# تحلیل عملکرد حالت دائم ماشین دوتحریکه بدون جاروبک

**سجاد توحیدی**[1]

۱- استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

stohidi@tabrizu.ac.ir

**چکیده:** ماشین دوتحریکه بدون جاروبک (**BDFM**) در واقع نوعی ماشین القایی است که دارای دو سیم‌پیچی در استاتور و برخوردار از رتور قفسی با ساختار خاص است. این ماشین به دلیل عدم استفاده از جاروبک و حلقه‌های لغزان جهت استفاده در کاربردهایی که قابلیت اطمینان بالا مورد نیاز است، نظیر توربین‌های بادی مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله، عملکرد حالت دائم **BDFM** در مود سنکرون که جذاب‌ترین مود کاری آن است، با جزئیات بیشتری مورد مطالعه قرار می‌گیرد و ضمن تجزیه و تحلیل فیزیکی، نتایج عملی مورد نیاز ارائه می‌گردد. رابطه جدیدی برای محاسبه گشتاورالکترومغناطیسی ارائه می‌گردد و بر مبنای نتایج آن، سهم گشتاورهای القایی و سنکرون در مود کاری سنکرون تعیین می‌شود. در این مقاله نشان داده شده است که در مود سنکرون، گشتاور سنکرون تاثیر غالب را دارد و بنابراین می‌توان در محاسبات حالت دائم با تقریب از گشتاورهای القایی صرف نظر نمود و حجم محاسبات را کاهش و تحلیل نتایج را تسهیل نمود.

**کلمات کلیدی:** ماشین دوتحریکه بدون جاروبک، مود سنکرون، عملکرد حالت دائم، گشتاور الکترومغناطیسی

**تاریخ ارسال مقاله:** ۱۳۹۲/۱۲/۱۸

**تاریخ پذیرش مشروط مقاله:** ۱۳۹۳/۰۹/۲۳

**تاریخ پذیرش مقاله:** ۱۳۹۴/۰۴/۱۱

**نام نویسنده‌ی مسئول:** دکتر سجاد توحیدی

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** تبریز، بلوار ۲۹ بهمن، دانشگاه تبریز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، اتاق ۱۱۰

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]

Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

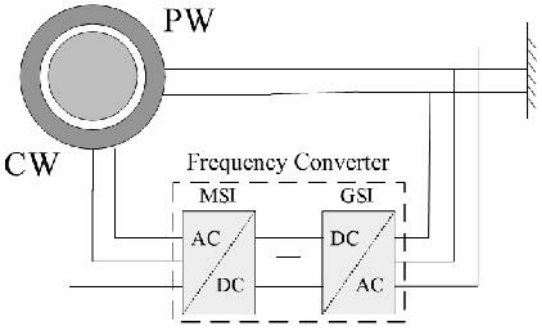
## ۱- مقدمه

ایده ماشین خودآبشاری اولین بار توسط Lydall درسال ۱۹۰۲ مطرح شد [۱]. سپس، Hunt ایده آن را توسعه داد [۲]،[۳]. Creedy نیز مطالعاتی را روی ساختمان استاتور و رتور انجام داد [۱]. بعد از او Broadway و Burbridge طرح رتور حلقه آشیانه‌ای را برای اولین بار ارائه دادند [۴]. آنها همچنین تحریک دوسویه ماشین را پیشنهاد کردند. تا قبل از آن، یکی از سیم پیچ‌های این ماشین به منبع تغذیه وصل می‌شد و دیگری یا اتصال کوتاه بود و یا به یک مقاومت متصل می‌شد. بعد از آن تحقیقات گسترده‌تری بر روی این ماشین که بیشتر با همان نام ماشین دوتحریکه بدون جاروبک (BDFM[۱]) شناخته می‌شد، انجام گرفت و گروههای مختلفی در دنیا در مورد ابعاد مختلف این ماشین به تحقیق پرداختند. چند رساله دکترا نیز در زمینه قابلیت اطمینان و کنترل BDFM به انجام رسیده است [۵]،[۶].

