

The Enhancement of the brushless doubly-fed induction machine characteristics using a new rotor circuit

H. Bagheri Naghneh¹, S. Taghipour Boroujeni^{2*}, A. Rabiee³, N. Taghorabet⁴

* Shahrekord University, Shahrekord, Iran

(Received: 18/02/2021; Accepted: 17/04/2021)

Abstract

In the presented work, a new rotor circuit is proposed for a brushless doubly-fed induction machine (BDFIM) with 8-/4-pole power/control winding. Using the proposed rotor circuit, the mutual-coupling of the power winding and the rotor circuit, and consequently the cross-coupling between the power and control windings is increased. Therefore, a BDFIM with a higher torque capacity is obtained. A dynamic model is established for BDFIMs and used as a fast tool to investigate and compare the characteristics of the proposed machine with the extant BDFIMs with parallel and series loops. The dynamic model is founded based on the concept of multiple coupled circuits. The machine magnetizing inductances are the parameters of this model, obtained by using the winding function method. The provided dynamic model is validated by means of the time-stepping finite element analysis. Finally, it is shown that using the proposed rotor circuit, the cross-coupling of the stator windings is increased. Consequently, the magnetizing current and the Joule losses are decreased in the proposed BDFIM machine.

Keywords: Brushless doubly fed induction machines, winding function, dynamic model, finite element analysis, circuits with parallel and series loops.

* Corresponding author E-mail: s.taghipour@sku.ac.ir

بهبود مشخصه ماشین القایی دو سو تغذیه بدون جاروبک با استفاده از یک مدار رتور جدید

حسین باقری نهنه^۱، صمد تقی پور بروجنی^{۲*}، عبدالرضا ربیعی^۳، نورالدین تقربات^۴

۱- دانشجوی دکتری، ۲- دانشیار، ۳- دانشیار، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد، ایران ۴- استاد، دانشگاه لورن، فرانسه

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۳۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۱/۲۸)

چکیده

در مقاله حاضر، یک مدار جدید رتور برای یک ماشین القایی دو سو تغذیه بدون جاروبک (BDFIM) با سیم‌پیچی قدرت ۸ قطب و سیم پیچی کنترل ۴ قطب مطرح شده است. با استفاده از مدار رتور مطرح شده، تزویج متقابل سیم‌پیچی قدرت استاتور و مدار رتور و در پی آن تزویج مقاطع بین سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل استاتور این ماشین افزایش یافته است. بنابراین با استفاده از مدار رتور جدید یک ماشین BDFIM با ظرفیت گشتاور بالاتر به دست آمده است. برای ارزیابی رفتار ماشین یک مدل دینامیکی برای ماشین BDFIM پایه‌گذاری شده است و از آن به‌عنوان یک ابزار سریع جهت بررسی و مقایسه کردن مشخصه‌های ماشین مطرح شده با ماشین‌های BDFIM گذشته با حلقه‌های سری و موازی استفاده شده است. مدل دینامیکی ارائه شده بر مبنای مفهوم مدارهای با تزویج چندگانه بنا نهاده شده است. اندوکتانس‌های مغناطیس‌کنندگی ماشین متغیرهای این مدل هستند و با استفاده از روش تابع سیم‌پیچی به دست آمده‌اند. مدل دینامیکی تهیه شده با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود گذرا مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. در نهایت نشان داده شده است که با استفاده از مدار رتور مطرح شده، تزویج مقاطع بین سیم‌پیچی‌های استاتور افزایش یافته است و در نتیجه آن جریان مغناطیس‌کنندگی و تلفات اهمی در ماشین BDFIM مطرح شده کاهش یافته است.

کلیدواژه‌ها: ماشین القایی دو سو - تغذیه بدون جاروبک، تابع سیم‌پیچی، مدل دینامیکی، روش اجزا محدود، آشیانه با

حلقه‌های سری و موازی

۱. مقدمه

[۷،۸] و یا رتور با حلقه آشیانه‌ای سری [۹] باشند. در میان این ماشین‌های القایی بدون جاروبک، ماشین BDFIM حلقه آشیانه‌ای به‌خاطر ساختار ساده‌تر آن نسبت به ماشین‌های آبخاری و ماشین BDFIM رتور سیم‌پیچی شده بسیار شناخته شده‌تر هستند. بر خلاف ماشین‌های القایی با سیم‌پیچی استاتور دوگانه، ماشین‌های BDFIM حلقه آشیانه‌ای می‌توانند از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت با توان پایین در ژنراتورهای سرعت-متغیر، فرکانس-ثابت کنترل شوند. از این‌رو قسمت زیادی از تحقیقات در این زمینه به تحلیل و بهبود ماشین BDFIM اختصاص یافته است. ماشین‌های BDFIM حلقه آشیانه‌ای دارای معایبی نیز هستند. در مقایسه با ماشین‌های القایی دو سو تغذیه رتور سیم‌پیچی شده، ماشین BDFIM دارای تزویج مغناطیسی متقابل کمتر بین سیم پیچی‌های استاتور، چگالی توان کمتر و تلفات اهمی بیشتری هستند. این مشکلات موانع مهمی برای استفاده وسیع از ماشین BDFIM به‌عنوان ژنراتور در توربین‌های بادی می‌باشند.

ماشین‌های القایی دوسو تغذیه بدون جاروبک به‌عنوان ژنراتور در توربین‌های بادی به‌کار گرفته می‌شوند. ماشین‌های القایی [۱-۱۰] و ماشین‌های سنکرون رلوکتانسی [۱۱ و ۱۲] به‌عنوان ژنراتورهای دوسو تغذیه بدون جاروبک معرفی و استفاده شده‌اند. علاوه بر این، ترکیبی از یک ترانسفورماتور گردان و یک ماشین القایی رتور سیم‌پیچی شده برای کاربردهای بدون جاروبک مطرح شده است [۱۳، ۱۴]. ماشین‌های القایی دوسو تغذیه با ساختار بدون جاروبک شامل ماشین‌های القایی آبخاری با رتور سیم‌پیچی شده [۱، ۲]، ماشین‌های القایی آبخاری با رتور قفسی [۳]، ماشین‌های القایی با سیم‌پیچی استاتور دوگانه [۴، ۵] و ماشین‌های القایی بدون جاروبک (BDFIM) می‌باشند. ماشین‌های القایی بدون جاروبک می‌توانند دارای رتور با حلقه آشیانه‌ای موازی

* نویسنده پاسخگو: s.taghipour@sku.ac.ir

¹ Brushless Doubly Fed Induction Machine

رتور در ماشین‌های BDFIM با حلقه‌های رتور موازی حداقل شده است. با این وجود فقط ماشین BDFIM با مدار رتور حلقه آشیانه‌ای موازی و با ابعاد قاب‌های متفاوت در [۲۶] بررسی شده است. در [۲۷] مشخصه‌های ماشین‌های BDFIM با حلقه‌های سری و موازی رتور با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در [۲۸] مدار رتور با حلقه‌های سری و موازی بهینه‌سازی شده‌اند. با این وجود در [۲۴-۲۸] تنها ماشین‌های BDFIM با مدارهای رتور حلقه آشیانه‌ای موجود بررسی شده‌اند.

در این مقاله سعی شده است مشخصه‌های یک ماشین BDFIM با ۴- قطب در سیم‌پیچی کنترل استاتور و ۸- قطب در سیم‌پیچی قدرت استاتور با به کارگیری یک مدار جدید در رتور بهبود پیدا کند. با استفاده از مدار رتور مطرح شده، تزویج متقابل مدار رتور و PW و در پی آن ظرفیت گشتاور ماشین BDFIM افزایش یافته است. افزایش تزویج متقابل منجر به کاهش جریان مغناطیس‌کنندگی می‌شود. بنابراین تلفات اهمی ماشین مطرح شده در مقایسه با ماشین‌های حلقه آشیانه‌ای کاهش خواهد یافت. در ادامه، در قسمت ۲ توضیح کوتاهی از اصول کار ماشین BDFIM و مدار رتور پیشنهادی ارائه شده است. در ۳، یک مدل دینامیکی برای ماشین‌های BDFIM بنیان نهاده شده است. این مدل دینامیکی بر مبنای استفاده از مدارهای تزویج چندگانه^۵ است. اندوکتانس‌های ماشین متغیرهای مدل دینامیکی هستند و در قسمت ۳ با استفاده از روش تابع سیم‌پیچی به دست آمده‌اند. در ۴ مدل تهیه شده با استفاده از روش اجزای محدود گذرا مورد تایید قرار گرفته است. مدل دینامیکی به دست آمده می‌تواند به عنوان یک ابزار سریع جهت ارزیابی و مقایسه مشخصه‌های ماشین BDFIM پیشنهادی با ماشین‌های BDFIM حلقه آشیانه‌ای موجود مورد استفاده قرار گرفته است. در نهایت در ۵ نشان داده شده است که با استفاده از مدار رتور پیشنهادی، ظرفیت گشتاور ماشین BDFIM افزایش و تلفات اهمی آن کاهش می‌یابد.

