# بررسی تأثیر تغییر شکل مغناطیسهای دائم بر گشتاور دندانه و نیروی محرکه القایی یک ژنراتور مغناطیس دائم شارمحوری به کمک روش المان محدود

رضا عمادیفر<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ سجاد توحیدی<sup>۲</sup>، استادیار؛ محمدرضا فیضی<sup>۳</sup>، استاد؛ نقی رستمی<sup>۴</sup>، استادیار؛ مجتبی الدرمی<sup>۵</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد

> ۱ - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - rezaemadifar@yahoo.com ۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - stohidi@tabrizu.ac.ir ۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - n-rostami@tabrizu.ac.ir ۹- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - n-rostami@tabrizu.ac.ir ۵- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تبریز - تبریز - ایران - m.eldoromi92@ms.tabrizu.ac.ir

چکیده: گشتاور دندانه ماشینهای مغناطیس دائم شارمحور (AFPM) در حالت عادی و در مقایسه با ماشینهای شار شعاعی بالا است. چگالی توان، گشتاور دندانه، مشخصههای گشتاور سرعت و بازده ازجمله پارامترهایی هستند که در طراحی ژنراتورها حائز اهمیت هستند. در این مقاله آثار تغییر و انحراف شکل مغناطیسهای دائم روتور بر عملکرد ژنراتور مطالعه شده است. شکل بهینه آهنرباهای روتور بهمنظور کاهش گشتاور دندانه و به دست آوردن توزیع چگالی شار و درنتیجه EMF القایی تقریباً سینوسی به دست آمده است. به همین منظور با شبیهسازی المان محدود یک ژنراتور شارمحور مغناطیس دائم ۹ فاز با ساختار تک استاتور-تکروتور، آثار تغییر و انحراف شکل مغناطیسهای روتور بر عملکرد ماشین مورد تحلیل و بررسی قرارگرفته است. برای تحلیل ژنراتور طراحی شده از روش المان محدود و از نرمافزار 1.2 شارمحور در شرایط بیباری و بار کامل مورد بررسی و تأثیر اعمال روشهای اصلاح روتور و تغییر شکل مغناطیسهای روتور، میتوان به یحمای خوجی ژنراتور مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیهسازیها نشان می دهد که با تغییر و انحراف بهینه شکل مغناطیسهای روتور، میتوان به عرفی مرد مطالعه قرار گرفته است. نتایج شبیهسازیها نشان می محدود و از نرمافزار 1.2

**واژههای کلیدی:** ژنراتور مغناطیس دائم شارمحور، گشتاور دندانه، ساختارهای ژنراتور، روش المان محدود، شکل آهنربا.

# Analysis of Magnet Shape Effect on Cogging Torque and EMF Waveform of AFPM Generators Using FEM Methods

R. Emadifar<sup>1</sup>, MSc Student; S. Tohidi<sup>2</sup>, Assistant Professor; M. R. Feyzi<sup>3</sup>, Professor; N. Rostami<sup>4</sup>, Assistant Professor; M. Eldoromi<sup>5</sup>, MSc Student

1, 2, 3, 4, 5- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran,

Emails: 1- Rezaemadifar@yahoo.com, 2- stohidi@tabrizu.ac.ir, 3- feyzi@tabrizu.ac.ir, 4- n-rostami@tabrizu.ac.ir, 5- m\_aldorami02@me\_tabrizu.ac.ir

5- m.eldoromi92@ms.tabrizu.ac.ir

**Abstract:** Axial flux permanent magnet machines (AFPMs) have a higher cogging torque than their radial flux counterparts. Power density, cogging torque, torque-speed characteristics, and the efficiency are the most important parameters in the design of the generators. This study aims to investigate the effects of the rotor magnets deviations which reduce the cogging torque and influence the performance of the AFPM generators. Therefore, the effects of these deviations are thoroughly studied through finite element analysis of a nine-phase single-stator single-rotor AFPM generator. FLUX 11.2 and the finite element method are jointly used to analyze this generator. The simulations are conducted under no load and full load conditions. The results show that with an optimal deviation in the rotor magnet shapes, an almost sinusoidal Electro- Motive- Force (EMF) can be obtained. In addition, reducing the cogging torque leads to output torque ripple reduction. Therefore, the current waveforms are improved.

Keywords: Axial flux permanent magnet generator, cogging torque, finite element method, generator structures and magnet shape.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۰۴/۰۶ تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۵/۰۶/۳۱ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۸/۱۹ نام نویسنده مسئول: نقی رستمی نشانی نویسنده مسئول: ایران – تبریز – بلوار ۲۹ بهمن – دانشگاه تبریز – دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

#### ۱- مقدمه

در سالهای اخیر ماشینهای مغناطیس دائم شارمحوری بهصورت چشم گیری مورد توجه قرار گرفتهاند. مزیت هایی همچون بازده بالا، چگالی انرژی و گشتاور بالا و امکان ایجاد تعداد قطب بیشتر موجب محبوبیت ماشینهای مغناطیس دائم شارمحور در به کارگیری آنها بهعنوان موتور محرک خودروهای هیبریدی و همچنین بهعنوان ژنراتور در توربینهای سرعت پایین شده است. نمونهای از یک ماشین مغناطیس دائم شارمحور در کاربرد محرک داخل چرخی خودرو الكتريكي در مرجع [۱] بر اساس پروفيل سرعت خودرو طراحي و ساخته شده است. حذف جعبهدنده مكانيكي و اتصال مستقيم ماشين به چرخ یا توربین موجب کاهش سرعت محور ماشین میشود. بهمنظور جبران سرعت پایین روتور می توان تعداد قطب ماشین را افزایش داد.جبران سرعت پایین محور به این دلیل است که معمولاً در کاربردهای اتصال مستقیم ماشین به توربین و یا چرخ خودرو الکتریکی، بهدلیل محدودیتهای ادوات الکترونیک قدرت موجود، محدوده فرکانس قابلقبول باید بین ۱۰ الی ۶۰ هرتز باشد [۲]. بنابراین افزایش تعداد قطب در کاربرد اتصال مستقیم اجتنابناپذیر خواهد بود. اما از طرفی تعداد قطبهای بیشتر نیز موجب افزایش قطر ماشین خواهد شد که درهرصورت همه این موارد در ماشینهای شارمحور امکان پذیر بوده و طراحی یک ماشین سرعت پایین را آسان تر میکند. بنابراین، علت محبوبیت ژنراتورهای شارمحور در کاربردهای اتصال مستقیم ژنراتور بهدلیل عدم نیاز به واسط مکانیکی قابل درک است. تاکنون مدل های مختلفی از ماشینهای مغناطیس دائم شارمحور طراحی و برای کاربرد در توربینهای بادی مورد آزمایش قرارگرفتهاند که در [۷-۳] برخی از نتایج عملی انجامشده آورده شده است.