مدل حالت دائم BDFM توسط Roberts و دیگران ارائه شد و مورد تحلیل قرار گرفت [۷]. مقاله دیگری در سال ۲۰۱۲ میلادی در این زمینه ارائه گردید که ضمن تحلیل فیزیکی عملکرد و مدل ماشین در مودهای مختلف کاری القایی و سنکرون، مود کاری جدیدی به نام مود آبشاری دوگانه برای شرایط خطا ارائه شد [۸]. در این مقاله، منحنی‌های گشتاور-سرعت مودهای مختلف کاری BDFM به همراه نتایج عملی ارائه شده است. در مقاله حاضر، مود کاری اصلی BDFM یعنی مود کاری سنکرون با جزئیات بیشتری مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد و مؤلفه‌های مختلف القایی و سنکرون گشتاور ماشین در این مود تفکیک می‌شود. در ضمن، سهم هر یک از مؤلفه‌های گشتاور در تولید گشتاور ماشین تعیین می‌شود.

BDFM را می‌توان به صورت مفهومی، دو ماشین القایی با تعداد قطب‌های مختلف فرض کرد که رتور آن‌دو به صورت فیزیکی و الکتریکی به یکدیگر متصل شده‌اند. از این‌رو با فرکانس تغذیه ثابت، سرعت‌های سنکرون متفاوتی خواهند داشت. مطابق شکل (۱)، استاتور دارای دو سیم‌پیچی سه فاز مستقل است. یکی از این سیم‌پیچی‌ها به صورت مستقیم به شبکه متصل می‌شود و در نتیجه دارای فرکانس ثابت شبکه است. بخش عمده تبادل توان توسط این سیم‌پیچ انجام می‌شود و از این رو، آن را سیم‌پیچی توان (PW[۲]) می‌نامند. سیم‌پیچی دیگر از طریق یک مبدل فرکانسی دوسویه به شبکه متصل می‌شود. ظرفیت این مبدل کسری از توان نامی ماشین است. کنترل گشتاور یا سرعت و همچنین کنترل ولتاژ یا توان راکتیو PW، از طریق تنظیم جریان این سیم‌پیچی صورت می‌پذیرد و به همین علت، به سیم‌پیچی کنترل(CW[۳]) موسوم است. فرکانس جریان این سیم‌پیچی به گونه‌ای تنظیم می‌شود که سرعت رتور مورد نظر به دست آید.

مبدل فرکانسی متشکل از دو مبدل دو سویه پشت به پشت است که از طریق پیوند DC به هم متصلند. مبدل سمت شبکه (GSI[۴]) ولتاژ پیوند DC را کنترل می‌کند تا مقدار آن ثابت بماند. ضریب توان GSI قابل تنظیم است، ولی جهت کاهش ظرفیت مبدل معمولا آن را برابر یک انتخاب می‌کنند. در مقابل، ولتاژ اعمالی مبدل سمت ماشین (MSI[۵]) جریان سیم‌پیچی کنترل را تنظیم می‌کند و از این طریق، توان اکتیو PW یا سرعت رتور و همچنین توان راکتیو یا ضریب توان PW را کنترل می‌کند.




**شکل (۱): ساختمان BDFM**

به منظور جلوگیری از تزویج مستقیم PW و CW، و در عین حال برقراری تزویج غیر مستقیم بین این دو سیم‌پیچی و جلوگیری از اعمال نیروی الکترومغناطیسی نامتعادل بر رتور باید دو شرط زیر برقرار باشد:

الف) تعداد قطبهای PW و CW باید متفاوت باشد. این تفاوت بایستی بیشتر از یک باشد.

ب) تعداد حلقه‌های رتور باید برابر مجموع تعداد زوج قطب‌های PW و CW باشد. به این منظور عموما از ساختار رتور حلقه آشیانه‌ای استفاده می‌شود که در شکل (۲) نشان داده شده است.

برای توضیح بیشتر عدم وجود تزویج بین سیم‌پیچ‌های استاتور و رتور، ماتریس اندوکتانس برای BDFM را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

$$M = \begin{bmatrix} M_{s1} & 0 & M_{s1r} \\ 0 & M_{s2} & M_{s2r} \\ M_{s1r}^T & M_{s2r}^T & M_r \end{bmatrix} \quad (۱)$$

مورد مطالعه در این مقاله،BDFMکه در آن، به عنوان مثال برای

$M_{s1}$ ماتریس اندوکتانس خودی سیم‌پیچ سه فاز توان (استاتور) با ابعاد ۳×۳،

$M_{s2}$ ماتریس اندوکتانس خودی سیم‌پیچ سه فاز کنترل (استاتور) با ابعاد ۳×۳،

$M_r$ ماتریس اندوکتانس خودی رتور (دارای ۱۸ حلقه) با ابعاد ۱۸×۱۸،

$M_{s1r}$ ماتریس اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ سه فاز توان (استاتور) با ۱۸ حلقه رتور با ابعاد ۱۸×۳ و