۲. مدار رتور مطرح شده

توصیف ساختار و اصول عملکرد ماشین BDFIM در [۸] به تفصیل بیان شده است و برای پرهیز از تکرار در این جا مطرح نمی‌شود. یک ماشین BDFIM شامل یک قاب استاتور با دو مجموعه سیم‌پیچی سه فاز با تعداد قطب‌های متفاوت می‌باشد و این سیم‌پیچ‌ها به نام‌های PW و CW نامیده می‌شوند. چون PW و CW دارای تعداد قطب متفاوتی هستند دارای تزویج مغناطیسی مستقیم نیستند و از طریق یک مدار رتور حلقه آشیانه‌ای

تهیه یک مدل ریاضی دقیق نخستین گام برای مطالعه ماشین‌های BDFIM است. تحلیل اجزای محدود (FEA^۱) به عنوان یک روش عددی برای تحلیل ماشین‌های BDFIM استفاده شده است. استفاده از روش FEA نیازمند به کارگیری حجم بالای محاسباتی است که مانع از بررسی بسیاری از جنبه‌های طراحی ماشین و بررسی کردن شرایط کاری مختلف آن می‌شود. در [۱۵] حجم محاسباتی FEA با استفاده از تکنیک فرمول تفاضلی واپس‌گرا^۲ برای حل معادلات زمانی تفاضلی، کاهش یافته است. با این وجود، مدل مطرح شده در [۱۵] هنوز از سرعت کافی برخوردار نیست. به عنوان مدل‌های سریع، مدل فازوری در [۷،۸] جهت توصیف اصول کار ماشین BDFIM در شرایط ماندگار مطرح شده‌اند. در [۸] مدل فازوری ماشین BDFIM جهت بررسی هارمونیک‌های فاصله هوایی ارتقا یافته است. مدل ارائه شده در [۸] به عنوان یک مدل پایه برای مدل‌های تحلیل در مقالات بعدی چاپ شده مورد استفاده قرار گرفته است. در [۱۸] با استفاده از توسعه مدل مطرح شده در [۸] یک مدل برداری فضای حالت برای ماشین BDFIM مطرح شده است. در [۱۹] هارمونیک‌های ماشین BDFIM مورد مطالعه قرار گرفته است و در [۲۰] ضربان گشتاور این ماشین مورد بررسی قرار گرفته است. مدل‌های دیگری برای بررسی اثر کج شدن شیارها [۲۱] و تلفات آهنی [۲۲] در ماشین BDFIM ارائه شده است. در [۲۳] بر مبنای جمع آثار میدان‌های گردان، توزیع چگالی شار در دندانه‌های استاتور و آهن پشته ماشین BDFIM در سرعت‌های مختلف به دست آمده است.

اگر چه قسمت زیادی از تحقیقات به تحلیل ماشین‌های BDFIM اختصاص یافته است اما قسمت بسیار کمی از آنها به بهبود مشخصه‌های ماشین پرداخته‌اند. اثر مدار رتور در چگالی توان ماشین BDFIM در [۹، ۲۴-۲۸] مطالعه شده است. در [۹] یک ماشین BDFIM حلقه آشیانه‌ای با میله‌های رتور سری به جای استفاده از رتور حلقه آشیانه‌ای با حلقه‌های موازی مطرح و بررسی شده است و چگالی توان ماشین و بازده آن به وسیله بهینه‌سازی موقعیت میله‌های رتور بهبود یافته است. در [۲۴] نشان داده شده است که ترکیب تعداد قطب‌ها اثر چندانی بر گشتاور خروجی و جریان مغناطیس‌کنندگی ماشین BDFIM ندارد. اثر ترکیب‌های تعداد قطب‌ها، تعداد شاخه‌های موازی، نوع سیم‌پیچی‌ها و اتصالات آنها بر روی تزویج متقابل سیم‌پیچی‌های کنترل و قدرت (PW^۳ و CW^۴) در [۲۵] مطالعه شده است. در [۲۶] با استفاده از بهینه‌سازی موقعیت میله‌های رتور، امپدانس

^۱ Finite Element Analysis

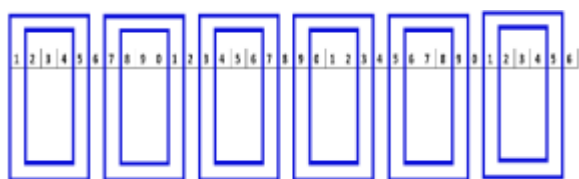
^۲ Backward Differential Formula Technique

^۳ Control Winding

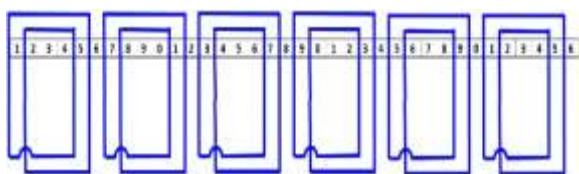
^۴ Power Winding

^۵ Multiple Coupled Circuits

مکانیکی منظور شده‌اند. معادلات ولتاژ مدارهای در نظر گرفته شده و نیز معادلات مکانیکی رتور به دست آمده‌اند. اندوکتانس‌ها به‌عنوان یک جزء مهم معادلات ولتاژ باید معلوم باشند. در ادامه با استفاده از روش تابع سیم‌پیچی، اندوکتانس‌های خودی و متقابل به دست آمده‌اند. لازم است به این نکته توجه شود که چون شکل موج دقیق اندوکتانس‌های مدار تزویج شده از طریق روش تابع سیم‌پیچی به دست آمده‌اند، می‌توان اظهار کرد که همه هارمونیک‌های فضایی در نظر گرفته شده‌اند.

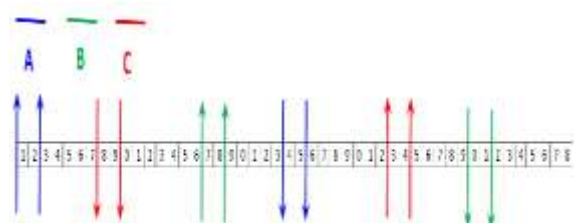


(الف)

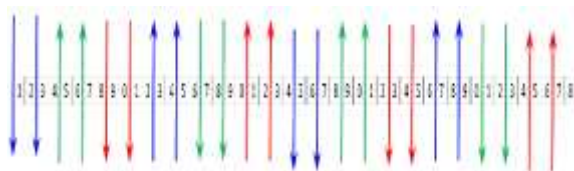


(ب)

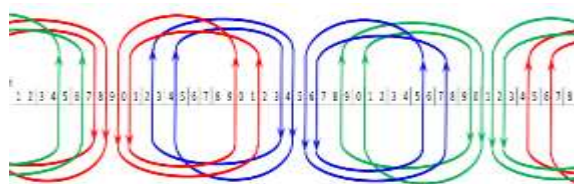
شکل (۱): آشیانه‌های رتور ماشین BDFIM با حلقه‌های (الف) موازی ب سری



(الف)



(ب)



(ج)

مخصوص با حلقه‌های موازی و سری که در شکل (۱). (الف) و (ب) نشان داده شده‌اند با هم تزویج می‌شوند. لازم است این نکته توضیح داده شود که برای داشتن تزویج متقابل بین CW و PW تعداد آشیانه‌های رتور باید برابر $P_p + P_c$ باشند که P_c و P_p به ترتیب تعداد زوج قطب‌های CW و PW هستند. در این ماشین‌ها، سرعت رتور برابر با (۱) است، که در آن f_p و f_c به ترتیب فرکانس‌های CW و PW هستند.

$$\omega_m = 2\pi \frac{f_p + f_c}{P_p + P_c} \quad (۱)$$

برای ارایه ساختار جدید دو سیم‌پیچی رتور با دو قطب و چهار قطب و ۴۸ شیار که به ترتیب در شکل (۲). (الف) و (ب) نشان داده‌اند. سیم پیچی ۲ قطب دارای یک گام کوتاهی شیار است. این سیم‌پیچی‌ها می‌توانند بر روی یک رتور ۴۸ شیار قرار گیرند و با توالی فاز معکوس به یکدیگر متصل شوند تا رتور یک ماشین القایی بدون جاروبک ۶ قطب را تشکیل دهند. بنابراین جریان فازها از یک رتور از سیم‌پیچی خارج شده و به سیم‌پیچی رتور دیگر وارد می‌شوند. جهت جریان‌ها در شکل‌های (۲). (الف) و (ب) مشخص شده است. سر بندی کلاف‌ها در این شکل‌ها آورده نشده است. با ترکیب نقشه سیم‌پیچی‌ها در شکل (۲). (الف) و (ب)، نقشه سیم‌پیچی رتور در شکل (۲). (ج) به دست می‌آید. برای سیم‌پیچی راحت‌تر رتور پیشنهادی کافی است ابتدا مدارهای سیاه رنگ در شکل (۲). (د) در شیارها جای داده شوند و پس از آن مدارهای بنفش بر روی آنها قرار گیرند.