ماشینهای شارمحوری در مقایسه با ماشینهای شار شعاعی از گشتاور دندانه قابل توجهی برخوردار هستند. ارزیابی عملکرد گشتاور در ماشینهای دوار ازجمله چگالی گشتاور بیشینه با داشتن کمترین ریپل یک چالش مهم در طراحی آنهاست. اصلی ترین علت ریپل گشتاور را می توان گشتاور دندانه ا دانست [۱۳-۸]. در سرعتهای بالا، معمولاً ریپل گشتاور توسط اینرسی سیستم پوشش داده می شود. بااین وجود، در سرعتهای پایین، ریپل گشتاور ممکن است منجر به تغییر سرعت ناخواسته، لرزش و اغتشاش گردد.

در این مقاله، روشهای مختلف موجود برای کاهش گشتاور دندانه آورده شده است. بحثی که باید هنگام طراحی ماشینهای مغناطیس دائم در نظر گرفته شود. گشتاور دندانه حاصل اثر متقابل هارمونیکهای فاصله هوایی، به دلیل دندانهای بودن استاتور و هارمونیکهای نیرومحرکه مغناطیسی در ماشینهای مغناطیس دائم است. روشهای مختلفی برای کاهش گشتاور دندانه در ماشینهای مغناطیس دائم شار شعاعی وجود دارد[۱۶-۱۴]. برخی از این روشها عبارتاند از: انحراف دندانه یا آهنربا، جابهجایی و تغییر شکل آهنرباها، به کارگیری دندانه یا شیار فرعی، بهینه نمودن نسبت کمان قطب به گام قطب آهنربا،

به کارگیری عدد کسری از شیارها در هر قطب و توزیع مغناطیس کنندگی سینوسی، که مجموعهای از این روشها اخیراً در [۱۷] برای کاهش گشتاور در ماشینهای شار شعاعی، مورد مطالعه قرار گرفته است. برخی از این روشها را میتوان به صورت مستقیم در ماشینهای AFPM استفاده نمود [۲۲-۱۸]. البته شایان ذکر است که قیمت تمامشده اعمال این روشها بسیار بالا است.

در این مقاله آثار تغییر و انحراف شکل مغناطیسهای دائم روتور بر عملکرد ژنراتور مطالعه شده است. شکل بهینه آهنرباهای روتور بهمنظور کاهش گشتاور دندانه و به دست آوردن توزیع چگالی شار و درنتیجه EMF القایی تقریباً سینوسی به دست آمده است. به همین منظور مدل المان محدود یک نمونه ژنراتور مغناطیس دائم شارمحور با ساختار یک روتور و یک استاتور ارائه شده و روشهای بیانشده در [۸] برای کاهش گشتاور دندانه بر روی آن اعمال شده است. درنهایت با شبیهسازی المان محدود آن در نرمافزار FLUX112 به تحلیل پارامترهای عملکردی ماشین ازجمله نیروی محرکه القایی و گشتاور دندانه ژنراتور پرداخته شده است.

# ۲- گشتاور دندانه و روشهای کاهش آن

#### ۲-۱- محاسبه گشتاور دندانه

با وجود اینکه گشتاور دندانه را میتوان با استفاده از روش المان محدود محا سبه نمود، تو صیف دیگری برای محا سبه آن تو سط بسط سری فوریه بهصورت زیر بیان شده است [۱۷]:

$$T_{cog}(\theta_m) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(kN_c\theta_m + \varphi_k) \tag{1}$$

که در آن  $\theta_m$  موقعیت چرخش روتور،  $T_k$  و  $k_k$  دامنه و زاویه هارمونیک R ام،  $N_c$  ضریب مشترک بهینه بین تعداد قطبهای روتور (۲) و تعداد شیارهای استاتور ( $N_s$ ) است. زمانی که تعداد شیارها در هر قطب عددی صحیح است،  $N_c = N_s$  در نظر گرفته می شود.

گشتاور دندانه توسط روش المان محدود و با استفاده از معادلات ماکسول یا تکنیک کار مجازی قابل محاسبه است [۲۵-۲۳]. مزیت روش تانسور استرس ماکسول این است که تنها به محاسبه یک میدان نیاز است. بااینحال، رسیدن به دقت کافی به شدت به میزان جداسازی و انتگرال گیری مسیر بستگی دارد. از سوی دیگر تکنیک کار مجازی برای پیادهسازی بسیار سادهتر است [۲۴]. این در حالی است که در این روش، به دو موقعیت از روتور نیاز است و لذا دقت در حل مسئله بیشتر شده و خطاهای عددی منتج از متفاوت بودن انرژی مغناطیسی دو بخش مشابه تعیین کننده است.

در این مقاله محاسبات بر پایه روش المان محدود صورت گرفته است. این روش پیش از این نیز در مورد ماشینهای AFPM به کار گرفته شده است [۲۱-۲۲]. با وجود اینکه ممکن است این روش نیازمند زمان زیادی باشد [۲۳،۲۲]، ولی روش المان محدود روشی مطمئن در تحلیل مسئله خواهد بود. تأثیر مثبت این روش در [۱۹-۱۶] و [۲۴-۲۹] مورد بررسی قرار گرفته است.

#### ۲-۲- روشهای کاهش گشتاور دندانه

به دلیل ساختار متفاوت و انعطاف پذیر ماشینهای شارمحور روشهای مختلفی برای کاهش گشتاور دندانه در آنها ارائه شده است. برخی از این روشها مختص مدلها و ساختارهای خاصی از AFPMها هستند و برخی دیگر نیز قابلیت اعمال بر روی اغلب ماشینهای شارمحور را دارند.

روشهای کاهش گشتاور دندانه، درواقع مجموعهای از اصلاحات فیزیکی است که در یک نگاه کلی می توان آن را به سه دسته تقسیمبندی کرد. شکل ۱ روشهای کاهش گشتاور دندانه را در ماشینهای AFPM به صورت خلاصه نشان می دهد.



