

## مدل سازی دینامیکی و بررسی تأثیر مدار رتور بر رفتار ماشین القایی دو سو-تغذیه بدون جاروبک

حسین باقری نقنه<sup>۱</sup>، صمد تقی پور بروجنی<sup>۲\*</sup>، عبدالرضا ربیعی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۲ و ۳- دانشیار، دانشگاه شهرکرد

(دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱، پذیرش: ۱۳۹۹/۰۳/۲۶)

### چکیده

در این مقاله تأثیر مدار رتور بر روی مشخصه‌های ماشین القایی دو سو-تغذیه بدون جاروبک (BDFIM) بررسی شده است. به این منظور یک مدل دینامیکی برای BDFIM با رتور حلقه-آشپانه‌ای (nested-loop) تهیه شده است. مدل مذکور بر پایه مدارهای تزویج شده سیم‌پیچی‌های استاتور و حلقه‌های رتور می‌باشد. با استفاده از روش تابع سیم‌پیچ، اندوکتانس‌های خودی و متقابل مدارهای تزویج شده به صورت توابعی از موقعیت رتور و پارامترهای ماشین به دست آمده‌اند. از این مدل به عنوان یک ابزار سریع جهت پیش‌بینی عملکرد دینامیکی ماشین BDFIM استفاده شده است. تأیید مدل به وسیله تحلیل جزای محدود (FEA) انجام شده است. با استفاده از مدل دینامیکی تهیه شده، برخی مشخصه‌های ماشین BDFIM مانند تلفات اهمی در شرایط بی‌باری و بارداری و تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل برای دو ساختار مختلف رتور این ماشین (آشپانه با حلقه‌های سری و موازی) مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین با استفاده از مدل به دست آمده تأثیر تعداد و دهانه حلقه‌های رتور بر روی مشخصه‌های BDFIM مطالعه شده است.

**کلیدواژه‌ها:** ماشین القایی دو سو-تغذیه بدون جاروبک، روش تابع سیم‌پیچی، مدل سازی دینامیکی، تحلیل اجزا محدود، آشپانه با حلقه‌های سری و موازی

### ۱. مقدمه

داشته و زمان بر هستند. از این رو، این روش برای بررسی سریع رفتار ماشین در مراحل ابتدایی طراحی مناسب نیست. برای کاهش حجم محاسبات و زمان FEA، در [۴] از روش دیفرانسیلی واپس‌گرا<sup>۲</sup> جهت حل معادلات دیفرانسیل زمانی و به دست آوردن جریان‌های رتور استفاده شده است. با این وجود، استفاده از مدل‌های تحلیلی در مراحل اولیه طراحی ماشین، به خاطر محاسبات سریع آنها، ترجیح داده می‌شود. بر مبنای معادلات مدارهای تزویج شده<sup>۴</sup>، در [۵] یک مدل برداری کلی برای BDFIM مطرح شده است. همچنین بر پایه مدل ارائه شده در [۳]، در [۶] و [۷]، رفتار هارمونیک BDFIM بررسی شده است. در [۸]، علاوه بر هارمونیک‌های سیم‌پیچی، اثر هارمونیک‌های شیار نیز در چگالی شار فاصله هوایی BDFIM در نظر گرفته شده است. با استفاده از هارمونیک‌های محاسبه شده، در [۹] ضربان گشتاور BDFIM به دست آمده است. در [۱۰]، بر مبنای یک مدل تحلیلی، هارمونیک‌های BDFIM به دست آمده و یک شاخص جهت ارزیابی اعوجاج هارمونیک در ماشین BDFIM مطرح شده است. با استفاده از شاخص مطرح شده در [۱۰]، اثر تعداد

ماشین القایی دو سو-تغذیه بدون جاروبک (BDFIM)<sup>۱</sup> به عنوان یکی از گزینه‌های مناسب برای کاربردهای با سرعت-متغیر، فرکانس-ثابت (مانند ژنراتورهای توربین باد) معرفی شده است. این ماشین‌ها از مزایایی همچون استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت با توان پایین و ساختار بدون جاروبک بهره می‌برند. البته در مقایسه با ماشین‌های القایی دو سو-تغذیه، BDFIM دارای معایبی همچون قیمت بالا، بازده پایین و چگالی توان کم می‌باشد. موارد گفته شده موانعی برای استفاده وسیع از این ماشین‌های BDFIM می‌باشند. در [۱]، عملکرد ماشین BDFIM با استفاده از روش FEA<sup>۲</sup> مورد مطالعه قرار گرفته است. اصول عملکرد و مدل‌های فازوری حالت ماندگار BDFIM در [۲] و [۳] ارائه شده‌اند. برخلاف مدل مطرح شده در [۲]، مدل ارائه شده در [۳] قابلیت بررسی هارمونیک‌ها را هم دارد و به عنوان پایه‌ای برای مدل‌های تحلیلی مطرح شده در تحقیقات بعدی استفاده شده است. از طرفی مدل‌های بر پایه FEA نیاز به حجم زیادی از محاسبات

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

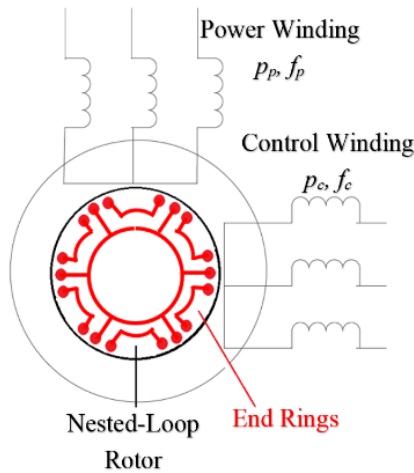
<sup>۳</sup> Backward Differential Formula Technique

<sup>۴</sup> Multiple Coupled Circuits

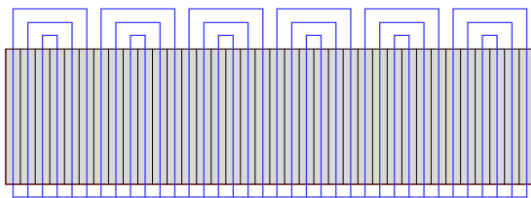
<sup>۱</sup> Brushless Doubly Fed Induction Machine

<sup>۲</sup> Finite Element Analysis

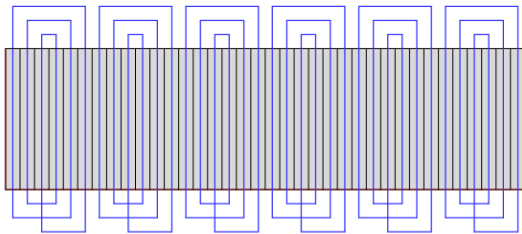
$$B_{gc}(t, \phi_s) = B_{gc \max} \cos(2\pi f_c t - p_c \phi_s + \alpha_c) \quad (2)$$



شکل (۱): BDFIM با ساختار رتور حلقه‌آشپانه‌ای



(آ)



(ب)

شکل (۲): رتور BDFIM با آشپانه‌های دارای حلقه‌های (آ) موازی (ب) سری

که  $\phi_s$  موقعیت زاویه‌ای در قاب مرجع استاتور،  $\alpha$  و  $B_{g\max}$  به ترتیب مقادیر فاز اولیه و حداکثر چگالی شار فاصله هوایی، و زیرنویس‌های  $c$  و  $p$  مربوط به سیم‌پیچی‌های کنترل و قدرت هستند. در صورت داشتن سرعت چرخش رتور برابر با  $\omega_m$  میدان‌های گردان سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل که به ترتیب در روابط (۱) و (۲) بیان شده‌اند، در دستگاه مرجع رتور به ترتیب به صورت (۳) و (۴) بازنویسی می‌شوند که  $\phi_r$  موقعیت زاویه‌ای در قاب مرجع رتور و  $\theta_r$  زاویه اولیه رتور است. در واقع (۳) و (۴) با جای‌گزینی ( $\phi_s = \phi_r + \omega_m t + \theta_r$ )، در (۱) و (۲) به دست آمده‌اند.