مدار رتور پیشنهادی در شکل (۱). (ج) نشان داده شده است. مدار رتور پیشنهادی شامل شش مدار جداگانه است. برای ساده‌سازی ساخت، بهتر است که مدارهای آبی رنگ پس از مدارهای قرمز رنگ درون شیارهای رتور قرار گیرند. در ادامه با استفاده از مفهوم مدارهای با تزویج چندگانه برای بررسی عملکرد ماشین BDFIM پیشنهادی و موجود یک مدل دینامیکی ارایه شده است.

۳. مدل سازی دینامیکی

به منظور تهیه کردن یک مدل دینامیکی برای ماشین BDFIM، از مفهوم مدارهای با تزویج چندگانه جهت استخراج معادلات فضای حالت آن استفاده شده است. در واقع مدارهای استاتور و هر یک از مدارهای رتور به‌عنوان یک مدار جداگانه در نظر گرفته شده است و شار پیوندی آنها به‌عنوان متغیرهای حالت الکتریکی لحاظ شده‌اند. موقیت و سرعت رتور نیز به‌عنوان متغیرهای حالت

آنها منظور از "diag" ماتریس‌های قطری است. در ماشین BDFIM پیشنهادی ۱۲ مدار شامل ۶ مدار در رتور و دو مجموعه سیم‌پیچی سه فاز در استاتور وجود دارد.

$$\begin{aligned} \lambda_{si} &= [\lambda_{asi} \quad \lambda_{bsi} \quad \lambda_{csi}]^T, \quad i=p \text{ or } c \\ \mathbf{I}_{si} &= [I_{asi} \quad I_{bsi} \quad I_{csi}]^T \\ \mathbf{V}_{si} &= [V_{asi} \quad V_{bsi} \quad V_{csi}]^T \\ \lambda_r &= [\lambda_{rc1} \quad \lambda_{rc2n} \quad \dots \quad \lambda_{rc6}]^T \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{sp} &= \text{diag}(R_{sp}, R_{sp}, R_{sp}) \\ \mathbf{R}_{sc} &= \text{diag}(R_{sc}, R_{sc}, R_{sc}) \\ \mathbf{R}_r &= \text{diag}(R_r, R_r, R_r, R_r, R_r, R_r) \end{aligned} \quad (6)$$

بعلاوه، جریان‌های مدارهای ماشین را می‌توان با استفاده از (۷) محاسبه کرد.

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}(\theta_r)^{-1} \lambda^T \quad (7)$$

که در آن \mathbf{L} ماتریس اندوکتانس داده شده در (۸) است. ماتریس اندوکتانس نشتی را می‌توان به صورت یک ماتریس قطری در نظر گرفت که در (۹) بیان شده است.

$$\mathbf{L}(\theta_r) = [L_{ij}(\theta_r)] + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{isp} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{isc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_{ir} \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{L}_{isp} &= \text{diag}(L_{isp}, L_{isp}, L_{isp}) \\ \mathbf{L}_{isc} &= \text{diag}(L_{isc}, L_{isc}, L_{isc}) \\ \mathbf{L}_{ir} &= \text{diag}(L_{lr}, L_{lr}, L_{lr}, L_{lr}, L_{lr}, L_{lr}) \end{aligned} \quad (9)$$

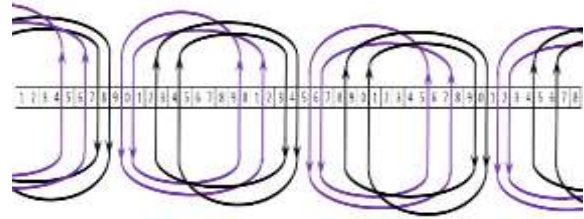
معادلات فضای حالت مکانیکی در (۱۰) به دست آورده شده‌اند، که در آنها T_e و T_m گشتاور الکتریکی و گشتاور مکانیکی هستند. گشتاور الکترومغناطیسی از (۱۱) می‌تواند به دست بیاید.

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r \quad (10)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_e - T_m}{J}$$

$$T_e = \frac{1}{2} \mathbf{I}^T \frac{\partial \mathbf{L}(\theta_r)}{\partial \theta_r} \mathbf{I} \quad (11)$$

یادآور می‌شود، در معادلات حالت از روابط ولتاژ KVL استفاده شده است. در این روابط ولتاژ اندوکتانس‌ها نقش مهمی را ایفا



(د)

شکل (۲): سیم‌پیچی رتور ماشین ۴۸ شیار الف) ۲ قطب با یک شیار کوتاه‌گام ب) ۴ قطب با گام کامل، ج) ماشین پیشنهادی و د) سیم‌پیچی نهایی

۳-۱. اندوکتانس‌ها

با استفاده از تعریف اندوکتانس‌های خودی و متقابل، اندوکتانس‌های خودی مدار λ_m و اندوکتانس‌های متقابل آن با مدار λ_m در (۲) ارائه شده است [۲].

$$L_{ii}(\theta_r) = \frac{\mu_0 L_{stk} R_s}{g} \int_0^{2\pi} N_i^2(\phi_s, \theta_r) d\phi_s \quad (12)$$

$$L_{ij}(\theta_r) = \frac{\mu_0 L_{stk} R_s}{g} \int_0^{2\pi} N_i(\phi_s, \theta_r) N_j(\phi_s, \theta_r) d\phi_s$$

که μ_0 و ϕ_s ، g ، L_{stk} ، R_s به ترتیب شعاع داخلی استاتور، طول پشته ماشین، طول فاصله هوایی، موقعیت زاویه‌ای در قاب مرجع استاتور و گذردهی مغناطیسی هوا هستند. به علاوه N_i و N_j تعداد دورهای تجمعی مدارهای i و j هستند که به صورت زیر تعریف می‌شوند.

$$\begin{aligned} N_i(\phi_s, \theta_r) &= n_i(\phi_s, \theta_r) - \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} n_i(\phi_s, \theta_r) d\phi_s \\ n_i(\phi_s, \theta_r) &= \int_0^{\phi_s} n_i(\phi_s, \theta_r) d\phi_s \end{aligned} \quad (13)$$

۳-۲. مدل فضای حالت

با استفاده از معادلات ولتاژ مدارهای در نظر گرفته شده، معادلات فضای حالت الکتریکی به صورت (۴) به دست می‌آیند.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{sp} \\ \lambda_{sc} \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{sp} \\ \mathbf{V}_{sc} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{sp} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{sc} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{sp} \\ \mathbf{I}_{sc} \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix} \quad (14)$$

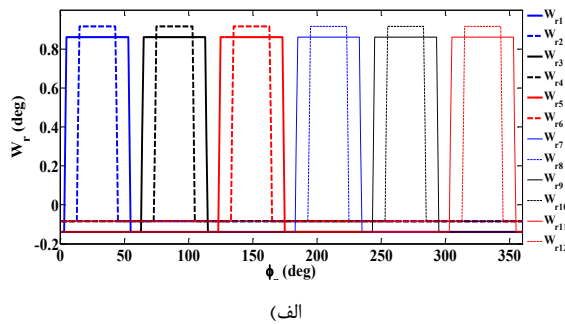
که در آن \mathbf{V} ، \mathbf{I} و λ به ترتیب متغیرهای جریان، ولتاژ و شارهای پیوندی هستند که در (۵) معرفی شده‌اند و زیرنویس‌های s و r به ترتیب نماینده رتور و استاتور هستند. همچنین ماتریس‌های مقاومت رتور و استاتور در (۶) داده شده‌اند، که در

$\cdot/\cdot \mu\text{H}$	$L_{L, RB}$	اندوکتانس نشتی میله‌های رتور
$\cdot/\cdot \text{mH}/\cdot/\cdot \text{mH}$	L_{Lsp}/L_{Lsc}	اندوکتانس نشتی PW/CW
$\cdot/\cdot \Omega/\cdot/\cdot \Omega$	r_{sp}/r_{sc}	مقاومت PW/CW
$\cdot/\cdot \text{mm}$	g	طول فاصله هوایی

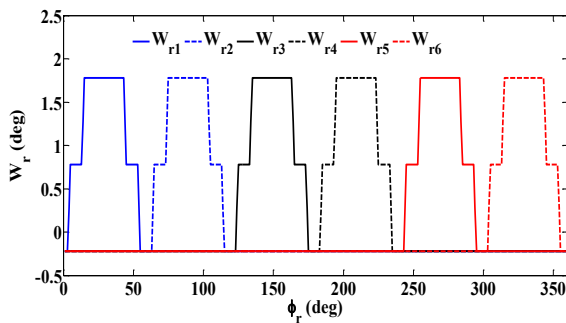
می‌کنند. این اندوکتانس‌های خودی و متقابل توسط روش تابع سیم‌پیچ در قسمت ۳-۱ به دست آمده‌اند.