## شکل ۱: روشهای موجود برای کاهش گشتاور دندانه در ماشینهای شارمحور مغناطیس دائم [۹]

# ۳- طراحی شیار

ا ستفاده از ا ستاتور شیاردار در ما شینهای شارمحور مزایایی دارد که ازجمله مهمترین آنها میتوان به موارد زیر اشاره کرد[۱۳]:

**الف**) ضخامت موردنیاز آهنربا برای ساختار شیاردار کمتر است. در ساختار بدون شیار، سیمپیچی فاصله هوایی را افزایش میدهند که باعث کاهش چگالی شار فاصله هوایی می گردد. برای جبران این کاهش چگالی شار، لازم است در ساختار بدون شیار، ضخامت آهنربا بیشتر شود.

ب) در ساختار بدون شیار، در سطح سیم پیچی در فاصله هوایی،
آهنرباهای روتور جریان گردابی تولید میکنند که منبع تلفات دیگری
است. با وجود شیار، سیم پیچیها تا حدودی در مقابل این تلفات
محافظت می شوند.

ج) در ساختار استاتور شیاردار، استاتورها در مقابل دمای بالای ناشی از جریان استاتور بهتر محافظت میشوند.

د) در ساختار شیاردار، اندوکتانس سیمپیچیها بیش تر بوده و به آسانی می توان راکتانس موردنیاز را با طراحی بهینه شکل شیارها کنترل کرد. استحکام سیمپیچیها در ساختار استاتور دارای شیار بیش تر از استاتور فاقد شیار است.

## ۲-۱- جنبههای مهم طراحی شیار

اشباع دندانهها مهمترین عامل تعیینکننده ابعاد شیار است. با فرض اینکه هیچ یک از شیارها خالی رها نشود، سیمپیچی فازها بهطور یکسان در شیارها تقسیم میشود.

چنانچه چگالی جریان زیاد شود، تلفات مسی افزایش مییابد و مشکل خنککنندگی رخ خواهد داد و در صورتی که چگالی جریان خیلی کم باشد، نیاز به سطح مقطع بیش تری برای شیار بوده و لذا ارتفاع دندانه افزایش مییابد، درنتیجه مقدار فولاد استفاده شده برای دندانهها و طول محوری هسته استاتور افزایش خواهد یافت.

چنانچه شیار خیلی عمیق و باریک باشد، شار نشتی افزایش مییابد و درصورتیکه پهنای شیار خیلی بزرگ باشد، امکان به اشیاع رفتن دندانهها بیشتر میشود.

چنانچه دهانه شیار خیلی باز باشد، گشتاور دندانهای افزایش خواهد یافت و در صورتی که دهانه شیار خیلی بسته با شد، شار نشتی دندانهها افزایش خواهد یافت.

شرایط ذکرشده، ترکیبهای ممکن تعداد قطب و شیار را با در نظر گرفتن شــرایط زیر تعیین میکند، بنابراین تعداد شـــیار در یک قطب بهازای هر فاز (q)، بهصورت زیر خواهد بود:

(۲)  $\frac{1}{4}p \leq n_s \leq \frac{1}{2}p$  (۲) موارد زیر نیز در طراحی شیار حائز اهمیت هستند: الف) تعداد شیارها باید عدد زوج و مضرب ۳ (تعداد فاز) باشد. ب) تعداد قطبها و شیارها نمیتواند برابر باشند. ج) تعداد شیارها باید بر ۲۳ بخشپذیر باشد، چراکه تعداد کلاف هر فاز باید یک عدد صحیح باشد. د) نسبت  $\frac{n_s}{3GCD\{n_{s,p}\}}$  باید عدد صحیح باشد. که منظور از GCD بزرگترین مقسومعلیه مشترک<sup>۲</sup> است.

## ۲-۳- انتخاب تعداد فاز و شیار

ازجمله مراحل طراحی، که میتوان از آن بهعنوان مهمترین مرحله نیز نام برد، تعیین و انتخاب تعداد فازها، آهنرباها و شیارها است. این امر با توجه به ویژگیهای مکانیکی و الکتریکی لازم صورت میپذیرد. برای یک ژنراتور با سرعتپایین به تعداد قطب بالا نیاز خواهد بود. علاوهبراین تعداد فازهای ماشین بستگی به محدوده توان و ادوات الکترونیک قدرت استفادهشده در سیستم دارد. در مراجع [۳۱،۳۰] قوانینی برای یافتن تعداد مناسب فاز و قطب ارائه شده است.

در مرجع [۳۲] شـش سـاختار برای طراحی ژنراتور انتخاب شـده اسـت. این سـاختارها با توجه به شـرایط ترکیب تعداد فاز و قطب بیان شده است. ۸ قطب و ۹ شیار، ۱۰ قطب و ۹ شیار، ۱۴ قطب و ۹ شیار، ۱۶ قطب و ۱۸ شیار، ۲۲ قطب و ۱۸ شیار و دست آخر ۲۶ قطب و ۱۸ شیار. نحوه قرارگیری کلافهای هر فاز در شیارهای استاتور برای دو موردی که نتایج تحلیلی بهتری را در پی داشـتهاند در جدول ۱ نشان داده شده است.

دو عامل مهم در انتخاب نوع ساختار اثر گذار است. عامل اول کیفیت توان خروجی ژنراتور و عامل دوم نبود ریپل گشتاور الکترومغناطیسی است [۳۲]. یکی دیگر از عواملی که در مرتبه بعدی اهمیت قرار دارد، پایین بودن ریپل گشتاور در حالت بیباری است.

در این مقاله با توجه به موارد ذکرشده، ساختار ۱۰ قطب با ۹ شیار بهمنظور شــبیهســازی و بررســی عملکرد آن در اثر اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه، انتخاب شده است. شکل ۲ ساختار سیمپیچی و نحوه قرارگیری کلافهای ژنراتور مورد بررسی را نشان میدهد.