قطب‌های سیم‌پیچی‌های کنترل و قدرت بر روی هارمونیک‌های ماشین BDFIM مطالعه شده است. البته اثر مدار رتور حلقه-آشپانه‌ای در [۱۰] بررسی نشده است. در [۱۱]، به جای استفاده از ساختار رتور حلقه-آشپانه‌ای مرسوم که در آن حلقه‌های موازی با یکدیگر می‌باشند، یک مدار حلقه-آشپانه‌ای با حلقه‌های سری برای رتور ماشین BDFIM ارائه شده است. در [۱۱] با بهینه‌سازی موقعیت میله‌های رتور بازده ماشین بهینه شده است. با این وجود، اعمال میله‌های سری منجر به پیچیده شدن ساختار رتور می‌شود.

در این مقاله، سعی بر آن است که اثر مدارهای رتور بر روی مشخصه‌های BDFIM مورد مطالعه قرار گیرد. به این منظور، یک مدل دینامیکی بر مبنای مدل مدار تزویج شده تهیه شده و جهت مطالعه عملکرد ماشین مورد استفاده قرار می‌گیرد. با استفاده از روش تابع سیم‌پیچ، اندوکتانس‌های خودی و متقابل مدارهای تزویج شده به صورت توابعی از موقعیت رتور و پارامترهای طراحی به دست آمده‌اند. مدل به دست آمده با استفاده از روش FEA گذرا تأیید شده است. بر مبنای مدل توسعه داده شده، برخی مشخصه‌های BDFIM در شرایط بی‌باری و بارداری مانند تلفات اهمی، تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچی‌های کنترل و قدرت مطالعه شده‌اند. در نهایت با استفاده از مدل توسعه داده شده، اثر تعداد و موقعیت حلقه‌های رتور بر روی مشخصه‌های بی‌باری BDFIM مورد بررسی قرار گرفته است.

## ۲. اصول عملکرد ماشین BDFIM

همان‌گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، BDFIM شامل یک هسته استاتور با دو مجموعه سیم‌پیچی سه فاز با  $p_c$  و  $p_p$  زوج قطب می‌باشد ( $p_p \neq p_c$ ). در این ماشین تزویج مستقیم بین سیم‌پیچی قدرت و کنترل صفر است ولی به صورت غیرمستقیم از طریق ساختار خاص مدار رتور که ساختار حلقه-آشپانه‌ای نامیده می‌شود با یکدیگر تزویج مغناطیسی دارند [۳]. ساختار رتور حلقه‌ای-آشپانه‌ای می‌تواند دارای حلقه‌های موازی و یا سری باشد که به ترتیب در شکل (۲-آ) و (۲-ب) نمایش داده شده‌اند. جزئیات اصول عملکرد BDFIM در [۳] به طور کامل شرح داده شده است، با این وجود برای داشتن یک فهم کلی از اصول کاربرد BDFIM در ادامه یک توضیح کوتاه و ساده از آن ارائه می‌شود.

با تحریک جریان‌های سه فاز متعادل با فرکانس‌های  $f_p$  و  $f_c$  در سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل استاتور، دو میدان‌های مغناطیسی گردان در فاصله هوایی به وسیله سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل ماشین تولید می‌شوند که به ترتیب در (۱) و (۲) بیان شده‌اند.

$$B_{gp}(t, \phi_s) = B_{gp \max} \cos(2\pi f_p t - p_p \phi_s + \alpha_p) \quad (1)$$

های رتور و  $z$  تعداد حلقه‌های موازی در هر آشیانه می‌باشند. با توجه به اینکه استاتور دارای دو مجموعه سیم‌پیچی سه فاز متعادل است، در نهایت تعداد  $6+Nj$  متغیر حالت مستقل وجود دارد و به همین تعداد معادله حالت مورد نیاز می‌باشد. از آنجایی که اندوکتانس‌های خودی و متقابل ماشین پارامترهای این روابط حالت می‌باشند، در ادامه اندوکتانس‌های ماشین به‌عنوان توابعی از موقعیت رتور به‌دست آورده شده‌اند.

### ۳-۱. اندوکتانس‌ها

برای یافتن اندوکتانس‌های خودی و متقابل در BDFIM، افزون بر اشباع مغناطیسی از اثر شیارها نیز چشم پوشی شده، و فاصله هوایی ماشین یکنواخت در نظر گرفته شده است. در روش تابع سیم‌پیچ اندوکتانس خودی مدار نام و اندوکتانس‌های متقابل مدار نام و زام به ترتیب به وسیله (۶) و (۷) به‌صورت زیر به‌دست می‌آیند [۱۲].

$$L_{ij}(\theta_r) = \mu_0 L_{stk} R_s \int_0^{2\pi} g^{-1} N_i^2(\phi, \theta_r) d\phi \quad (6)$$

$$L_{ij}(\theta_r) = \mu_0 L_{stk} R_s \int_0^{2\pi} g^{-1} N_i(\phi, \theta_r) N_j(\phi, \theta_r) d\phi \quad (7)$$

که در آن  $g$  طول فاصله هوایی،  $N_i(\phi, \theta_r)$  و  $N_j(\phi, \theta_r)$  به ترتیب توزیع نیروی محرکه مغناطیسی برای ۱A در مدار نام و زام،  $L_{stk}$  طول پشته ماشین و  $R_s$  شعاع داخلی استاتور می‌باشند.

از آنجایی که سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل استاتور دارای تعداد قطب‌های متفاوتی بوده و فاصله هوایی ماشین یکنواخت است، طبق رابطه (۷) هیچ تزویج مغناطیسی بین آن‌ها وجود ندارد. همچنین اندوکتانس‌های خودی و متقابل هر مجموعه از مدارهای استاتور یا رتور ثابت و مستقل از موقعیت زاویه‌ای رتور است. اما اندوکتانس‌های متقابل میان حلقه‌های رتور و سیم‌پیچی‌های استاتور به‌صورت توابعی از موقعیت رتور می‌باشند. باید اشاره شود که صرف نظر کردن از اثر شیارها و نیز اشباع مغناطیسی، فرضیاتی پذیرفته شده و متداول در مدل‌سازی دینامیکی ماشین‌های الکتریکی می‌باشد [۱۲].