$M_{s2r}$ ماتریس اندوکتانس متقابل سیم‌پیچ سه فاز کنترل (استاتور) با ۱۸ حلقه رتور با ابعاد ۱۸×۳

است. همچنان که مشاهده می‌شود اندوکتانس متقابل بین سیم‌پیچ‌های توان و کنترل در استاتور برابر صفر است. دلیل این مساله را می-




Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]

توان در نابرابر بودن تعداد قطب‌های سیم‌پیچ‌های توان و کنترل استاتور دانست.

اگر $\theta$ زاویه مکانیکی و $n(\theta)$ تابع دور و برابر با مجموع تعداد دورهای یک سیم‌پیچی با در نظر گرفتن جهت جریان باشد و همچنین شعاع داخلی استاتور، طول استاتور و طول یکنواخت فاصله هوایی به ترتیب برابر r، l و g باشد، اندوکتانس پیوندی بین دو سیم‌پیچی ۱ و ۲ توزیع شده در داخل شیارهای استاتور برابر خواهد بود با [۹]:

$$L_{12} = \frac{\mu_0 r l}{g}\int_0^{2\pi} n_1(\theta)\left(n_2(\theta) - \frac{\int_0^{2\pi} n_2(\theta')d\theta'}{2\pi}\right)d\theta \qquad (۲)$$

اگر سیم‌پیچی‌های ۱ و ۲ به صورت کاملا سینوسی و با تعداد قطب مختلف توزیع شده باشند، انتگرال فوق برابر صفر است. در نتیجه، به دلیل نابرابر بودن تعداد قطب‌های سیم‌پیچ‌های توان و کنترل، اندوکتانس متقابل آنها صفر بوده، بین آنها تزویج مستقیم وجود ندارد.

البته اندوکتانس متقابل رتور و سیم‌پیچ‌های استاتور تابع موقعیت زاویه‌ای رتور است. توضیحات مفصل به همراه شکل موج‌های مربوطه در پیوست مرجع [۱۰] آمده است. البته با اعمال تبدیل پارک و به دست آوردن معادلات در قاب مرجع گردان، اندوکتانس متقابل رتور و سیم‌پیچ توان و همچنین اندوکتانس متقابل رتور و سیم‌پیچ کنترل به طور مستقل از موقعیت زاویه‌ای رتور، ثابت خواهند بود.

**شکل(۲): رتور حلقه آشیانه‌ای [۸]**

## ۲- مودهای کاری BDFM

### ۲-۱- مود کاری القایی ساده

در این مود کاری، یکی از سیم‌پیچی‌های استاتور، برای مثال CW، باز و سیم‌پیچ دیگر به منبع ولتاژ متصل است. در این مود کاری BDFM دقیقا مشابه یک ماشین القایی معمولی عمل می‌کند، اما به دلیل بزرگ بودن راکتانس نشتی، گشتاور به مراتب کمتری تولید می‌کند [۸].

### ۲-۲- مود کاری القایی آبشاری

در این حالت کاری، یکی از سیم‌پیچی‌های استاتور، مثلا PW، به منبع ولتاژ وصل و دیگری اتصال کوتاه است. عملکرد ماشین در این حالت کاری مشابه دو ماشین القایی به شرح زیر است که به یکدیگر کوپل شده‌اند[۸]:

الف) در ماشین القایی اول، سیم‌پیچ استاتور که به منبع ولتاژ متصل است، به عنوان سیم‌پیچ تحریک و رتور به عنوان سیم‌پیچ آرمیچر عمل می‌کند.

ب) در ماشین القایی دوم رتور به عنوان سیم‌پیچ تحریک و سیم‌پیچ اتصال کوتاه شده استاتور به عنوان سیم‌پیچ آرمیچر عمل می‌کند.