جدول ۱: نحوه قرارگیری کلافهای هر فاز در شیارهای استاتور [۳۲]

شماره فاز		شماره شیار
۸ قطب ۹ شیار	۱۰ قطب ۹ شیار	<u> </u>
۱ و ۶	۱ و ۵	١
۵ و ۱	۶ و ۱	۲
۹ و ۵	۲ و ۶	٣
۴ و ۹	۷ و ۲	۴
٨ و ۴	۳ و ۲	۵
۳ و ۸	۸ و ۳	۶
۷ و ۳	۴ و ۸	٧
۲ و ۷	۹ و ۴	٨
۶و۲	۵ و ۹	٩

#### ۳-۳- ملاحظات عملی در طراحی

این احتمال وجود دارد که بدون توجه کافی به محدودیت مکانیکی، پارامتر های به دستآ مده از روش های طراحی تحلیلی و عددی ماشین های الکتریکی، قابل اعتماد و عمل پذیر نباشیند. بعضی از محدودیتهای عملی را باید برای طراحی و ساخت AFPM نیز مدنظر قرارداد. اگر تعداد قطب ها در ماشین های AFPM بالا باشد، آنگاه ضخامت موردنیاز برای یوغ ا ستاتور، روتور دی سک و پهنای دندانههای استاتور اغلب بر اساس جنبه های مکانیکی تعیین می شوند. این موضوع

به این دلیل است که در ماشینهای AFPM با تعداد بالای قطبها، اگر ضخامت یوغ استاتور بر اساس بار مغناطیسی مجاز محاسبه شود، امکان دارد که این ضخامت خیلی نازک باشد. علاوهبراین، در مورد ماشینهای شارمحور پهنای دندانه، تابعی از شعاع استاتور است، بنابراین ساختار شکافها و دندانهها باید بهگونهای طراحی شوند که ضخامت خاصی از دندانه در شعاع داخلی استاتور باقی بماند. همچنین، به دلیل نیروی الکترومغناطیسی که همجهت با محور ما شین عمل میکنند، ضخامت روتور دیسک ماشین AFPM باید بهگونهای انتخاب شود که بتواند بدون انحراف زیاد در مقابل این نیروها مقاومت کنند. طول فاصله هوایی بر اساس اندازه چگالی شار مغناطیسی در فا صله هوایی و با در نظر گرفتن محدودیت ا شباع مغناطیسی هسته (دندانههای) استاتور و

#### ۴- نمونه مورد مطالعه

ژنراتور شارمحور معرفی شده، دارای ساختار یک استاتور و یک روتور، با گشتاور و سرعت نامی ۴۰ نیوتن متر و ۲۰۰ دوردردقیقه و دارای ۹ فاز است. این ژنراتور دارای ۹ شیار در استاتور و ۱۰ آهنربا در روتور است.

ا ستاتور از یک حجم با ضخامت داده شده در جدول ۲ ایجاد شده است و شیار با عرض ثابت قرار داده شده است. سیمپیچی از نوع متمرکز است و منجر شده تا از همپوشانی سیمپیچها جلوگیری شود و قرار دادن آنها در شیار به سادگی صورت پذیرد.

آهنرباها از نوع ذوزنقهای هستند و نسبت کمان قطب به گام قطب در حالت اولیه برابر با ۱۰/۶ است. ساختار ژنراتور به گونهای در نرمافزار شـبیهسازی شـده است که تغییرات مربوط به اندازه و شـکل مغناطیسهای دائم در آن به راحتی امکان پذیر است. بنابراین می توان تأثیر تغییر ابعاد و شـکل هندسی مغناطیسهای دائم ماشـین را روی مشخصههایی نظیر EMF القایی و گشتاور دندانه بررسی نمود. شکل ۳ بخشی از این ژنراتور را نشان می دهد.

در این مقاله یک ما شین AFPM نهفازه با سیمپیچی متمرکز ارائه شـده اسـت. با وجود اینکه سـیمپیچی متمرکز دارای هارمونیکهای مرتبه پایین اسـت، ولی این هارمونیکها در حالتهای بیش از ۶ فاز نمی توانند اثر خود را نشـان دهند. بنابراین در سـاختار ارائهشـده، هر سیمپیچ معرف یکفاز است و درمجموع یک ژنراتور نهفازه شبیه سازی شده است. این ژنراتور می تواند با استفاده از یک مبدل نهفازه به شبکه متصـل شـود. شـکل ۴ نمایی از مبدل نهفازه پیشـنهادی برای ژنراتور بهمنظور اتصال به شبکه را نشان میدهد.



شکل ۲: ساختار سیم پیچی انتخابشده برای ژنراتور مورد بررسی [۳۱]



شکل۳: ساختار ژنراتور مورد مطالعه



شکل۴: مبدل ۹ فاز متصل به ژنراتور

سیم پیچهای ۹ فاز ژنراتور شارمحور با یکدیگر ۴۰ درجه مکانیکی اختلاففاز دارند. شکل ۵ این موضوع را نشان داده است.



شکل۵: سیمپیچی ۹ فاز

پارامترهای اصلی ژنراتور مورد بررسی در جدول ۲ ارائه شده است. در ژنراتور از سیمپیچی متمرکز استفاده شده است و هر سیمپیچ روی یک دندانه استاتور پیچیده شده است. در حالتی که شیارها از نوع دهانه باز هستند، میتوان سیمپیچها را بهطور جداگانه آماده نمود و درنهایت در شیار موردنظر نصب کرد. در این حالت با توجه به اینکه سیمپیچیها بر روی ا ستاتور قرار می گیرند از ا ستحکام مکانیکی منا سبی برخوردار خواهند بود.

اصلى ژنراتور	پارامترهای	جدول ۲:
--------------	------------	---------

واحد	مقدار	ویژگی
-	٩	تعداد فازها
-	١٠	تعداد قطبها
mm	۲۵۰	قطر خارجی
mm	10.	قطر داخلی
mm	۳۵	ارتفاع شيار
mm	۳۰	ضخامت روتور
دور	٧۴٧	تعداد دور در هر کلاف
mm	۴	فاصله هوايى
mm	۱.	ضخامت أهنربا
rpm	۲۰۰	سرعت نامی
N.m	۴۰	گشتاور نامی

#### ۵- روشهای حداقلسازی گشتاور دندانه

شکلهای ۶ تا ۹ مدلهای حاصل از اعمال روشهای ارائه شده در [۸] بر روی نمونه مورد مطالعه به منظور کاهش گشتاور دندانه را نشان می دهند. در این مقاله تنها روشهای تغییر شکل مغناطیسهای ماشین مورد مطالعه قرار گرفته است. از جمله این تغییرات اعمال شده می توان به مورب سازی معمول مغناطیس دائم، انحراف مثلثی، مغناطیسهای کنار موازی و مغناطیس دایره ای اشاره کرد. باید اشاره شود که در همه مدلهای بررسی شده به منظور ایجاد شرایط یکسان، سطوح مغناطیسهای دائم و حجم آن ها برابر در نظر گرفته شده است.