### ۳-۲. معادلات فضای حالت

با در نظر گرفتن شار دور پیوندی مدارها به‌عنوان متغیرهای حالت و اعمال معادلات ولتاژ، معادلات فضای حالت به‌صورت داده شده در (۸) به‌دست می‌آید، که در آن  $V$ ،  $I$  و  $\lambda$  نشان‌دهنده متغیرهای ولتاژ، جریان و شار پیوندی و زیرنویس‌های  $a$ ،  $b$  و  $c$  نشان‌دهنده فازها،  $i=1$  و  $i=2$  مربوط به سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل،  $s$  و  $r$  نشان‌دهنده متغیرهای استاتور و رتور و  $z$  تعداد حلقه‌های موازی در هر آشیانه رتور می‌باشد. لازم به یادآوری

$$B_{gp}^r(t, \phi_r) = B_{gp \max} \cos\left((2\pi f_p - p_p \omega_m)t - p_p(\phi_r + \theta_{r0}) + \alpha_p\right) \quad (3)$$

$$B_{gc}^r(t, \phi_r) = B_{gc \max} \cos\left((2\pi f_c - p_c \omega_m)t - p_c(\phi_r + \theta_{r0}) + \alpha_c\right) \quad (4)$$

جهت برآورده شدن شرایط تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل استاتور، باید فرکانس ولتاژ القاشده در مدارهای رتور توسط هر کدام از سیم‌پیچی‌ها با یکدیگر یکسان باشند. به این منظور سرعت رتور باید یکی از شرایط زیر را برآورده کند.

$$\omega_m = 2\pi \frac{f_p - f_c}{p_p - p_c} \quad (5)$$

or

$$\omega_m = 2\pi \frac{f_p + f_c}{p_p + p_c}$$

بر مبنای (۵)، می‌توان گفت که اگر دو میدان در یک جهت بچرخند BDFIM مانند یک ماشین سنکرون با  $pp+pc$  و اگر دو میدان در خلاف یکدیگر جهت بچرخند، BDFIM مانند یک ماشین سنکرون با  $|pp-pc|$  زوج قطب عمل می‌کند [۳]. البته داشتن سرعت سنکرون پایین‌تر برای کاربردهای سرعت-پایین مانند توربین بادی بسیار مناسب‌تر است. بنابراین، مدار رتور باید  $pp+pc$  زوج قطب را فراهم کند و به عبارتی باید شامل  $pp+pc$  مدار شبیه به هم باشد. به هر کدام از این مدارهای رتور آشیانه گفته می‌شود. عموماً مدار رتور حلقه‌آشیانه‌ای برای این منظور استفاده شده است. هر کدام از این آشیانه‌ها متشکل از تعدادی حلقه سری و یا موازی می‌باشند (شکل ۲). در توضیح ارائه‌شده در بالا، هارمونیک‌های مکانی و زمانی چگالی شار در نظر گرفته نشده‌اند. در ادامه، جهت لحاظ کردن هارمونیک‌های چگالی شار فاصله هوایی، یک مدل بر پایه مدارهای تزویج شده برای BDFIM ارائه شده است.

### ۳. مدل مدار تزویج‌شده

در روش مدل‌سازی با استفاده از مدار تزویج شده، مدارهای مختلف با تزویج مغناطیسی متقابل در نظر گرفته شده و شار دور هر مدار به‌صورت یک ترکیب خطی از جریان‌های مدارها بیان می‌شود. در این پژوهش، مدارهای سه فاز سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل استاتور و حلقه‌های رتور به‌عنوان مدارهای جداگانه در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین، سه مدار در هر سیم‌پیچی استاتور و تعداد  $Nj$  مدار مستقل در رتور وجود دارد، که  $N$  تعداد آشیانه-

#### ۴. تأیید مدل با روش اجزای محدود گذرا

جهت تأیید مدل تهیه شده، عملکرد ماشین با روش اجزای محدود گذرا دو بعدی در نرم افزار ANSYS MAXWELL 16.02 با تعداد ۵۵۳۴۱ مش بررسی و نتایج آن با نتایج مدل ارائه شده مقایسه شده اند. در تمام شبیه سازی های اجزای محدود گذرا گام زمانی برابر با ۱ms در نظر گرفته شده است. اطلاعات BDFIM بررسی شده جدول (۱) داده شده است. اگرچه در مدل تحلیلی ارائه شده با استفاده از تابع سیم پیچی از اشباع هسته صرف نظر می شود، اما در شبیه سازی FEA از مواد فرومغناطیس با منحنی B-H غیرخطی استفاده شده است. البته در این شبیه سازی ها ماشین به گونه ای تحریک شده است که بهره برداری از ماشین طبق واقعیت در ناحیه خطی انجام شود. ساختار مش بندی شده ماشین شبیه سازی شده در شکل (۳-آ) و نمای هندسی مدارهای رتور در شکل (۳-ب) نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل (۳-ب) نشان داده شده است، دهانه حلقه ها به ترتیب  $\alpha 1$ ،  $\alpha 2$ ،  $\alpha 3$  و  $\alpha 4$  می باشند. اندوکتانس های خودی و متقابل مدارها در هر کدام از مجموعه سیم پیچی های کنترل و قدرت در جدول (۲) داده شده است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای ماشین BDFIM مورد بررسی

مقدار	نماد	پارامتر
۴/۲	$p_p/p_c$	زوج قطب سیم پیچی های کنترل/قدرت
۱۳۶/۱۴۴	$N_p/N_c$	تعداد دور در هر فاز سیم پیچی کنترل/قدرت
۵۰mm	$L_{stk}$	طول پشته
۷۴mm	$r$	شعاع داخلی استاتور
۴۸	$S$	تعداد شیار استاتور
۶	$N$	تعداد آشیانه رتور
$۸۳ \mu\Omega$	$R_{R1}$	1 <sup>st</sup> loop
$۷۵ \mu\Omega$	$R_{R2}$	2 <sup>nd</sup> loop
$۶۸ \mu\Omega$	$R_{R3}$	3 <sup>rd</sup> loop
$۰/۱ \mu H$	$L_{R1}$	1 <sup>st</sup> loop
$۰/۱ \mu H$	$L_{R2}$	2 <sup>nd</sup> loop
$۰/۱ \mu H$	$L_{R3}$	3 <sup>rd</sup> loop
$۲۰ \mu H/۱۸ \mu H$	$L_{ls1}/L_{ls2}$	اندوکتانس نشستی هر فاز سیم پیچی کنترل/قدرت
$۰/۴۲۵\Omega/۰/۳۹۵\Omega$	$r_{sp}/r_{sc}$	مقاومت هر فاز سیم پیچی کنترل/قدرت
$۰/۹mm$	$g$	طول فاصله هوایی

است در مدار حلقه-آشیانه ای سری ز برابر ۱ است.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{s1} \\ \lambda_{s2} \\ \lambda_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{s1} \\ \mathbf{V}_{s2} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{s1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{s2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{R}_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{s1} \\ \mathbf{I}_{s2} \\ \mathbf{I}_r \end{bmatrix}$$

$$\lambda_{si} = [\lambda_{asi} \quad \lambda_{bsi} \quad \lambda_{csi}]^T, i=1,2$$

$$\mathbf{I}_{si} = [I_{asi} \quad I_{bsi} \quad I_{csi}]^T, i=1,2$$

$$\mathbf{V}_{si} = [V_{asi} \quad V_{bsi} \quad V_{csi}]^T, i=1,2$$

$$\lambda_r = [\lambda_{rN1} \quad \lambda_{rN2} \quad \dots \quad \lambda_{rN6}]^T$$

$$\lambda_{rNk} = [\lambda_{rNkL1} \quad \lambda_{rNkL2} \quad \dots \quad \lambda_{rNkLj}]^T$$

همچنین ماتریس مقاومت در (۹) داده شده است، که در آن،  $\text{diag}(x,y)$  اشاره به یک ماتریس مربعی قطری با  $y$  سطر و عناصر قطری  $x$  دارد. چون هدف بر این است که از BDFIM به عنوان ژنراتور استفاده شود، سرعت رتور به عنوان یک ورودی در نظر گرفته شده است و از دینامیک آن صرف نظر شده است.