### ۲-۳- مود کاری سنکرون

عملکرد BDFM در حالت‌های کاری القایی نسبت به ماشین‌های القایی مشابه ضعیف‌تر است، چرا که شار نشتی آن به دلیل ساختار خاص رتور بیشتر است. در ضمن، سرعت رتور وابسته به میزان گشتاور بار خواهد بود. اما حالت کاری اصلی و جالب توجه کارکرد BDFM حالت کاری سنکرون است. به منظور تمرکز بر مود کاری سنکرون، MMF های تولید شده توسط سیم‌پیچ‌های استاتور و رتور در جدول ۱ نشان داده شده است. در این جدول، شناسه‌های 1، 2 و r به ترتیب متعلق به PW، CW و رتور و p، ω و N به ترتیب نشان‌گر تعداد زوج-قطب‌ها، سرعت زاویه‌ای و تعداد حلقه‌ها هستند.

در واقع، ساختار خاص رتور به گونه‌ای است که در مواجهه با شار $p_1$ زوج قطبی PW، MMF ای تولید می‌کند که هم شامل مؤلفه $p_1$ زوج قطبی (با نام $MMF_{r1-1}$) است و هم شامل مؤلفه $p_2$ زوج قطبی (با نام $MMF_{r1-2}$). این اتفاق در مواجهه رتور با شار $p_2$ زوج قطبی CW هم می‌افتد و مؤلفه‌های $p_1$ زوج قطبی $MMF_{r2-1}$ و $p_2$ زوج قطبی MMFr2-2 توسط رتور تولید می‌شود.

واضح است که سرعت و جهت چرخش $MMF_1$ و $MMF_{r1-1}$ در فاصله هوایی همواره یکسان است و تزویج آنها منجر به تولید یک گشتاور القایی مشابه یک ماشین القایی $p_1$ زوج قطبی می‌شود. این وضعیت در مورد $MMF_2$ و $MMF_{r2-2}$ نیز برقرار است و در نتیجه آن گشتاور القایی دیگری همانند یک ماشین القایی $p_2$ زوج قطبی به وجود می‌آید. در مود القایی آبشاری هر دوی این گشتاورهای القایی وجود دارد و همان‌گونه که گفته شد، عملکرد BDFM در این مود، مشابه دو ماشین القایی کوپل شده است. در مود القایی ساده نیز یکی از ماشین‌های القایی فوق – بسته به اینکه کدام از سیم‌پیچ‌های استاتور به منبع وصل شده باشد – وجود دارد.

در مود سنکرون نیز دو گشتاور القایی مذکور وجود دارند، اما تفاوت اصلی آنجاست که در این مود گشتاور دیگری نیز وجود دارد که گشتاور سنکرون نامیده می‌شود. این گشتاور ناشی از تزویج $MMF_2$ و $MMF_{r1-2}$ و همچنین تزویج $MMF_1$ و $MMF_{r2-1}$ است. لازمه این امر یکسان بودن سرعت و جهت چرخش زوج MMFهای فوق است. بنابراین با توجه به جدول (۱)، سرعت سنکرون ماشین، یعنی سرعتی که ماشین در حالت کاری سنکرون قرار می‌گیرد، برابر است با:

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

**جدول (۱): MMF های تولید شده در فاصله هوایی BDFM**

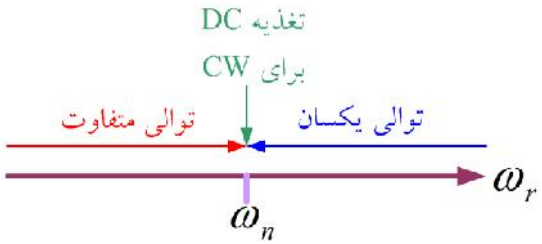
| | تولید شده توسط | تعداد زوج قطب‌ها | سرعت الکتریکی نسبت به رتور | سرعت الکتریکی نسبت به استاتور |
|---|---|---|---|---|
| MMF1 | PW | $p_1$ | $\omega_1 - p_1\omega_r$ | $\omega_1$ |
| $MMF_{r1-1}$ | RW در پاسخ به $MMF_1$ | $p_1$ | $\omega_1 - p_1\omega_r$ | $\omega_1$ |
| $MMF_{r1-2}$ | RW در پاسخ به $MMF_1$ | $p_2$ | $-(\omega_1 - p_1\omega_r)$ | $-\omega_1 + p_1\omega_r + p_2\omega_r = -\omega_1 + N_r\omega_r$ |
| $MMF_2$ | CW | $p_2$ | $\omega_2 - p_2\omega_r$ | $\omega_2$ |
| $MMF_{r2-1}$ | RW در پاسخ به $MMF_2$ | $p_1$ | $-(\omega_2 - p_2\omega_r)$ | $-\omega_2 + p_2\omega_r + p_1\omega_r = -\omega_2 + N_r\omega_r$ |
| $MMF_{r2-2}$ | RW در پاسخ به $MMF_2$ | $p_2$ | $\omega_2 - p_2\omega_r$ | $\omega_2$ |

$$\omega_1 - p_1\omega_r = -(\omega_2 - p_2\omega_r) \Rightarrow \omega_r = \frac{\omega_1 + \omega_2}{p_1 + p_2} \qquad (۳)$$