۴. تحلیل و تایید نتایج

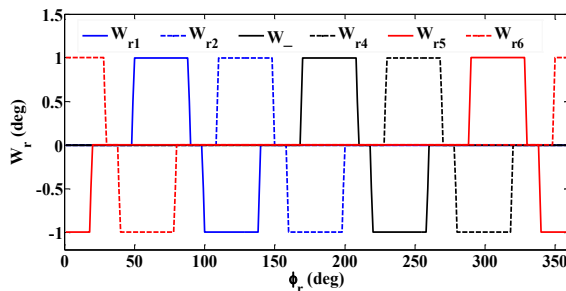
برای تایید مدل تهیه شده، نتایج آن با نتایج به دست آمده از FEA گذرا مقایسه شده‌اند. از نرم افزار Flux-Altair دو بعدی برای شبیه‌سازی استفاده شده است. همچنین، با استفاده از مدل دینامیکی توسعه داده شده، مشخصه‌های ماشین BDFIM با مدار رتور پیشنهادی و رتورهای حلقه آشیانه‌ای موجود مقایسه شده‌اند. به این منظور مشخصات هندسی استاتور ماشین بررسی شده در [۳۰] مورد استفاده قرار گرفته است. این مشخصات در جدول (۱) گزارش شده است. تابع سیم‌پیچی رتور حلقه آشیانه‌ای با حلقه سری و موازی در هر آشیانه و نیز تابع سیم‌پیچی مدار رتور پیشنهادی در شکل (۳). (الف)-(ج) نشان داده شده‌اند. مقادیر اندوکتانس‌های خودی سیم‌پیچ‌های استاتور و اندوکتانس‌های متقابل آنها با استفاده از (۲) و با لحاظ نمودن توابع شکل (۳) به دست آمده و در شکل‌های (۴) و (۵) نشان داده شده است. از شکل‌های (۴)، (ج) و (۵)، مشخص است که دقت تابع سیم‌پیچ در مقایسه با روش ازای محدود بسیار مناسب است. همچنین در شکل‌های (۴) و (۵) مشخص است که در مقایسه با مدارهای رتور موجود، اندوکتانس‌های متقابل مدار رتور و سیم‌پیچی‌های استاتور برای مدار رتور پیشنهادی سینوسی‌تر هستند. همچنین، اندوکتانس‌های متقابل مدار رتور و PW در ماشین با رتور پیشنهادی بیشتر هستند. پی آمد این اندوکتانس‌های متقابل بزرگتر در طرح پیشنهادی کاهش جریان مغناطیس‌کنندگی مورد نیاز کمتر در PW است. این موضوع کاهش توان راکتیو جاری شده در CW و مدار رتور و در نهایت بهبود تنظیم ولتاژ و کاهش تلفات اهمی ماشین را در پی خواهد داشت.



(الف)

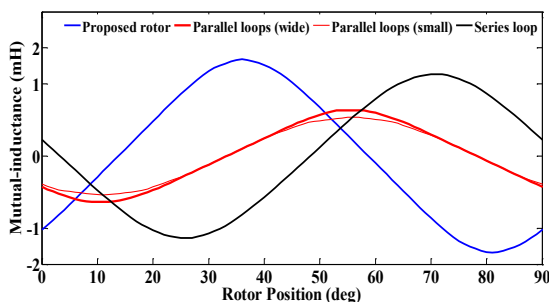


(ب)



(ج)

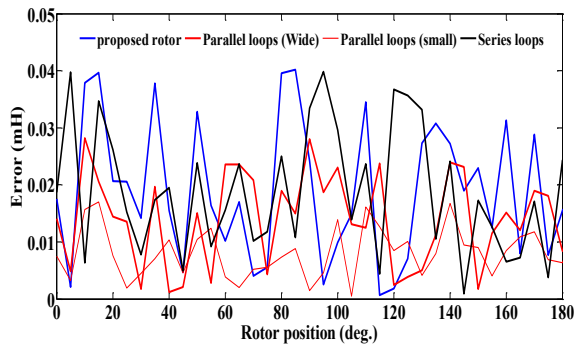
شکل (۳): تابع سیم‌پیچی مدارهای رتور با (الف) حلقه آشیانه‌ای موازی (ب) حلقه آشیانه‌ای سری (ج) مدار رتور مطرح شده



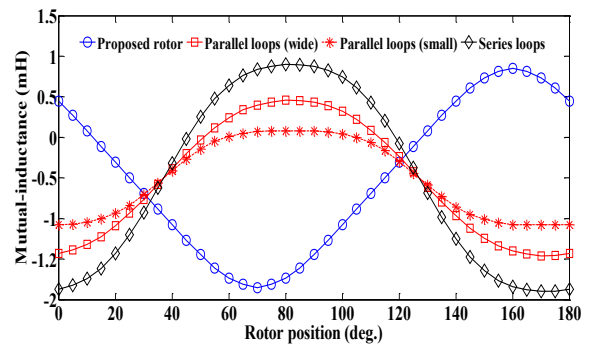
(الف)

جدول (۱): مؤلفه‌های ماشین BDFIM در نظر گرفته شده [۳۰]

مؤلفه	نماد	مقدار
تعداد زوج قطب‌های PW/CW	p_p/p_c	۴/۲
تعداد دورهای یک فاز PW/CW	N_p/N_c	۳۲۰/۱۶۰
طول پشته	L_{stk}	۱۹۰ mm
شعاع داخلی استاتور	r	۹۰ mm
تعداد شیارهای استاتور/رتور	Q_s/Q_r	۲۸/۲۴
مقاومت میله‌های رتور	R_{RB}	۳۰ $\mu\Omega$



(ج)



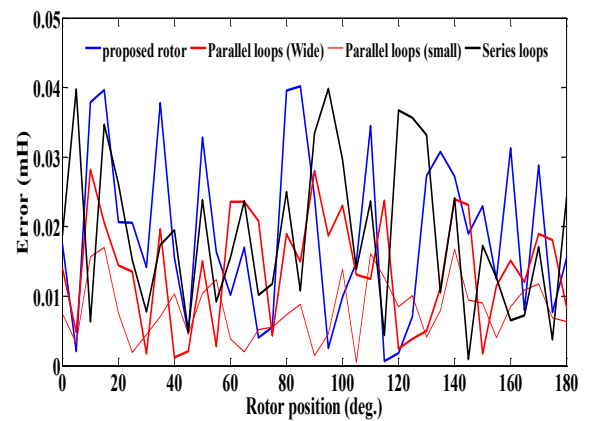
(ب)

شکل (۵): اندوکتانس‌های متقابل بین مدارهای رتور و CW به‌دست آمده از الف) روش تابع سیم‌پیچی (ب) FEA. ج) خطای میان FEA و روش تحلیلی

همچنین، اندوکتانس متقابل بزرگتر بین PW و مدار رتور سبب ایجاد گشتاور بیشتر و نیز ولتاژ القا شده بیشتری در PW می‌شود. جهت بررسی این موضوع، در سرعت رتور در ۵۰۰ rpm، ولتاژهای DC برابر با $V_a=3V$ ، $V_b=V_c=-1.5V$ به CW وصل شده و یک بار همی سه فاز برابر $R_l=25.5\Omega$ به PW متصل شده است. گشتاور، ولتاژ فاز PW و جریان‌های رتور ماشین‌های BDFIM به دست آمده با مدل تحلیلی و FEA گذرا برای ماشین‌های القایی با رتور پیشنهادی، با رتور با حلقه‌های سری و رتور با حلقه‌های موازی به‌ترتیب در شکل‌های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. تعداد مش‌ها، زمان شبیه‌سازی و گام آن در FEA گذرا به‌ترتیب برابر ۴۷۹۲۶، ۰/۵S و ۱ms هستند. زمان شبیه‌سازی مورد نیاز در FEA گذرا و مدل تهیه شده به‌ترتیب برابر ۱۳۵S و ۱/۸S است. نتایج شبیه‌سازی در جدول (۲) به‌صورت خلاصه آورده شده است.