$$\mathbf{R}_{s1} = \text{diag}(r_{s1}, 3)$$

$$\mathbf{R}_{s2} = \text{diag}(r_{s2}, 3)$$

$$\mathbf{R}_r = \text{diag}(r_r, N)$$

$$\mathbf{r}_r = \begin{bmatrix} R_{r1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R_{r2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R_{rj} \end{bmatrix}$$

در نهایت جریان های ماشین از رابطه (۱۰) محاسبه می شوند، که  $L$  ماتریس اندوکتانس بوده و به صورت (۱۱) تعریف می شود. در (۱۱)  $L_{ls1}$  و  $L_{ls2}$  به ترتیب اندوکتانس های نشستی سیم پیچی توان، سیم پیچی کنترل و حلقه های رتور می باشند.

$$\mathbf{I} = \mathbf{L}(\theta_r)^{-1} \lambda^T \quad (10)$$

$$\mathbf{L}(\theta_r) = [L_{ij}(\theta_r)] + \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ls1} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{L}_{ls2} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{L}_{lr} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{L}_{ls1} = \text{diag}(L_{ls1}, 3)$$

$$\mathbf{L}_{ls2} = \text{diag}(L_{ls2}, 3)$$

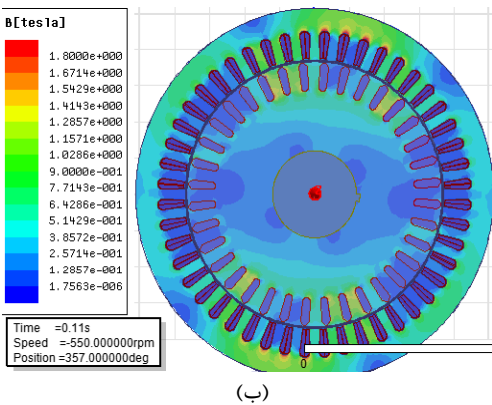
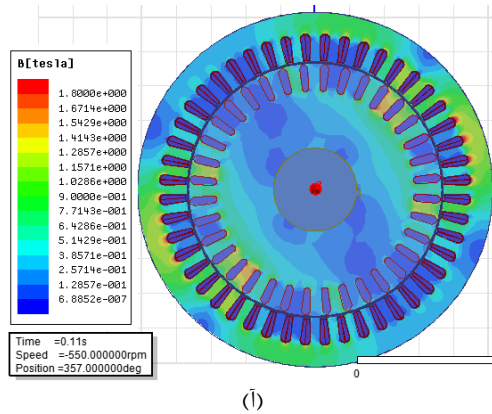
$$\mathbf{L}_{lr} = \text{diag}(\mathbf{I}_{lr}, N)$$

$$\mathbf{I}_{lr} = \begin{bmatrix} L_{r1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & L_{r2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & L_{rj} \end{bmatrix} \quad (11)$$

#### ۴-۱. شرایط بی‌باری

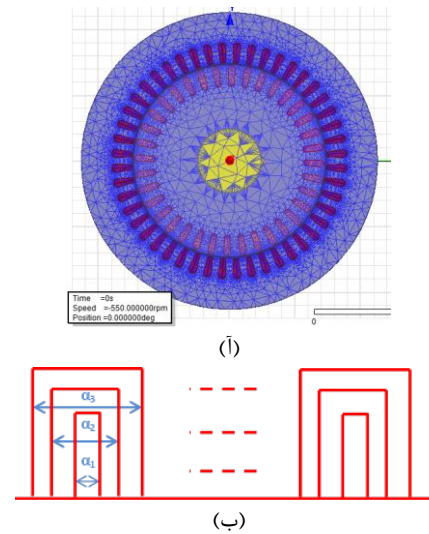
برای بررسی رفتار ماشین در شرایط بی‌باری سیم‌پیچ توان مدارباز در نظر گرفته شده است. یک‌بار رتور با سرعت ۵۰۰ rpm چرخانده شده و ولتاژهای DC ( $V_{as2}=2V$ ,  $V_{bs2}=V_{cs2}=-1V$ ) به سیم‌پیچی کنترل اعمال شده است و بار دیگر رتور با سرعت ۵۵۰ rpm چرخانده شده و ولتاژهای AC سه فاز متعادل با دامنه ولتاژ ۱۰V و فرکانس ۵Hz به سیم‌پیچ کنترل اعمال شده است. توزیع چگالی شار ماشین در شرایط مدارباز بودن سیم‌پیچی توان و تحریک سیم‌پیچی کنترل با ولتاژهای DC و ولتاژ AC اشاره‌شده در بالا، به ترتیب در شکل (۴-ا) و (۴-ب) آورده شده است.

زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی شرایط بی‌باری در نرم‌افزار MAXWELL برابر ۳۸۲۶ ثانیه و در مدل ارائه‌شده با استفاده از پردازنده یکسان ۴۸۳ ثانیه می‌باشد.



شکل (۴): چگالی شار در BDFIM در زمان  $t=0.11ms$  در شرایط بی‌باری (ا) تحریک DC سیم‌پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۰۰ rpm (ب) تحریک AC سیم‌پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۵۰ rpm

شار دور پیوندی فاز a سیم‌پیچی قدرت و ولتاژ آن در شرایط مدارباز بودن سیم‌پیچی توان و اعمال ولتاژهای DC و AC در سرعت‌های رتور به ترتیب برابر با ۵۰۰ rpm و ۵۵۰ rpm از مدل ارائه شده و همچنین روش FEA گذرا به‌دست آمده و در

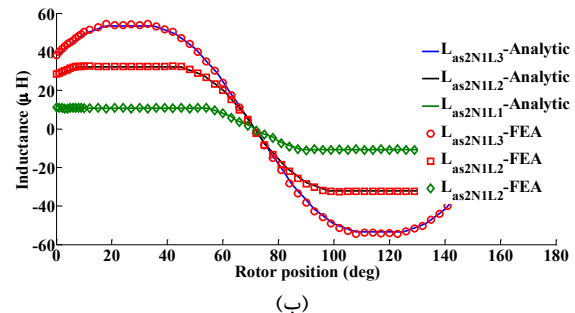
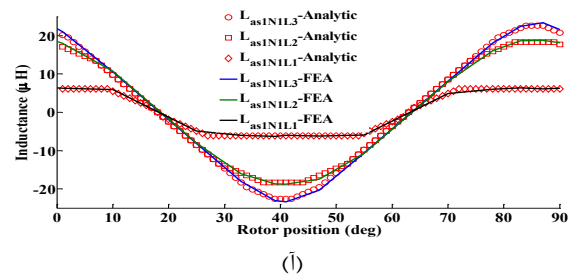


شکل (۳): (ا) ساختار مش‌بندی‌شده BDFIM و (ب) مدار رتور در نظر گرفته‌شده با ۳ حلقه موازی در هر آشپانه

جدول (۲): اندوکتانس‌های خودی و متقابل مدارها در هر یک از مجموعه سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل

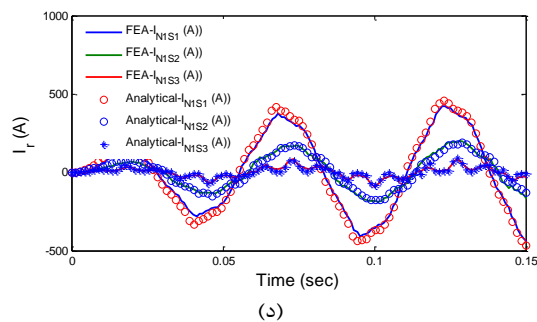
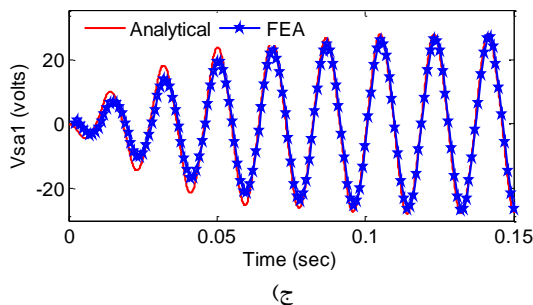
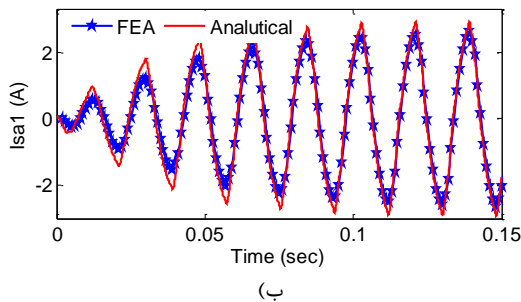
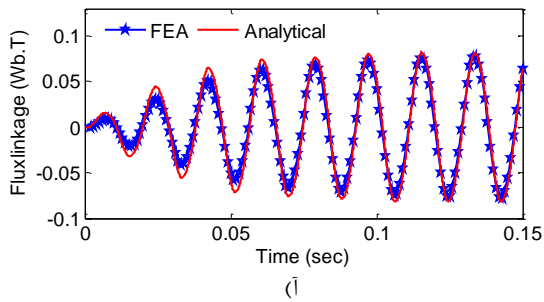
اندوکتانس مشترک (mH)		اندوکتانس خودی (mH)		مدارها
FEA	تحلیلی	FEA	تحلیلی	
-۰/۵۹	-۰/۶۳	۱/۵۹	۱/۵۲	سیم‌پیچی کنترل
-۱/۸۱	-۱/۷۶	۴/۳۷	۴/۴۸	سیم‌پیچی قدرت

اندوکتانس‌های متقابل میان حلقه‌های اولین آشپانه رتور و فاز a سیم‌پیچی‌های کنترل و قدرت به‌وسیله شبیه‌سازی FEA به‌دست آمده است و در شکل (۴) با نتایج به‌دست‌آمده از مدل‌سازی ارائه‌شده مقایسه شده‌اند.



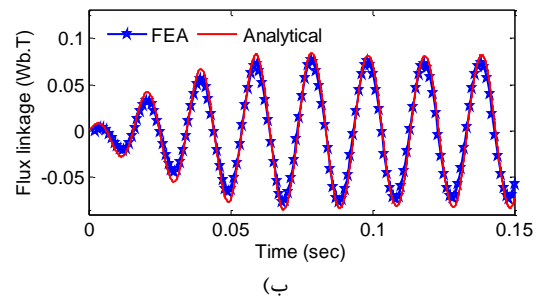
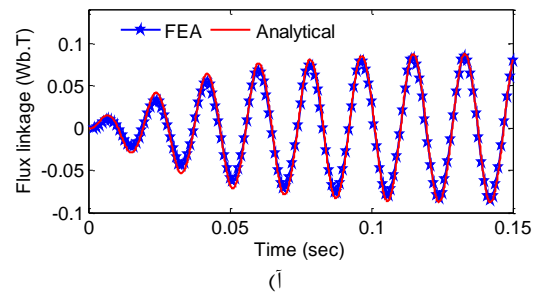
شکل (۴): اندوکتانس متقابل آشپانه اول رتور با (ا) فاز a از سیم‌پیچی کنترل و (ب) فاز a از سیم‌پیچی قدرت

سرعت ۵۵۰ rpm چرخانده شده و ولتاژهای AC سه فاز متعادل با دامنه ولتاژ ۱۰۷ و فرکانس ۵Hz به سیم پیچ کنترل اعمال شده است. در این شرایط شار دور پیوندی فاز a سیم پیچی قدرت، ولتاژ آن و جریان رتور با استفاده از مدل ارائه شده و همچنین روش FEA گذرا به دست آمده و به ترتیب در شکل های (۷) و (۸) آورده شده اند.

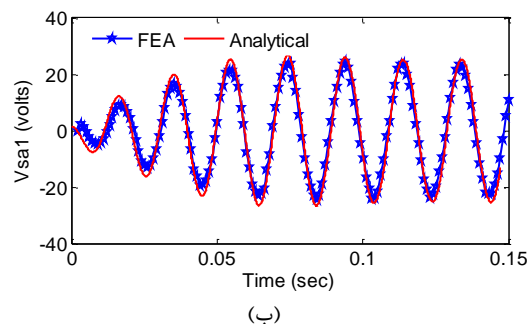
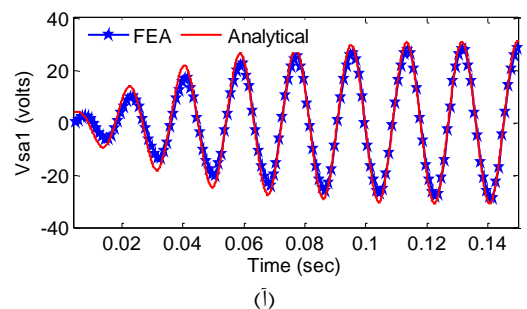


شکل (۷): متغیرهای فاز a از سیم پیچی قدرت در شرایط بارداری، تحریک DC سیم پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۰۰ rpm. (آ) شار دور پیوندی (ب) جریان سیم پیچ توان، (ج) ولتاژ القاشده سیم پیچ توان و (د) جریان حلقه های آشیانه نخست رتور.

شکل های (۵) و (۶) آورده شده اند.



شکل (۵): مشخصات ماشین BDFIM در شرایط بی باری با تحریک DC سیم پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۰۰ rpm. (آ) شار دور پیوندی فاز a سیم پیچی قدرت (ب) ولتاژ سیم پیچی قدرت.



شکل (۶): مشخصات ماشین BDFIM در شرایط بی باری با تحریک AC سیم پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۵۰ rpm. (آ) شار دور پیوندی فاز a سیم پیچی قدرت (ب) ولتاژ سیم پیچی قدرت.