 $oldsymbol{ heta}_{skew}=$  ۳۰ الف) زاویه انحراف  $oldsymbol{ heta}_{skew}=$  ۱۵ الف) زاویه انحراف



شکل ۸: اشکال مغناطیسها، الف) حالت مغناطیس کنارموازی با فاصله h= ۶۲ mm، حالت دایرهای



شکل ۹: انحراف مثلثی مغناطیسها با زاویه انحراف از حالت ذوزنقهای، (لف) δ = ۲۰ ( ، φ = ۱۰ الف)

## ۶- نتایج برای حالت بیباری ژنراتور

در این بخش نتایج شبیهسازی مدلهای مختلف ارائه شده برای حالت بیباری آورده شده است. شکل ۱۰ گشتاور حاصل از شبیهسازی ماشین را نشان میدهد. با توجه به اینکه ماشین در حالت بیباری قرار دارد نمودار نشان دادهشده بیانگر مقدار گشتاور دندانه است. مطابق شکل ۱۰، متوسط گشتاور دندانه تقریباً برابر صفر و پیکتاپیک دامنه آن برابر با ۹/۱۹ نیوتنمتر است.



شکل ۱۰: گشتاور حاصل از شبیهسازی در حالت بیباری

در شکل ۱۱، دامنه ریپل گشتاور دندانه برای مدلهای مختلف ارائه شده، جهت مقایسه در کنار هم نشان داده شده است. مطابق شکل ۱۱، گشتاور دندانه در حالتی که مغناطیس ها به صورت ذوزنقه ای هستند از بیش ترین مقدار برخوردار بوده و در حالتی که مورب سازی معمول با زاویه ۳۰ درجه (مورب ۲) صورت گرفته است، کم ترین مقدار را دارد.



شکل ۱۱: نمودار مقایسهای دامنه (پیکتاپیک) گشتاور دندانه در مدلهای شبیهسازی شده

مطابق شکل ۱۱ همه روشهای پیشنهادی برای کاهش گشتاور دندانه در ژنراتور طراحی شده مؤثر بوده و موجب کاهش دامنه گشتاور دندانه شدهاند، هرچند که میزان تأثیر گذاری آنها متفاوت است. در ادامه آثار اعمال این روشها بر روی نیروی محر که القایی و هارمونیکهای آن بررسی می شود. شکل ۲۱ نمودار شکل موج نیروی محر که القایی فاز اول و شکل ۱۳ نمودار هارمونیکی شکل موج نیروی محر که القایی ماشین طراحی شده را برای حالتهای مغناطیس ذوزنقهای و مغناطیس دایرهای شکل نشان می دهد.



شکل ۱۲: نمودار شکل موج نیروی محرکه القایی فاز اول برای حالت مغناطیسهای ذوزنقهای و حالت مغناطیسهای دایرهای

مطابق شکلهای ۱۲ و ۱۳، با تبدیل شکل مغناطیسها از ذوزنقهای به دایرهای، از دامنه نیروی محرکه القایی کاسته می شود همچنین مؤلفه اصلی و هارمونیک سوم ولتاژ در حالت مغناطیس دایرهای در مقایسه باحالت مغناطیس ذوزنقهای دامنه کم تری دارد.





شکل ۱۴ نمودار نیروی محرکه القایی فاز اول ما شین طراحی شده را برای حالت موربسازی معمول مغناطیسها به میزان ۱۵ و ۳۰ درجه نشان میدهد. موربسازی معمول ۱ بیانگر زاویه انحراف ۱۵ درجهای و موربسازی معمول ۲ بیانگر زاویه انحراف ۳۰ درجهای است.





نمودار نشان دادهشده در شکل ۱۵ نیز هارمونیکهای نیروی محرکه القایی در سیمپیچ فاز اول را برای حالتهای موربسازی معمول نشان میدهد. مطابق شکل، موربسازی معمول بیشتر از ۳۰ درجه موجب کاهش دامنه شکل موج و همچنین دامنه هارمونیک اصلی نیروی محرکه القایی می شود.



شکل ۱۵: هارمونیکهای نیروی محرکه القایی فاز اول را برای حالتهای ذوزنقهای و موربسازی معمول ۱۵ و ۳۰ درجهای

شکل ۱۶ نمودار هارمونیکهای ولتاژ برای ژنراتور با مغناطیسهای کنار موازی در مقایســه با ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای را نشــان





شکل ۱۷ نمودار مقایسهای هارمونیکهای ولتاژ را برای حالتهای انحراف مثلثی ۱۰ و ۲۰ درجهای نشان میدهد. انحراف ۱۰ درجهای تحت عنوان انحراف مثلثی ۱ و انحراف ۲۰ درجهای تحت عنوان انحراف مثلثی ۲ نشان داده شده است. مطابق نتایج شبیهسازی با افزایش زاویه انحراف بیشتر از ۲۰ درجه دامنه هارمونیک سوم افزایش پیدا میکند.



شکل ۱۷: نمودار هارمونیکهای ولتاژ برای ژنراتور با مغناطیسهای کنار موازی در مقایسه با ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای

مقایسه شکلهای ۱۵ تا ۱۷ نشان میدهد، محاسبه و بهینهسازی زاویه انحراف مغناطیسهای مورب و مغناطیسهای مثلثی تأثیر قابل توجهی بر هارمونیکهای نیرویمحرکه القایی دارد. بهعبارتدیگر مطابق نتایج ارائهشده اگر زوایای انحراف مغناطیسها بهصورت دقیق محاسبه و بهینهسازی نشود دامنه نیروی محرکه القایی کاهش و هارمونیکهای سوم و پنجم افزایش خواهند یافت.

# ۷- نتایج برای حالت بار کامل ژنراتور

در این بخش، عملکرد ژنراتور در اتصال به بار مقاومتی ثابت مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب بار مقاومتی با فرض ثابت بودن توان الکتریکی برای مدلهای مختلف شبیه سازی شده، صورت گرفته است. ابتدا عملکرد و مشخصههای الکتریکی و مکانیکی ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای مورد بررسی قرار گرفته و سپس تأثیر روشهای کاهش گشتاور

دندانه بر شکل موجهای جریان و توان خروجی ژنراتور با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۱۸ و ۱۹ به ترتیب نمودارهای ولتاژ و جریان فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای دائم ذوزنقهای را در حالت اتصال به بار مقاومتی ثابت نشان میدهد.