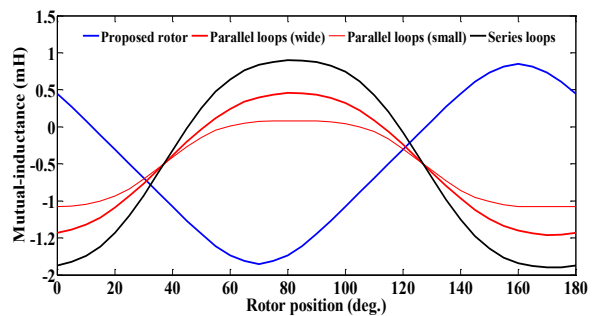
جدول (۲): مشخصه‌های ماشین BDFIM وقتی که ولتاژ DC به سیم‌پیچی CW آن و یک بار سه فاز $R_l=25.5\Omega$ به PW آن متصل شده است.

متغیرهای حالت ماندگار	مدار پیشنهادی		مدارهای موازی		مدارهای سری	
	Mode 1	FE A	Model	FEA	Mode 1	FEA
گشتاور	۱۰/۲	۱۰/۵	۷/۰۵	۷	۷/۱	۷/۲
ضربان گشتاور (peak-peak)	۲/۳	۱/۹	۲/۲	۱/۴	۱/۲	۰/۶
I_{s2} (A)	۶		-۳		-۳	
I_{rb} -peak (A)	۳۱۲	۳۱۵	۳۲۴	۳۳۸	۲۹۳	۲۹۸
			۲۲۰	۲۳۰		
V_{s1} -peak (V)	۹۳/۵	۹۰	۷۸	۷۳	۷۸	۷۴
V_{s2} (V)	۳ V DC		-۱/۵V DC		-۱/۵V DC	

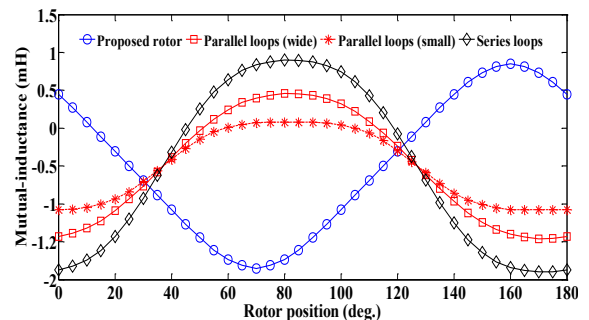


(ج)

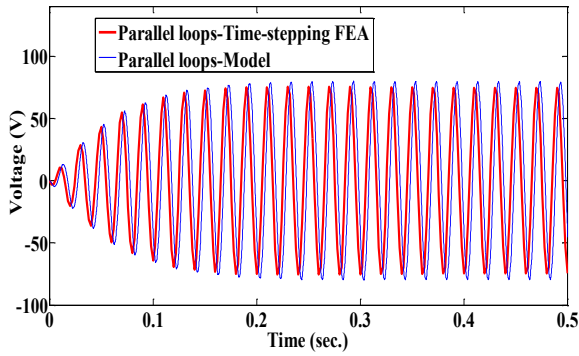
شکل (۴): اندوکتانس‌های متقابل بین مدارهای رتور و PW به‌دست آمده از الف) روش تابع سیم‌پیچی (ب) FEA. ج) خطای میان FEA و روش تحلیلی



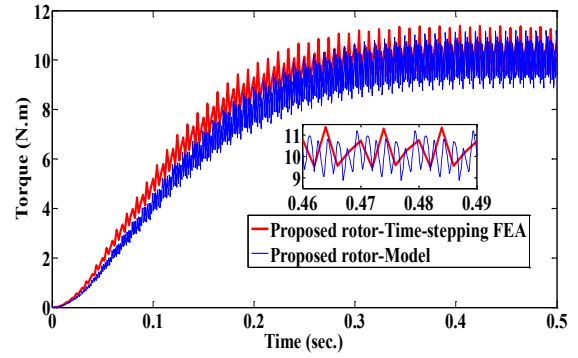
(الف)



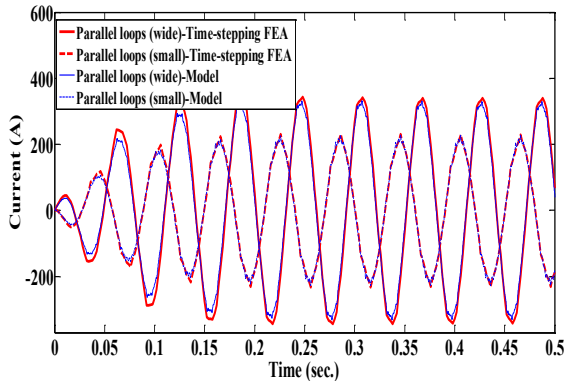
(ب)



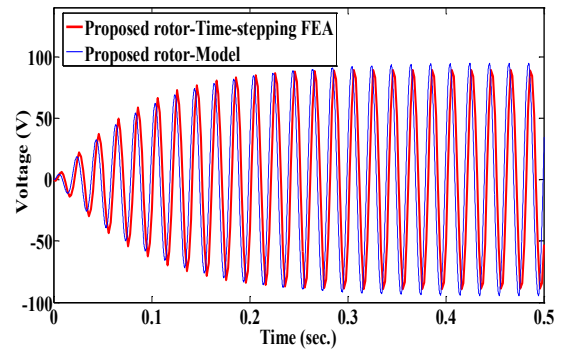
(ب)



(الف)

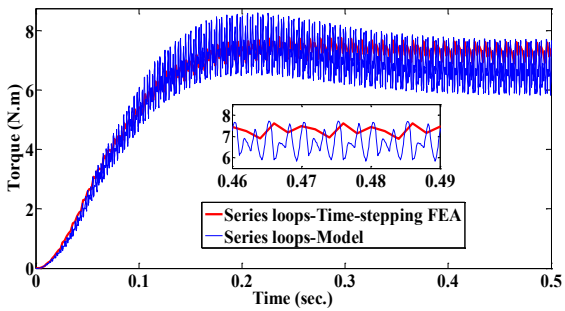


(ج)

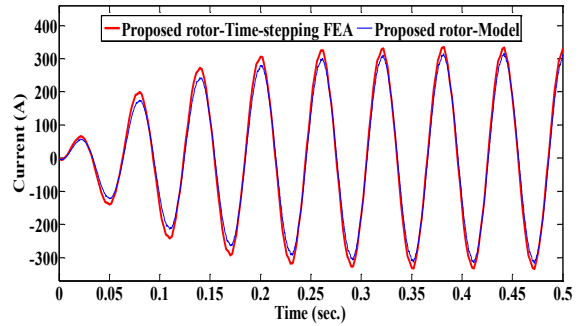


(ب)

شکل (۷): (الف) گشتاور (ب) ولتاژ PW (ج) جریان‌های رتور ماشین BDFIM با رتور با حلقه های موازی، درحالی که PW یک مجموعه بار اهمی سه فاز و $R_r=25.5\Omega$ و CW به ولتاژهای متصل شده‌اند.

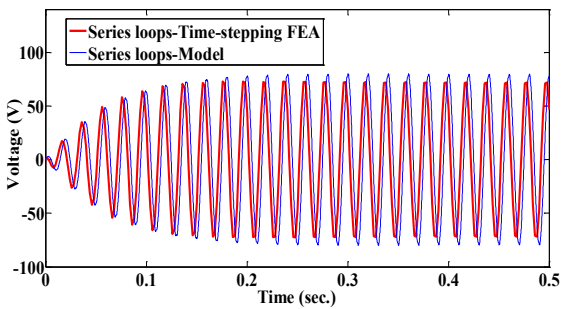


(الف)

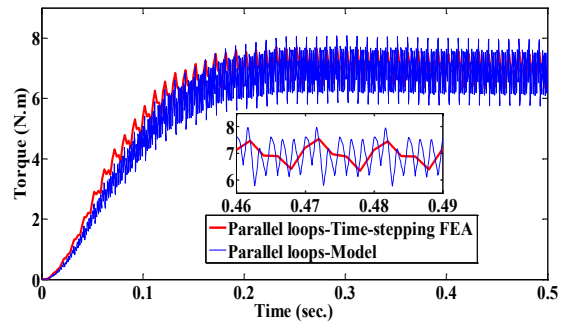


(ج)

شکل (۸): (الف) گشتاور (ب) ولتاژ PW (ج) جریان‌های رتور ماشین BDFIM با رتور پیشنهادی، درحالی که PW یک بار اهمی سه فاز و $R_r=25.5\Omega$ و CW به ولتاژهای متصل شده‌اند.