## ۲-۴. شرایط بارداری

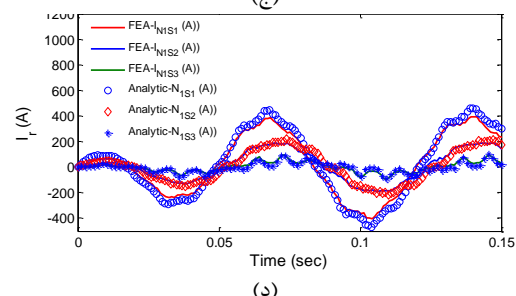
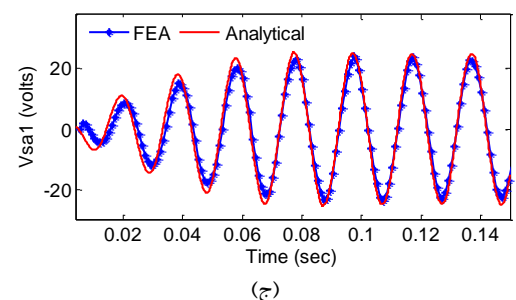
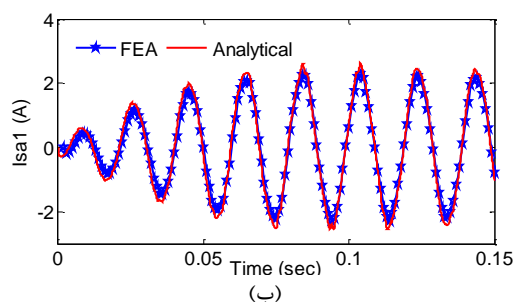
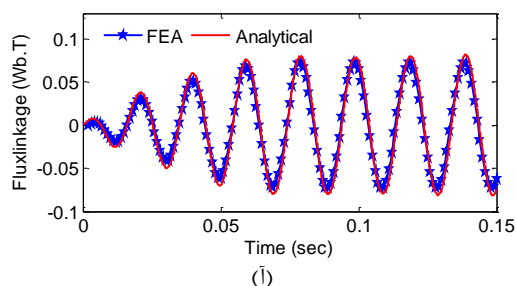
برای بررسی رفتار ماشین در شرایط بارداری، یک مقاومت سه فاز  $\Omega 10$  به سیم پیچ توان متصل شده است. یک بار رتور با سرعت ۵۰۰ rpm چرخانده شده و ولتاژهای DC  $V_{as2}=2V, V_{bs2}=V_{cs2}=-1V$  به سیم پیچی کنترل اعمال شده است. بار دیگر رتور با

استفاده خواهد شد. برای این منظور دو مدار رایج رتور حلقه آشیانه‌ای موازی و سری در نظر گرفته شده‌اند. با استفاده از مدل به‌دست آمده، متغیرهای شار پیوندی سیم‌پیچی توان و تلفات رتور در شرایط مدارباز بودن سیم‌پیچی توان به‌دست آمده‌اند. همچنین اثر تعداد و موقعیت میله‌های رتور بر این متغیرها بررسی شده است. پارامترهای ماشین BDFIM مورد بررسی در جدول (۱) آورده شده است. تعداد حلقه‌های رتور نیز در دو حالت جداگانه برابر با دو و سه حلقه در هر آشیانه لحاظ شده‌اند. در این مطالعه دهانه کمان حلقه‌ها با پله‌های ۶/۶ درجه تغییر داده شده و تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچی قدرت و کنترل به‌دست آمده است. همچنین رتور با سرعت ۵۰۰ rpm چرخانده شده و سیم‌پیچی کنترل با ولتاژ  $V_{asc}=2V$ ,  $V_{bsc}=V_{csc}=-1V$  DC برق‌دار شده است.

دامنه اولین هارمونیک شارپیوندی ( $f=50\text{ Hz}$ ) که ایجادکننده تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچی قدرت و کنترل می‌باشد و نیز تلفات اهمی رتور در شرایط بی‌باری برای ماشین BDFIM با ۲ حلقه در هر آشیانه برای مدار رتور با حلقه‌های موازی و سری به ترتیب در جدول‌های (۳) و (۴) نشان داده شده است. با توجه به نتایج به‌دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که تزویج مغناطیسی بین سیم‌پیچ قدرت و کنترل می‌تواند با بهینه‌سازی دهانه کمان حلقه‌های رتور بیشتر شود. همچنین تأثیر تعداد حلقه‌های رتور بر روی تزویج مغناطیسی سیم‌پیچی قدرت و کنترل ناچیز است.

**جدول (۳):** دامنه هارمونیک اصلی شار دور پیوندی سیم‌پیچی قدرت و تلفات اهمی رتور BDFIM با ۲ حلقه در هر آشیانه رتور در شرایط بی‌باری برای مدار رتور با حلقه‌های موازی

$\alpha_1$ (deg)	$\alpha_2$ (deg)	$\lambda_{1pmax}$ (Wb.T)	Rotor Joule loss
۵۶/۶	۵۰	۰/۰۳۸۹۶	۶/۴۸
۵۶/۶	۴۳/۳	۰/۰۴۱۳۴	۶/۵۴
۵۶/۶	۳۶/۶	۰/۰۴۲۴۳	۶/۹۵
۵۶/۶	۳۰	۰/۰۴۲۲۳	۷/۸۰
۵۶/۶	۱۶/۶	۰/۰۳۹۶۲	۸/۹۵
۵۰	۴۳/۳	۰/۰۴۲۰۶	۶/۳۹
۵۰	۳۶/۶	۰/۰۴۳۲۰	۶/۸۰
۵۰	۳۰	۰/۰۴۳۱۸	۷/۶۸
۵۰	۲۳/۳	۰/۰۴۲۲۹	۷/۹۴
۵۰	۱۶/۶	۰/۰۴۰۸۱	۸/۸۸
۴۳/۳	۳۶/۶	۰/۰۴۲۰۸	۵/۷۸
۴۳/۳	۳۰	۰/۰۴۲۲۲	۶/۵۲
۴۳/۳	۲۳/۳	۰/۰۴۱۴۵	۶/۷۳
۴۳/۳	۱۶/۶	۰/۰۴۰۲۴	۷/۵۲
۳۶/۶	۳۰	۰/۰۳۹۲۰	۵/۶۷
۳۶/۶	۲۳/۳	۰/۰۳۸۴۵	۵/۸۳
۳۶/۶	۱۶/۶	۰/۰۳۷۲۸	۶/۵۳
۳۰	۲۳/۳	۰/۰۳۳۶۳	۵/۱۱
۳۰	۱۶/۶	۰/۰۳۲۲۱	۵/۷۰

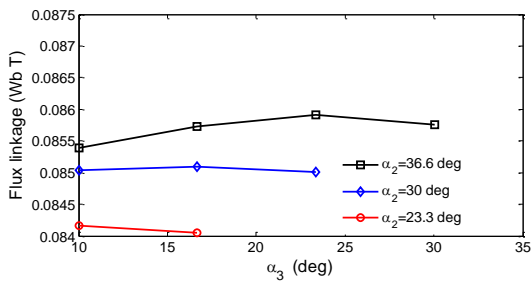


**شکل (۸):** متغیرهای فاز a از سیم‌پیچی قدرت در شرایط بارداری، تحریک AC سیم‌پیچی کنترل و سرعت رتور ۵۵۰ rpm (آ) شار دور پیوندی (الف) شار دور پیوندی (ب) جریان سیم‌پیچ توان، (ج) ولتاژ القا شده سیم‌پیچ توان و (د) جریان حلقه‌های آشیانه نخست رتور

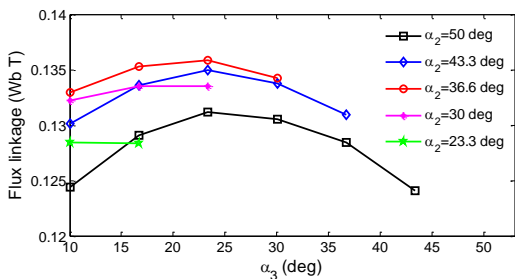
همان‌گونه که از شکل‌های (۵-۸) دیده می‌شود، انطباق خوبی بین نتایج به‌دست‌آمده از مدل دینامیکی ارائه شده و روش FEA گذرا وجود دارد. زمان مورد نیاز برای شبیه‌سازی شرایط بارداری در نرم‌افزار MAXWELL برابر ۳۲۵۶ ثانیه و در مدل ارائه شده با استفاده از پردازنده یکسان ۱۰۵ ثانیه می‌باشد.