شکل ۱۸: نمودار ولتاژ فاز اول ژنراتور در حالت اتصال به بار مقاومتی ثابت









شکل ۲۰: نمودار توان فاز اول ژنراتور در حالت اتصال به بار مقاومتی ثابت

در شکل ۲۱ نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور با مغناطیسهای دائم ذوزنقهای در حالتی که سیم پیچهای استاتور آن

بهصورت ستاره بسته شدهاند، نشان داده شده است. مطابق شکل، تأثیر گشتاور دندانه در حالت دائم کار ژنراتور قابل مشاهده است.



#### شکل ۲۱: نمودار گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور با مغناطیسهای دائم ذوزنقهای

با توجه به اینکه شبیهسازی در سرعت ثابت صورت گرفته است، با داشتن میانگین گشتاور مکانیکی اعمالی به ژنراتور می توان توان مکانیکی ورودی به ژنراتور را محاسبه کرد. در شکل ۲۲ بهمنظور مقایسه بهتر متوسط توانهای ورودی و خروجی، نمودار مقایسهای از توان ورودی ژنراتور و توان الکتریکی خروجی نشان داده شده است. اختلاف بین توان ورودی و خروجی مطابق شکل برابر با ۹۱/۸ وات است که مقدار توان تلفاتی ماشین را نشان می دهد.





در ادامه به بررسی تأثیر تغییر و انحراف شکل مغناطیسهای دائم بر روی شکل جریان خروجی هر فاز، در حالتی که متوسط توان خروجی ژنراتورها برابر با یک مقدار ثابتی است، پرداخته میشود. لازم به ذکر است THD جریان هر فاز در کاربرد متصل به شبکه تابعی از نحوه اتصال ترانسفورماتور به ژنراتور نیز هست، این در حالی است که در مقاله حاضر به بررسی عملکرد ژنراتور بدون اتصال به شبکه و بااتصال به بار اهمی به خروجی ژنراتور صورت گرفته است. شکل ۲۳ نمودار مقایسهای از شکل

موجهای جریان ژنراتور با مغناطیسهای دایرهای و ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای نشان دادهشده است. مطابق شکل ۲۳ در اثر اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه از ریپل جریان خروجی ژنراتور کاسته شده است.



شکل ۲۳: نمودار مقایسهای از شکل موج جریان فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای دایرهای و ذوزنقهای

شــکل ۲۴ نمودار مقایســهای از شــکل موج توان خروجی فاز اول ژنراتور با مغناطیس های ذوزنقهای و ژنراتور با دو حا لت مختلف مغناطیسهای مورب را نشان میدهد.





در شکل ۲۵ نمودار مقایسهای از جریان خروجی فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای مورب در مقایسه با ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای آورده شده است. شکل ۲۴ و ۲۵ نشان میدهد که با اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه از میزان ریپل توان و جریان خروجی ژنراتور، کاسته شده است.





شکل ۲۶ نمودار شکل موج توانهای خروجی فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای کنارموازی را در مقایسه با ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای نشان میدهد.



شکل ۲۶: نمودار مقایسهای از شکل موج توان خروجی ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای و مغناطیسهای کنار موازی

شکل ۲۷ نمودار مقایسهای از شکل موجهای جریان خروجی فاز اول را برای ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای در مقایسه با ژنراتور با مغناطیسهای کنارموازی نشان میدهد. شکلهای ۲۶ و ۲۷ نشان میدهند که در این طراحی تأثیر اعمال روش مغناطیسهای کنارموازی در کاهش ریپل توان و جریان ژنراتور بسیار ناچیز است.



مغناطیسهای کنارموازی و ذوزنقهای

در شکل ۲۸ نمودار مقایسهای توانهای خروجی فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای و ژنراتور با مغناطیسهای مثلثی با زوایای انحراف ۱۰ و ۲۰ درجه نشان داده شده است.



شکل ۲۸: نمودار مقایسهای از شکل موج توان خروجی ژنراتور با مغناطیسهای ذوزنقهای و مغناطیسهای مثلثی با دو نوع انحراف

شکل ۲۹ نمودار جریان خروجی فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای دائم ذوزنقهای را در مقایسه با جریانهای خروجی ژنراتور با مغناطیسهای مثلثی با دو زاویه انحراف ۱۰ و ۲۰ درجهای نشان میدهد. شکلهای ۲۸ و ۲۹ نشان میدهند که اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه موجب کاهش ریپل در توان و جریان خروجی ژنراتور میشود.



شکل ۲۹: نمودار مقایسهای از شکل موج جریان فاز اول ژنراتور با مغناطیسهای کنارموازی و مغناطیسهای مثلثی با دو نوع انحراف

جدول ۳ یک جمعبندی کلی از نتایج این مقاله را نشان میدهد. در این جدول تأثیر اعمال انواع روشهای کاهش گشتاور دندانه بر روی برخی پارامترهای الکتریکی و مکانیکی ژنراتور مورد مطالعه آورده شده است.

شبيهسازى	نتايج	۳:	جدول
----------	-------	----	------

THD جریان در حالت اتصال به بار کامل	THD نیروی محرکه القایی فاز اول	دامنه هارمونیک اول ولتاژ (۷)	دامنه گشتاور دندانه (Nm)	روشهای کاهش گشتاور دندانه (تغییر شکل هندسی مغناطیسهای دائم)
•/١•٨١	•/•149	۳۳۳/۲۶	۷/۴۲۵	مغناطیس دایرهای
۰/•۹۵۸	•/•18٣	۳۳۸/۱۵	۳/۲۱	انحراف مثلثی ۱
۰/•٩•٨	•/•180	۳۳۲/۵۲	۲/۳۸۵	انحراف مثلثی ۲
•/•٨٩٧	•/•18٣	۳۳۸/۴۱	۲/۷۸۲۵	موربسازی معمول ۱
•/•۶۲٨	۰/۰۱۳۸	874/87	۲/۲۵	موربسازی معمول ۲
•/١•٧٣	٠/٠١٩٨۵	<b>*</b> 79/ <b>*</b> f	۵/۳۲۵	مغناطیس های کنارموازی با فاصله h=۶۲ mm
•/1189	٠/•١٩	۳۳۷/۱۲	٩/۴۷۸۵	مغناطيس ذوزنقهاي