(ب)

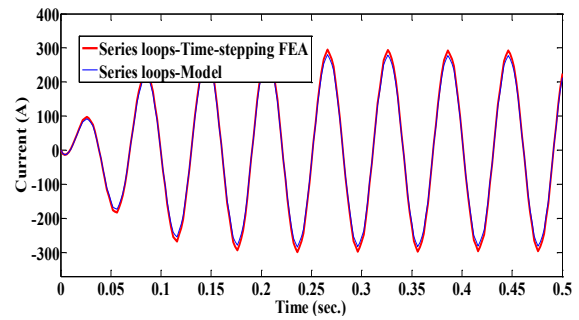


(الف)

حلقه های موازی به ترتیب در شکل های ۹، ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است. تعداد مش‌ها، مدت زمان شبیه سازی و گام آن به ترتیب برابر ۴۷۹۲۶، ۰/۵S و ۱ms هستند. مدت زمان طول کشیده جهت شبیه سازی در FEA گذرا و مدار تهیه شده به ترتیب برابر ۱۵۲۷S و ۲/۲S است. مشخصه های ماشین های BDFIM مطالعه شده در جدول ۳. خلاصه شده است. همان گونه که در جدول و شکل های ۹ تا ۱۱ دیده می شود برای داشتن گشتاور الکترومغناطیسی یکسان (۱۹/۵N.m) و ولتاژ یکسان ۱۳۰۷ و جریان یکسان ۵A در PW، جریان های مدار رتور و CW در ماشین BDFIM پیشنهادی از همه جریان های نظیرشان در ماشین های BDFIM موجود کمتر است. جریان کمتر در مدار رتور و CW، تلفات اهمی کل ماشین BDFIM پیشنهادی را کاهش می دهد. جریان کمتر در CW نتیجه مستقیم جریان مغناطیس کنندگی کمتر در PW در ماشین BDFIM پیشنهادی است. یادآور می شود، بار در ماشین های بررسی شده (۹۹۵W) فرض شده است. ذکر این نکته حائز اهمیت است که ثابت اختلاف بین نتایج FEA و مدل مطرح شده در جدول های ۲ و ۳ و شکل های ۷ تا ۱۱ ناشی از تخمین غیر دقیق اندوکتانس های نشی رتور و استاتور است، با این وجود تخمین پارامترها موضوع این مقاله نیست و می توان آن را در [۳۱ و ۳۲] یافت.

جدول (۳): مشخصه های ماشین BDFIM وقتی که ولتاژ AC به CW اعمال شده است و یک بار مقاومتی سه فاز به PW متصل شده است.

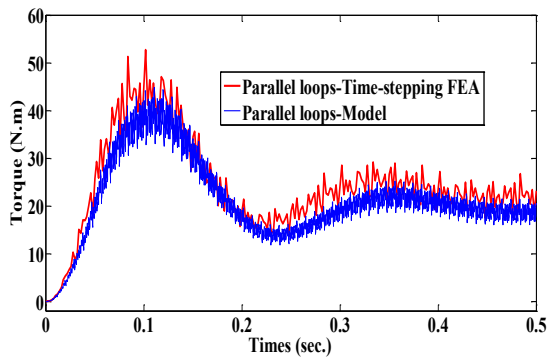
متغیرهای حالت ماندگار	مدار مطرح شده		مدارهای موازی		مدارهای سری	
	Mode 1	FEA	Mode 1	FEA	Mode 1	FEA
گشتاور	۱۹/۵	۲۰/۱	۱۹/۵	۲۰	۱۹/۵	۲۰
ضربان گشتاور (peak-peak)	۳/۵	۵	۵	۷/۸	۴/۵	۶/۱۸۵
I_{s1} -peak (A)	۵/۱		۵/۱		۵/۱	
I_{s2} -peak (A)	۷/۵	۸/۲	۹/۴	۱۱/۸	۹/۳	۱۱/۲
I_{rb} -peak (A)	۴۵۰	۴۶۳	۵۸۰	۶۳۰	۴۷۰	۵۱۴
			۳۵۰	۳۷۰		
V_{s1} -peak (V)	۱۸		۱۶		۱۶	
V_{s2} -peak	۱۳۰		۱۳۰		۱۳۰	
تلفات اهمی (W)	۶۹	۷۸	۹۴	۱۳۶	۹۲	۱۲۳
تلفات هسته (W)	--	۱۱۶	--	۱۲۷	--	۱۲۲



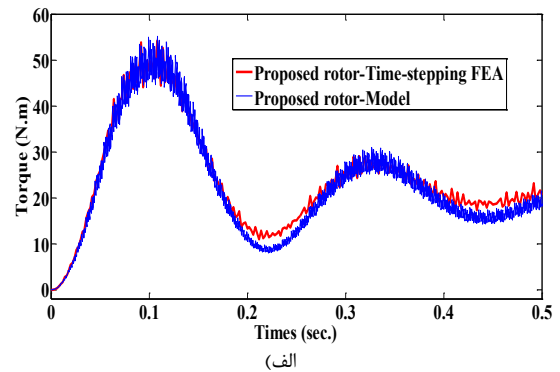
ج

شکل (۸): الف) گشتاور ب) ولتاژ PW ج) جریان های رتور ماشین BDFIM با رتور با حلقه های سری، در حالی که PW یک مجموعه بار اهمی سه فاز و $R_f=25.5\Omega$ و CW به ولتاژهای DC متصل شده اند.

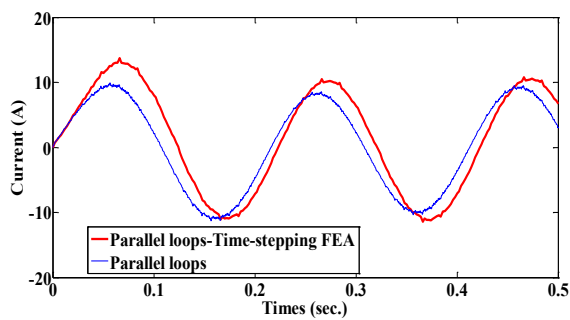
بیان این نکته مهم است که فرکانس ولتاژ القا شده در PW در همه شبیه سازی ها ۵۰ Hz به دست آمده است. از روی نتایج به دست آمده می توان نتیجه گرفت که ظرفیت تولید گشتاور ماشین BDFIM با مدار پیشنهادی بیشتر از ظرفیت تولید گشتاور ماشین های BDFIM موجود با مدارهای حلقه ای آشیانه ای است. لازم به ذکر است که در شبیه سازی ارایه شده، CW در مد سنکرون است در حالی که PW مانند یک ژنراتور القایی با لغزش $s_p = -0.67$ عمل می کند. در این شرایط امپدانس رتور در CW بازتاب نشده و امپدانس تونن دیده شده از CW تنها ناشی از امپدانس نشی CW است. البته، در اغلب زمان ها، فرض می شود که CW در مد غیرسنکرون عمل می کند. در یک چنین شرایطی، امپدانس رتور بازتاب شده روی جریان CW، ولتاژ PW و در نتیجه آن روی گشتاور اثر می گذارد. به منظور بررسی عملکرد ماشین BDFIM در چنین شرایطی، سرعت رتور در ۵۵۰ rpm ثابت شده است، یک بار اهمی سه فاز ($R_f=25.5\Omega$) به ترمینال های PW متصل شده است و CW با یک منبع ولتاژ سه فاز متعادل تحریک شده است. دامنه و فرکانس منبع ولتاژ به گونه ای انتخاب شده است که ولتاژ سه فاز با فرکانس ۵۰ Hz و دامنه ۱۳۰۷ در PW تولید شود. برای ایجاد چنین شرایطی نیاز است که یک ولتاژ متعادل ۵ Hz به CW اعمال شود. با استفاده از مدل تهیه شده و FEA گذرا، گشتاور الکترومغناطیسی، جریان های CW و مدارهای شکل های (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. تعداد مش ها، زمان شبیه سازی و گام آن در FEA گذرا به ترتیب برابر ۴۷۹۲۶، ۰/۵ms و ۱ms هستند. زمان شبیه سازی مورد نیاز در FEA گذرا و مدل تهیه شده به ترتیب برابر ۱۳۵S و ۱/۸S است. نتایج شبیه سازی در جدول (۲) به صورت خلاصه آورده شده است. رتور و شکل موج های ولتاژ بار به دست آمده است و برای ماشین های القایی با رتور پیشنهادی، با رتور با حلقه های سری و رتور با