### ۵. تأثیر مدار رتور

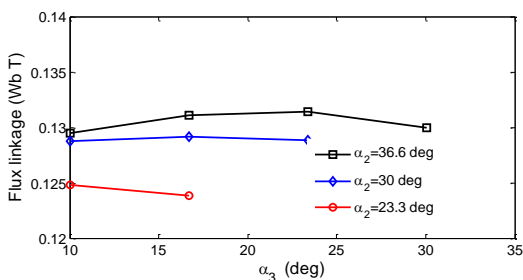
از آنجایی‌که مدل دینامیکی تهیه شده بسیار سریع‌تر از شبیه‌سازی FEA گذرا می‌باشد، در ادامه جهت ارزیابی رفتار BDFIM با مدارهای رتور مختلف تنها از مدل دینامیکی ارائه شده



شکل (۹): دامنه هارمونیک اصلی شار دور پیوندی سیم‌پیچی قدرت BDFIM با ۳ حلقه موازی در هر آشپانه رتور با دهانه بزرگ‌ترین حلقه برابر با الف (ب  $\alpha_3=56.6^\circ$ ) ج  $\alpha_3=43.3^\circ$



شکل (۱۰): دامنه هارمونیک اصلی شار دور پیوندی سیم‌پیچی قدرت BDFIM با ۳ حلقه سری در هر آشپانه رتور با دهانه بزرگ‌ترین حلقه برابر با الف (ب  $\alpha_3=56.6^\circ$ ) ج  $\alpha_3=43.3^\circ$



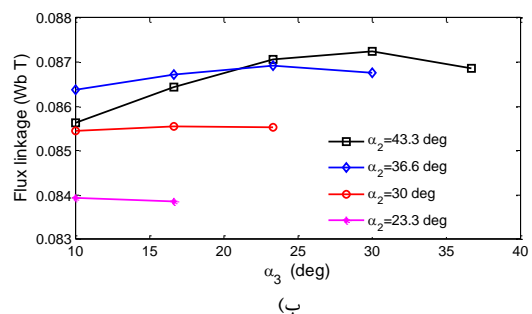
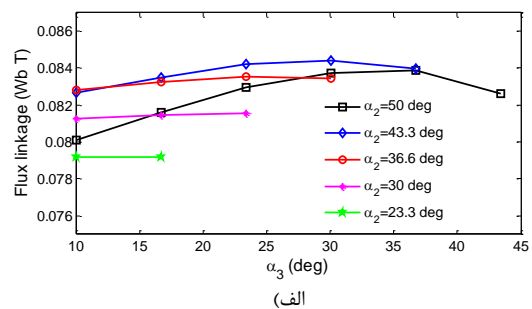
شکل (۱۱): دامنه هارمونیک اصلی شار دور پیوندی سیم‌پیچی قدرت BDFIM با ۳ حلقه موازی در هر آشپانه رتور با دهانه بزرگ‌ترین حلقه برابر با الف (ب  $\alpha_3=56.6^\circ$ ) ج  $\alpha_3=43.3^\circ$

تلفات اهمی رتور در شرایط بی‌باری برای BDFIM با ۳ حلقه در هر آشپانه رتور با حلقه‌سری و موازی به ترتیب در شکل‌های (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود با کاهش دهانه حلقه‌های درونی تلفات اهمی رتور به شکل چشم‌گیری افزایش می‌یابد. همچنین با پهن‌تر شدن حلقه بیرونی

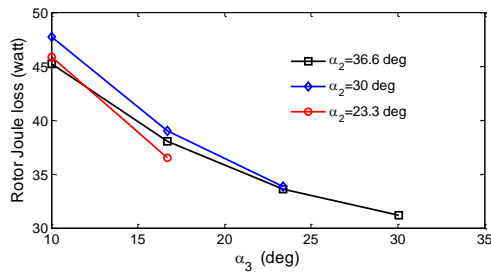
جدول (۴): دامنه هارمونیک اصلی شار دور پیوندی سیم‌پیچی قدرت و تلفات اهمی رتور BDFIM با ۲ حلقه در هر آشپانه رتور در شرایط بی‌باری برای مدار رتور با حلقه‌های سری

$\alpha_1$ (deg)	$\alpha_2$ (deg)	$\lambda_{1pmax}$ (Wb.T)	Rotor Joule loss
۵۶/۶	۵۰	۰/۰۳۸۶۰	۶/۶۲
۵۶/۶	۴۳/۳	۰/۰۴۰۱۸	۷/۱۹
۵۶/۶	۳۶/۶	۰/۰۴۰۳۷	۸/۱۳
۵۶/۶	۳۰	۰/۰۳۹۷۱	۹/۱۸
۵۶/۶	۱۶/۶	۰/۰۳۸۷۴	۹/۹۱
۵۰	۴۳/۳	۰/۰۳۷۵۸	۱۰/۶۹
۵۰	۳۶/۶	۰/۰۴۱۵۴	۶/۷۶
۵۰	۳۰	۰/۰۴۲۰۷	۸/۰۸
۵۰	۲۳/۳	۰/۰۴۱۷۳	۹/۵۴
۵۰	۱۶/۶	۰/۰۴۱۰۶	۱۰/۵۳
۴۳/۳	۳۶/۶	۰/۰۴۰۲۷	۱۱/۵۱
۴۳/۳	۳۰	۰/۰۴۱۵۳	۶/۳۹
۴۳/۳	۲۳/۳	۰/۰۴۱۵۲	۷/۹۶
۴۳/۳	۱۶/۶	۰/۰۴۱۱۸	۸/۹۹
۳۶/۶	۳۰	۰/۰۴۰۷۴	۹/۹۱
۳۶/۶	۲۳/۳	۰/۰۳۸۷۹	۶/۴۳
۳۶/۶	۱۶/۶	۰/۰۳۸۵۳	۷/۷۷
۳۰	۲۳/۳	۰/۰۳۸۲۹	۸/۸۹
۳۰	۱۶/۶	۰/۰۳۳۲۴	۶/۱۰

همچنین دامنه اولین هارمونیک شار پیوندی ( $f=50\text{Hz}$ ) برای BDFIM با ۳ حلقه در هر آشپانه برای مدار رتور با حلقه‌های موازی و سری به ترتیب در شکل‌های (۹) و (۱۰) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش دهانه حلقه‌های رتور دامنه اولین هارمونیک شار پیوندی افزایش می‌یابد.