#### ۸- نتیجهگیری

در این مقاله ابتدا روشهای کاهش گشتاور دندانه در ماشینهای شارمحور مغناطیس دائم مورد بررسی قرار گرفت. سپس با شبیهسازی المان محدود يك ژنراتور شارمحور مغناطيسدائم نهفازه تأثيرات اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه بر عملکرد ماشین مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. این ژنراتور دارای سیم پیچی متمرکز است. برای تحلیل ژنراتور طراحی شده از روش المان محدود و از نرمافزار Flux11.2 استفاده شد. نتایج مشخصههای خروجی ژنراتور شارمحور در شرایط مختلفی اعم از بیباری و بار کامل مورد بررسی قرار گرفت. تأثیر اعمال روشهای اصلاح روتور و ابعاد مغناطیسهای دائم بر روی عملکرد ماشین مورد مطالعه قرار گرفت. همچنین در بخش عمدهای از این مقاله گشتاور دندانه حاصل از هسته دندانهای استاتور مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از مقایسه شبیه سازی های صورت گرفته حاکی از آن است که اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه شکل موج نیروی محرکه القایی را تحت تأثير خود قرار مىدهد. ضمن اينكه اگر محاسبات لازم براى روشهای کاهش گشتاور دندانه بهصورت بهینه اعمال نشود ضمن کاهش دامنه نيروىمحركه القايى موجب افزايش هارمونيكهاى سوم و پنجم در ماشینهای شارمحور می شود. نتایج شبیه سازی در حالت بار کامل نیز نشان میدهد که با اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه از میزان ریپل توان و جریان خروجی ژنراتور کاسته شده است.

دریک جمع بندی کلی نتایج حاصل از این مقاله حاکی از آن است که هریک از روشهای ارائه شده در کاهش دامنه گستاور دندانه مؤثر هستند. اما این روشها شکل موج نیروی محرکه القایی در سیم پیچهای ژنراتور را تحت تأثیر قرار میدهند. اعمال روشهای کاهش گشتاور دندانه موجب کاهش دامنه مؤلفه اول نیروی محرکه القایی و ریپل جریان

و توان خروجی ژنراتور می شود. از بین روشهای کاهش گشتاور دندانه روش موربسازی ۲ با کم ترین مقدار دامنه گشتاور دندانه و کم ترین اعوجاج هارمونیکی کل ولتاژ و جریان، برای این ژنراتور بهترین گزینه است.

# پیوست: مدلسازی و شبیهسازی المان محدود ژنراتور مغناطیس دائم شارمحور در نرمافزار Flux11.2

از نقطهنظر مدلسازی، ماشین AFPM به صورت ذاتی دارای یک ساختار سهبعدی است. بنابراین برای مدنظر قرار دادن ساختار سهبعدی واقعی ماشین و دستیابی به دقت قابل قبول باید از نرمافزار سهبعدی استفاده کرد. رفتار الکترومغناطیسی واقعی، شارهای نشتی و همچنین اندوکتانس انتهای سیم پیچها را میتوان با استفاده از مدل سهبعدی ارزیابی کرد، موضوعی که در نظر گرفتن آن به غیر از این روش کار د شواری ا ست. با توجه به دقت محا سبات، اندازه منا سب مش<sup>7</sup> باید بر قسمتهای مختلف مدل اعمال شود. در منطقه فاصله هوایی به الگوی مشبندی پرتراکم نیاز است. با این همه در مورد ماشینهای AFPM با هم به نوبه خود باعث افزایش زمان محاسبه میشود. در بیش تر مطالعات مرتبط با ماشینهای AFPM، معمولاً روش طراحی تحلیلی یا تحلیل مرتبط با ماشینهای AFPM، معمولاً روش طراحی تحلیلی یا تحلیل دوبعدی FEM بر متوسط شعاع ماشین اجرا میشود تا به این ترتیب با

به دلیل سیمپیچی متمرکز، نمی توان تنها یک قطب ما شین را در مدل FEM مدلسازی کرد، در حالی که در مورد سیمپیچ روی هم می توان این کار را به صورت دورهای و با در نظر گرفتن تقارن ساختار، انجام داد. بنابراین باید تمام قطبهای ماشین را در مدل FEM لحاظ کرد.

شـکل ۳۰ مدل شـبیهسازیشده در نرمافزار Flux11.2 را نشان میدهد که متشـکل از ۲۲۴ نقطه، ۳۲۰ خط، ۱۶۰ صـفحه و ۲۹ حجم است.



شکل ۳۰: مدل شبیهسازیشده در نرمافزار Flux11.2

با توجه به اهمیت و دقت موردنیاز برای تحلیل پارامترهای ماشین در شبیه سازی های صورت گرفته از کوچک ترین ابعاد ممکن برای مشبندی استفاده شد. شکل ۳۱ نمونه ای از این مشبندی را نشان می دهد. لازم به ذکر است کلیه نتایج ارائه شده حاصل از عملکرد ژنراتور در سرعت نامی آن (۲۰۰ دور بر دقیقه) است.



شکل ۳۱: مدل مشزدهشده

با تعیین گام و مدتزمان شبیهسازی، الگوی مناسبی برای آغاز فرایند حل مسئله، تعریف می شود. مشخص است که هرچه گام حل مسئله کم تر باشد دقت بیش تر خواهد بود اما طول مدتزمان حل مسئله افزایش خواهد یافت. در این شبیه سازی با توجه به دقت موردنیاز از گام یک هزارم ثانیه استفاده شده است. همچنین کلیه نتایج ارائه شده حاصل از عملکرد ژنراتور در سرعت نامی ۲۰۰ دور بر دقیقه است. شکل ۳۲ جهت شار در مدل شبیه سازی شده را نشان می دهد. توزیع چگالی شار در یوغ استاتور ماشین نیز در شکل ۳۳ نشان داده شده است.