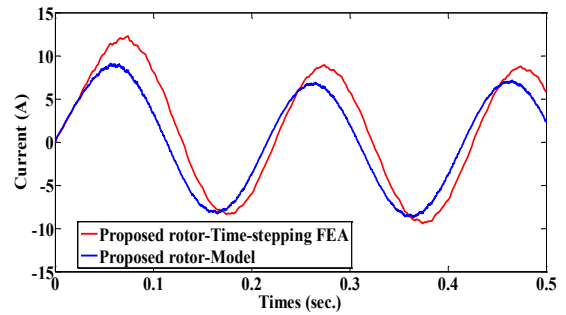
(الف)



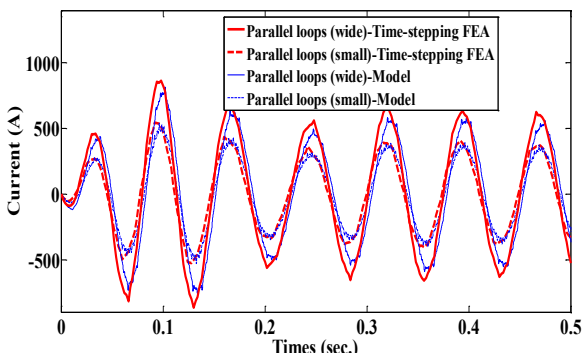
(الف)



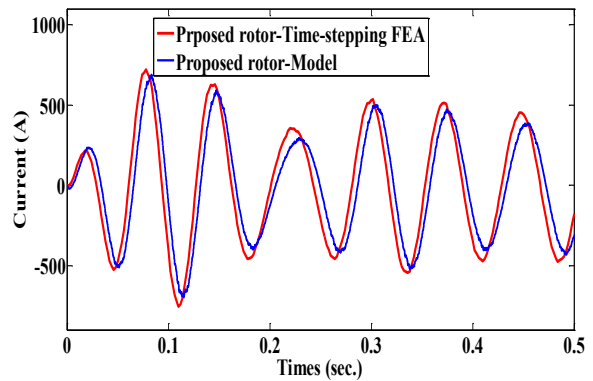
(ب)



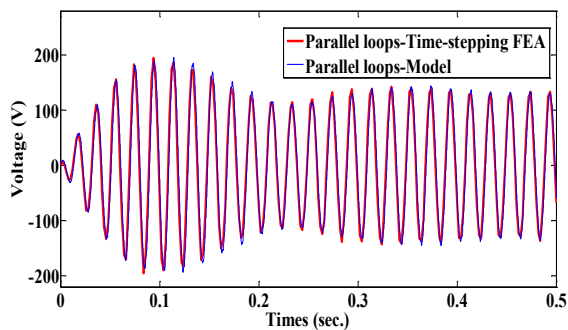
(ب)



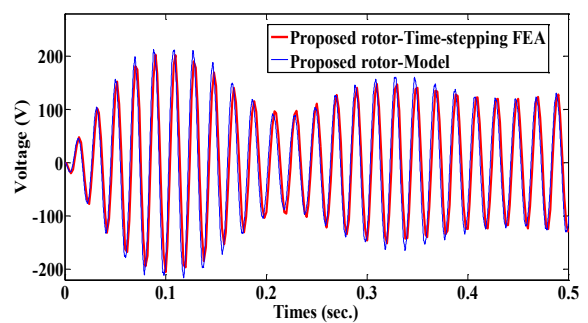
(ج)



(ج)



(د)



(د)

شکل (۱۰): (الف) گشتاور (ب) جریان CW (ج) جریان های رتور (د) ولتاژ بار ماشین BDFIM با رتور با حلقه های موازی در حالیکه PW به یک بار سه فاز اهمی و CW به ولتاژهای AC متصل شده است.

شکل (۹): (الف) گشتاور (ب) جریان CW (ج) جریان های رتور (د) ولتاژ بار ماشین BDFIM با مدار رتور پیشنهادی در حالی که PW به یک بار سه فاز اهمی و CW به ولتاژهای AC متصل شده است.

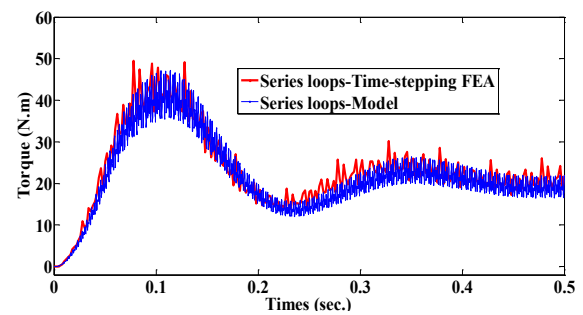
تحریک ماشین است. اندوکتانس‌های ناشی از آزمایش رتور قفل شده در روش اجزای محدود به دست آمده‌اند. همچنین ماشین به صورتی که تحریک شده است که چگالی شار کاری هسته کوچکتر و مساوی نقطه زانویی منحنی اشباع (۱/۵ تسلا) باشد. بنابراین حتی با چشم‌پوشی از اشباع و تلفات هسته (که تکنیکی رایج در برپایی مدل دینامیکی ماشین‌ها است نتایج مدل و روش اجزای محدود گذرا سازگاری خوبی دارند.

۵. نتیجه گیری

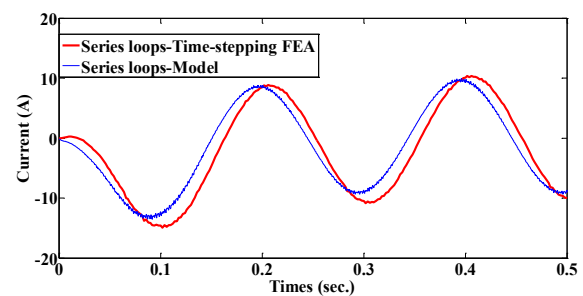
در مقاله حاضر، یک مدار رتور جدید برای ماشین BDFIM پیشنهاد شده است. هدف اصلی بهبود توزیع مغناطیسی متقابل بین PW و CW است. این هدف با افزایش اندوکتانس‌های متقابل مدار رتور و PW به دست آمده است. جهت مقایسه عملکرد ماشین BDFIM پیشنهادی با ماشین‌های موجود یک مدل دینامیکی فضای حالت تهیه شده است. اندوکتانس‌های مدل دینامیکی با استفاده از روش تابع سیم‌پیچی به دست آمده است. اعتبار مدل دینامیکی ارایه شده با استفاده از روش FEA گذرا تایید شده است. با استفاده از مدل دینامیکی تهیه شده و نیز FEA گذرا، عملکرد ماشین BDFIM پیشنهادی در شرایط سرعت سنکرون و آسنکرون به دست آورده شده و با ماشین‌های BDFIM موجود مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده بهبود در توزیع مغناطیسی متقابل میان سیم‌پیچی‌های توان و کنترل در استاتور ماشین پیشنهادی است. در نتیجه این افزایش اندوکتانس متقابل، نسبت به ماشین BDFIM موجود، در ماشین پیشنهادی گشتاور افزایش، جریان‌ها در CW و نیز مدار رتور کاهش و تلفات اهمی کل نیز کاهش یافته است.