(ج)

شکل (۱۲): تلفات اهمی رتور BDFIM با ۳ حلقه سری در هر آشیانه رتور با دهانه بزرگ‌ترین حلقه برابر با الف)  $\alpha_3=56.6^\circ$  (ب)  $\alpha_3=50^\circ$  (ج)  $\alpha_3=43.3^\circ$

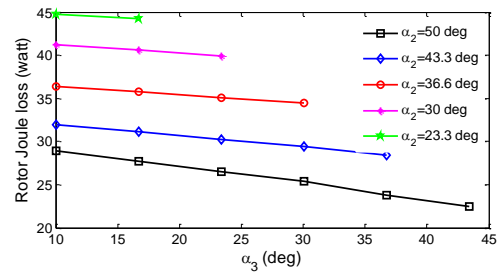
## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل دینامیکی بر مبنای مدارهای تزویج برای BDFIM تهیه شد. پارامترهای مدل دینامیکی یعنی اندوکتانس‌های خودی و متقابل مدارهای تزویج شده به وسیله روش تابع سیم‌پیچ به دست آورده شد. با استفاده از مدل دینامیکی به دست آمده تأثیر مدارهای رتور بر روی مقدار تزویج سیم‌پیچی‌های قدرت و کنترل و همچنین تلفات اهمی رتور BDFIM در شرایط بی‌باری مطالعه شد. دو نوع مدار رتور یعنی رتور آشیانه‌ای با حلقه‌های موازی و سری در این مطالعه در نظر گرفته شدند. با استفاده از مدل به دست آمده، تأثیر دهانه کمان و تعداد حلقه‌های رتور بر روی تزویج مغناطیسی سیم‌پیچی کنترل و قدرت، و همچنین تلفات اهمی بی‌باری رتور برای دو ساختار رتور گفته شده مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که تزویج مغناطیسی سیم‌پیچی قدرت و کنترل می‌تواند با بهینه‌سازی دهانه کمان حلقه‌های رتور بهبود یابد. همچنین، مشخص شد که تعداد حلقه‌های رتور اثر چندانی بر روی تزویج مغناطیسی سیم‌پیچی کنترل و قدرت ندارد، در حالی که تلفات اهمی بی‌باری رتور می‌تواند با افزایش تعداد حلقه‌های رتور کاهش یابد.

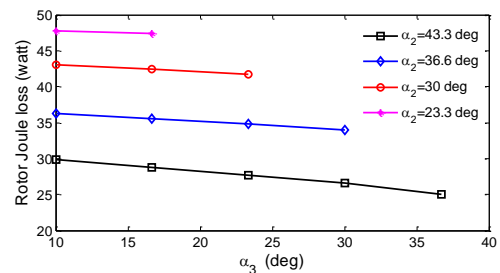
## ۶. مراجع

- [1] A. 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, 1999.
- [2] R. A. McMahon, P. C. Roberts, X. Wang and P. J. Tavner, "Performance of BDFM as generator and motor," IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol.153, No.2, 2006
- [3] S. Williamson, A. Ferreira, and A. Wallace, "Generalised theory of the brushless doubly-fed machine I-analysis," IEE Proc. Electr. Pow. App., Vol.144, No.2, pp.111-122, 2007.
- [4] X. Wang, et all, "Modeling and Optimization of Brushless Doubly-Fed Induction Machines Using Computationally Efficient Finite Element Analysis," IEEE Transactions on Industry Applications, pp. 4525-4534, 2016.

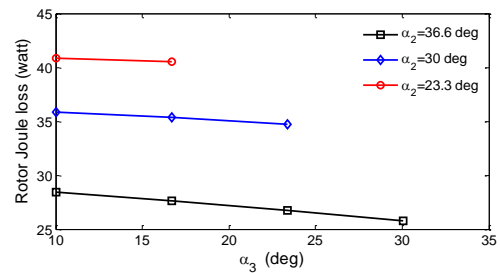
هر آشیانه، تلفات اهمی رتور کاهش می‌یابد، هر چند که این میزان کاهش تلفات قابل ملاحظه نیست.



(الف)

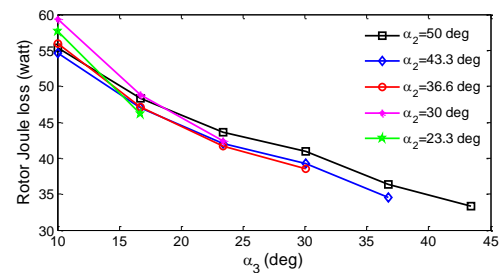


(ب)

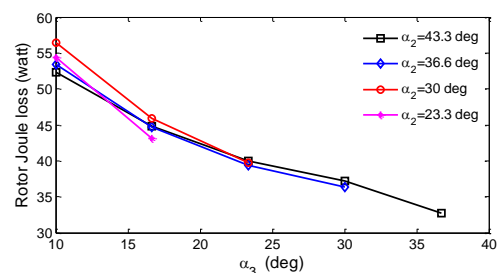


(ج)

شکل (۱۱): تلفات اهمی رتور BDFIM با ۳ حلقه موازی در هر آشیانه رتور با دهانه بزرگ‌ترین حلقه برابر با الف)  $\alpha_3=56.6^\circ$  (ب)  $\alpha_3=50^\circ$  (ج)  $\alpha_3=43.3^\circ$



(الف)



(ب)

- Analysis,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 52, No. 11, ASN 8108310, 2016.
- [9] 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, ASN 8203604, 2014.
- [10] D. T. Strous, X. Wang, H. Polinder, J. A. Ferreira, “Evaluating Harmonic Distortions in Brushless Doubly-Fed Induction Machines,” IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 23, No. 3, pp. 1191-1197, 2008.
- [11] H. Gorginpour, B. Jandaghi, H. Oraee, “A novel rotor configuration for brushless doubly-fed induction generators,” IET Electr. Power Appl., Vol.7, No.2, pp.106–11, 2013.
- [5] F. Barati, S. Shao, E. Abdi, H. Oraee and R. McMahon, “Generalized Vector Model for the Brushless Doubly-Fed Machine With a Nested-Loop Rotor”, Transactions on Industrial Electronics, Vol. 58, No. 6, pp. 2313-2321, 2010.
- [6] F. Blazquez, C. Vezanones, D. Ramirez, and C. Platero, “Characterization of the Rotor Magnetic Field in a Brushless Doubly-Fed Induction Machine,” IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No.3, pp. 599 – 607, 2009.
- [7] X. Wang, et all, “Harmonics Study of Nested-Loop Rotors in Brushless Doubly-Fed Induction Machines,” In 22<sup>nd</sup> International Conference on Electrical Machines, 2016, 30-38.
- [8] T. D. Strous, X. Wang, H. Polinder, J. A. Ferreira, “Brushless Doubly-Fed Induction Machines Magnetic Field

---

## **Dynamic Modeling and Investigation of the Rotor Circuit Influence on the No-Load Characteristics of Brushless Doubly Fed Induction Machine**

**H. Bagheri Naghneh<sup>1</sup>, S. Taghipour Boroujeni<sup>\*2</sup>, A. R. Rabiee<sup>3</sup>**

Engineering Dep. Of Shahrekord Univ

(Received: 09/04/2020; Accepted: 15/06/2020)

### **Abstract**

*In this paper, the influence of the rotor circuit on the characteristics of the brushless doubly-fed induction machine (BDFIM) is investigated. For this purpose, a dynamic model is provided for the nested-loop BDFIM. The model is based on the coupled circuits of the stator windings and the rotor loops. By using the winding function method, the self- and mutual-inductances of the coupled circuits are obtained as functions of the rotor position and design parameters. This model is used as a fast tool to predict the dynamic performance of the BDFIM and is verified by means of time-stepping Finite Element Analysis (FEA). Using the provided dynamic model, some characteristics of the BDFIM such as the Joule loss and the magnetic coupling between the power and control windings at no-load conditions are studied. Using the developed model, the effect of the number and the arc span of the rotor loops on the no-load characteristic of the BDFIMs is studied.*

**Keywords:** Brushless Doubly-Fed Induction Machine, Coupled Circuit Model, Dynamic Modeling, Finite Element Analysis, No-Load

---

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