Flux ﷺ شکل ۳۲: جهت خطوط شار در مدل شبیهسازیشده



- [15] T. Li and G. Slemon, "Reduction of cogging torque in PM motors," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 24, no. 6, pp. 2901–2903, 1988.
- [16] Z. Q. Zhu and D. Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines," *IEEE Transactions Energy Convers.*, vol. 15, no. 4, pp. 407–412, 2000.
- [17] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich and D. Howe, "Synthesis of cogging torque from a single stator slot in permanent magnet machines," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 42, no. 3, pp. 650–657, 2006.
- [18] G. Bakarat, T. El-Meslouhi, and B. Dakyo, "Analysis of the cogging torque behavior of a two-phase axial-flux permanent magnet synchronous machine," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2803–2805, 2001.
- [19] F. Caricchi, F. Giulii Capponi, F. Crescimbini and L. Solero, "Experimental study on reducing cogging torque and core power loss in axial-flux permanent-magnet machines with slotted winding," *in IEEE Industry Applications Soc. Annu. Meeting*, pp. 1295–1302, 2002.
- [20] E. Muljadi and J. Green, "Cogging torque reduction in a permanent magnet wind turbine generator," *presented at the 21th Amer. Soc. Mechanical Engineers Wind Energy Symp.*, pp. 340-342, 2002.
- [21] M. Aydin, R. Qu and T. A. Lipo, "Cogging torque minimization technique for multiple-rotor, axial-flux, surface-mounted-PM machines: Alternating magnet polearcs in facing rotors," in IEEE Industry Applications Soc. Annu. Meeting, pp. 555–561, 2003.
- [22] A. Letelier, J. A. Tapia, R. Wallace and A. Valenzuela, "Cogging torque reduction in an axial-flux PM machine with extended speed range," *in Proc. IEEE Int. Electrical Machines and Drive Conf.*, pp. 1261–1267, 2005.
- [23] S. J. Salon, Finite Element Analysis of Electrical Machines, Norwell, MA, Kluwer, 1995.
- [24] J. L. Coulomb, "A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 19, no. 6, pp. 2514–2519, 1983.
- [25] D. Howe and Z. Q. Zhu, "The influence of finite element discretization on the prediction of cogging torque in permanent magnet excited machines," *IEEE Transactions* on *Magnetics*, vol. 28, no. 2, pp. 1080–1083, 1992.
- [26] P. J. Hor, Z. Q. Zhu and D. Howe, "Minimization of cogging force in a novel slotted linear brushless permanent magnet machine," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 34, no. 5, pp. 3544–3547, 1998.
- [27] Z. Q. Zhu, Z. P. Xia, D. Howe and P. H. Mellor, "Reduction of cogging force in linear permanent magnet machines," *Proc. Inst. Elect. Eng.* —*Elect. Power Appl.*, vol. 144, no. 4, pp. 277–282, 1997.
- [28] Z. Q. Zhu, S. Ruangsinchaiwanich, Y. Chen and D. Howe, "Evaluation of superimposition technique for calculating cogging torque in permanent magnet brushless machines," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 3, pp. 1597– 1603, 2006.
- [29] N. Rostami, M. R. Feyzi, J. Pyrhönen, A. Parviainen and V. Behjat, "Genetic algorithm approach for improved design of a variable speed axial-flux permanent-magnet synchronous generator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 48, no.12, pp. 4860-4865, 2012.
- [30] D. Vizireanu, S. Brisset and P. Brochet, "Polyphased PM Synchronous Machine with Concentrated Winding for Large Direct-Drive Wind Generator Applications," *Proceedings of Electromotion*, 2005.

مطابق انتظار جهت خطوط شار از قطب N آهنرباها به سمت قطب ۵، و چگالیشار در دندانههای استاتور بیشتر از سایر قسمتهای آن است.

#### مراجع

[۱] حجت حاتمی، محمدباقر بنا، شریفیان، محمدرضا فیضی، «ارائه

روش جديد طراحى بهبوديافته ماشينهاى مغناطيس دائم

شارمحوری سرعت پایین مورداستفاده در خودروهای هیبریدی»،

- مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، دوره ۴۵، شماره ۲، صفحه ۵۱-۹۴، ۱۳۹۴.
- [2] Y. Chen, P. Pillay and A. Khan, "PM Wind Generator Topologies," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 6, 2005.
- [3] B. Wu, Y. Lang, N. Zargari and S. Kouro, *Power* conversion and control of wind energy systems, Wiley-IEEE Press, 2011.
- [4] A. D. Gerlando, G. Foglia, M.F. Iacchetti and R. Perini, "Axial flux PM machines with concentrated armature windings: design analysis and test validation of wind energy generators," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 3795-3805, 2011.
- [5] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, "Axial flux permanent magnet disc machines: A Review," Wisconsin Electric Machines and Power Electronics Consortium, University of Wisconsin-Madison, Madison, WI, 53706-1691, 2004.
- [6] M. Lin, L. Hao, X. Li, X. Zhao and Z.Q. Zhu, "A novel axial field flux-switching permanent magnet wind power generator," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 47, no. 10, pp. 4457 - 4460, 2011.
- [7] S. Brisset, D. Vizireanu and P. Brochet, "Design and optimization of a nine-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 44, no. 3, pp. 707-715, 2008.
- [8] M. Aydin, K. Univ, Z. Q. Zhu, T. A. Lipo and D. Howe, "Minimization of Cogging Torque in Axial-Flux Permanent-Magnet Machines: Design Concepts," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 43, no. 9, pp. 3614–3622, 2007.
- [9] J. D. L. Ree and N. Boules, "Torque production in permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Transactions on Industrial Applications*, vol. 25, no. 1, pp. 107–112, 1989.
- [10] T. M. Jahns and W. L. Soong, "Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet ac motor drives: A review," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 43, no. 2, pp. 321–330, 1996.
- [11] C. Studer, A. Keyhani, T. Sebastian, and S. K. Murthy, "Study in cogging torque in permanent magnet machines," *in IEEE Industrial Applications Soc. Annu. Meeting*, New Orleans, LA, pp. 42–49, 1997.
- [12] D. C. Hanselman, "Effect of skew, pole count and slot count on brushless motor radial force, cogging torque and back EMF," *Inst. Elect. Eng. Proc. Elect. Power Appl.*, vol. 144, no. 5, pp. 325–330, 1997.

*با شارمحوری با کوپلاژ مستقیم به توربین بادی*، پایان نامه دکتری،

دانشگاه تبریز، شماره ۷۸–۸۵، ۱۳۹۱.

[14] J. A. Wagner, "Numerical analysis of cogging torque in a brushless DC machine," in *IEEE Industry Applications* Soc. Annu. Meeting, pp. 669–673, 1975.

- [32] D. Vizircanu, S. Brisset and P. Brochet, "Design and optimization of a 9-phase axial-flux PM synchronous generator with concentrated winding for direct-drive wind turbine," *Industry Applications Conference*, vol. 4, no. 3, 2006.
- [31] A. Di Gerlando, R. Perini and M. Ubaldini, "Axial flux, regulated field PM synchronous generators with concentrated armature windings," *Proceedings of SPEEDAM*, pp. 349-354, 2004.

زيرنويسها

<sup>1</sup>Cogging

<sup>2</sup> Greatest Common Divider

<sup>3</sup> Mesh