sup>5</sup> Nest

#### زیر نویس‌ها

<sup>1</sup>Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)

<sup>2</sup> Brushless Doubly-Fed Induction Generator (BDFIG)

<sup>3</sup> Low Voltage Ride-Through (LVRT)