۶. مراجع

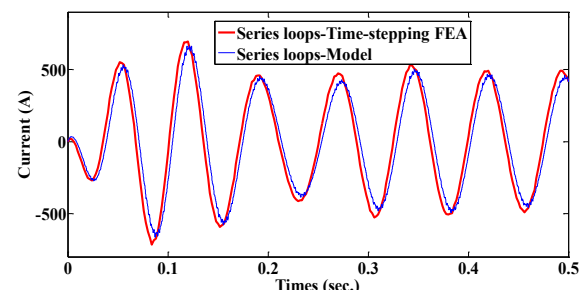
- [1] G. Esfandiari, M. Ebrahimi, A. Tabesh, and M. Esmaeilzadeh, "Dynamic Modeling and Analysis of Cascaded DFIMs In an Arbitrary Reference Frame," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 30, no. 3, pp. 999-1007, Sep. 2015.
- [2] N. Patin, E. Monmasson, and J. Louis, "Modelling and Control of a Cascaded Doubly Fed Induction Generator Dedicated to Isolated Grids," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 56, no. 10, pp. 4207-219, Oct. 2009.
- [3] S. Thaghipour Boroujeni, "Complex vector modeling of a doubly fed cascaded cage rotor induction machine," Journal of Electr. Eng Springer, vol. 102, pp. 1831-1842, Sep. 2020.
- [4] S. Basak and C. Chakraborty, "Dual Stator Winding Induction Machine: Problems Progress and Future Scope," Trans. Ind. Elec., vol. 62, no. 7, pp. 4641-4652, July 2015,



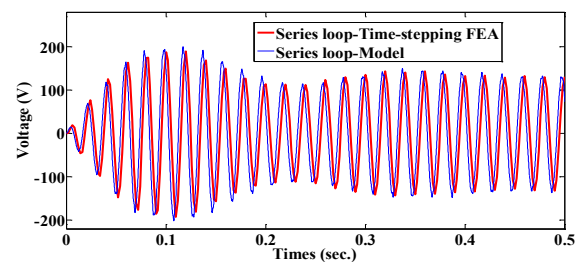
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل (۱۱): (الف) گشتاور (ب) جریان CW (ج) جریان‌های رتور (د) ولتاژ بار ماشین BDFIM با رتور با حلقه‌های سری در حالی که PW به یک بار سه فاز اهمی و CW به ولتاژهای AC متصل شده است.

شایان یادآوری است که با وجود چشم‌پوشی از اشباع مغناطیسی و تلفات هسته در مدل فضای حالت پیشنهادی و منظور نمودن آنها در روش اجزای محدود گذرا، تطابق خوبی میان نتایج آنها در شکل‌های (۶-۱۰) وجود دارد. دلیل این موضوع استفاده از مقادیر دقیق اندوکتانس‌های ناشی و نحوه

- [19] F. Blazquez, C. Veganzones, D. Ramirez, and C. Platero, "Characterization of the Rotor Magnetic Field in a Brushless Doubly-Fed Induction Machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 24, no.3, pp. 599 – 607, Sep 2009,
- [20] J. Chen and W. Zhang, "Harmonics in brushless doubly fed induction generator for torque ripple analysis and modeling," *IEEE Trans. Magn.*, vol.50, no.11, pp. 8203604, 2014.
- [21] X. Wang, T. D. Strous, D. Lahaye, H. Polinder, and J. A. Ferreira, "Computationally efficient calculation of skew effects in brushless doubly-fed induction machines," *Electric Power Applications IET*, vol. 11, no. 3, pp. 303-311, 2017.
- [22] H. M. Hesar, H. A. Zarchi, and G. A. Markadeh, "Modeling and Dynamic Performance Analysis of Brushless Doubly Fed Induction Machine Considering Iron Loss," *IEEE Trans. Energy Convers* , vol. 35, no. 1, pp. 193-202, 2020.
- [23] M. E. Mathekgga ,S. Ademi ,and R. A. McMahan, "Brushless Doubly Fed Machine Magnetic Field Distribution Characteristics and Their Impact on the Analysis and Design," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol .34, no.4, pp.2180-2188, Dec. 2019
- [24] R. Oraee, E. McMahan, S. Abdi, and S. Ademi, "Influence of Pole-pair Combinations on the Characteristics of the Brushless Doubly Fed Induction Generator," has been accepted to be published in *IEEE Trans. Energy Convers.*,
- [25] L. Han, X. Ou, J. Du, X. Han, and Y. Guo, "Study of Direct Coupling in Stator Dual Windings of a Brushless Doubly Fed Machine," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 32, no. 3, pp. 974-982, 2017.
- [26] E. Oraee, S. Abdi, R. McMahan and P. Tavner, "Effects of rotor winding structure on the BDFM equivalent circuit parameters," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 30, no. 4, pp. 1660-1669, Dec. 2015
- [27] R. Mc Mahon and et all, "Characterising brushless doubly fed machine rotors," *IET Electr. Power Appl.*, vol.7, no. 7, pp.535–543. 2013,
- [28] X. Wang, "Modeling and Design of Brushless Doubly-Fed Induction Machines, Ph.D. thesis, TU Delf University, 2017.
- [29] R. McMahan, M. E. Mathekgga, X. Wang, and M. R. Tatlow, "Design considerations for the brushless doubly-fed induction machine," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 10, no. 5, pp. 394–402, 2016.
- [30] P. C. Robert, "A Study of Brushless Doubly-Fed Induction Machines," Ph.D. thesis, Cambridge University, 2005
- [31] H. Djadi, K. Yazid, and M. Mena, "Parameters identification of a brushless doubly fed induction machine using pseudo-random binary signal excitation signal for recursive least squares method," *IET Electr. Power Appl.*, vol. 11, no. 9, pp. 1585–1595, 2017.
- [32] L. Alberti, N. Bianchi, and S. T. Boroujeni, "Finite element estimation of induction motor parameters for sensorless applications," *COMPEL*, Tan. vol.31, no.1, pp. 191-205, 2012.
- [5] P. Han, M. Cheng, X. Wei, and N. Li, "Modeling and Performance Analysis of A Dual-Stator Brushless Doubly-Fed Induction Machine Based on Spiral Vector Theory," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 52, no. 2, pp. 1380 - 1389, March/April 2016.
- [6] F. Xiong and X. Wang, "Design of a Low Harmonic-Content Wound Rotor for the Brushless Doubly Fed Generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol .29, no.1, March 2014, pp.158-168
- [7] R. Mahon, P. Roberts, X. Wang, and P. Tavner, "Performance of BDFM as generator and motor," vol. 153, no. 2, pp. 289-299, March 2006.
- [8] S. Williamson, A. Ferreira, and A. Wallace, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine I-analysis," *IEE Proc. Electr. Po w. App.*, vol. 144, no.2, pp.111–122, March 2007.
- [9] H. Gorginpour, B. Jandaghi, and H. Oraee, "A novel rotor configuration for brushless doubly-fed induction generators, *IET Electr. Power Appl.*" vol. 7, p. 106.
- [10] L. Ou, X. Wang, F. Xiong, and C. Ye, "Reduction of torque ripple in a wound-rotor brushless doubly-fed machine by using the tooth notching," *Electric Power Applications IET*, vol. 12, no. 5, pp. 635-642, 2018.
- [11] C. Kan, T. Ren, and Y. Hu, "Design and experimental analysis of a wound brushless doubly Fed machine based on a rotor with the reluctance effect," vol. 13, no. 4, pp. 551-558, 2019.
- [12] F. Zhang, H. Wang, S. Yu, and D. Ma, "Rotor optimisation design and performance comparison of BDFG for wind power generation, *IET Electr. Power Appl.*, vol. 13, no. 3, pp. 370-378, 2019.
- [13] H. R. Mohabati, J. S. Moghani, and S. T. Boroujeni, "Fully laminated shell-type three-phase rotating transformer for brushless applications ," *IET Electric Pow. Applications*, vol. 9, no. 5, pp. 349-357.
- [14] H. R. Mohabati, J. S. Moghani, S. T. Boroujeni, "Complex vector modelling and sequence analysis of the integrated three-phase rotating transformer for design of a symmetrical structure ," *IET Electric Pow. Applications*, vol. 10, no. 7, pp. 649-657.
- [15] T. D. Strous, H. Polinder, J. A. Ferreira, "Brushless doubly-fed induction machines for wind turbines: developments and research challenges" *IET Electr. Power Appl.*, pp.1–10.
- [16] C. Ferreira and S. Williamson, "Time-stepping finite-element analysis of brushless doubly fed machine taking iron loss and saturation into account," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 3, pp. 583–588, May/June 1999.
- [17] X. Wang and et all, "Modeling and Optimization of Brushless Doubly-Fed Induction Machines Using Computationally Efficient Finite Element Analysis," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol .52, no.6, pp. 4525-4534, Nov.-Dec. 2016.
- [18] F. Barati, S. Shao, E. Abdi, H. Oraee, and R. McMahan, "Generalized Vector Model for the Brushless Doubly-Fed Machine With a Nested-Loop Rotor", *Trans. Ind. Elec.*, vol. 58, no. 6, pp. 2313-2321, Aug 2010.