در واقع، فرکانس CW باید به گونه‌ای تنظیم شود که رابطه (۳) برقرار گردد. این فرکانس می‌تواند مثبت، منفی یا صفر باشد که اگر صفر باشد، یعنی CW از طریق یک منبع DC تغذیه شود، سرعت طبیعی یا سرعت سنکرون نامی ($\omega_n$) به دست می‌آید.

$$\omega_n = \frac{\omega_1}{p_1 + p_2} \qquad (۴)$$

حال اگر توالی فازهای سیم‌پیچ‌های کنترل و توان یکسان باشد و در نتیجه، جهت چرخش میدان‌های دو سیم‌پیچی یکی باشد، سرعت رتور بیش از سرعت طبیعی خواهد بود. همچنین، اگر فرکانس سیم‌پیچ کنترل منفی باشد، یعنی توالی فاز سیم‌پیچ‌های توان و کنترل مشابه نباشند، سرعت چرخش رتور کمتر از سرعت طبیعی می‌شود (شکل ۳).




**شکل (۳): سرعت رتور در حالت کاری سنکرون**

بدین ترتیب، لغزش رتور نسبت به مؤلفه‌های $p_1$ و $p_2$ زوج قطبی شار فاصله هوایی به صورت زیر خواهد بود:

$$\begin{cases} s_1 = \dfrac{\omega_1 - p_1\omega_r}{\omega_1} \\ s_2 = \dfrac{\omega_1 - p_1\omega_r}{\omega_1 - N_r\omega_r} \end{cases} \qquad (۵)$$

گشتاور الکترومغناطیسی BDFM از رابطه (۶) به دست می‌آید [۱۱] که با مقداری عملیات ریاضی به صورت جدیدی قابل بیان است که در رابطه (۵) آمده است. در این رابطه، $T_e$ گشتاور الکترومغناطیسی و $T_{I1}$، $T_{I2}$ و $T_S$ به ترتیب مؤلفه‌های القایی اول، القایی دوم و سنکرون آن است. گشتاور القایی $T_{I1}$ ناشی از تزویج سیم‌پیچ‌های PW و رتور و همچنین گشتاور القایی $T_{I2}$ ناشی از تزویج سیم‌پیچ‌های CW و رتور است. وجود این دو گشتاور به منزله وجود دو ماشین القایی در داخل BDFM است.

$$T_e = 1.5p_1\mathrm{Im}[\lambda_1^* i_1] + \frac{3}{2}p_2\mathrm{Im}[\lambda_2 i_2^*] \qquad (۶)$$

$$\begin{aligned} T_e &= T_{I1} + T_{I2} + T_S \\ T_{I1} &= -1.5\frac{M_{1r}L_2}{L}p_1(\lambda_{1d}\lambda_{rq} - \lambda_{1q}\lambda_{rd}) \\ T_{I2} &= 1.5\frac{M_{2r}L_1}{L}p_2(\lambda_{2d}\lambda_{rq} - \lambda_{2q}\lambda_{rd} \\ T_S &= 1.5\frac{M_{1r}M_{2r}}{L}(p_1 + p_2) \times \\ &\quad (\lambda_{1d}\lambda_{2q} - \lambda_{1q}\lambda_{2d}) \end{aligned} \qquad (۷)$$

اما گشتاور سنکرون ناشی از تزویج PW و CW است. همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، از آنجا که این سیم‌پیچ‌ها دارای تعداد قطب‌های متفاوتی هستند نمی‌توانند به طور مستقیم تزویج حاصل کنند. در واقع، رتور به دلیل ساختار خاص خود مشابه یک آینه عمل می‌کند و با تبدیل میدان‌های مغناطیسی p1 و p2 زوج قطبی به یکدیگر باعث ایجاد تزویج متقاطع PW و CW می‌گردد.

در روابط (۴) و (۵)، L و M به ترتیب اندوکتانس خودی سیم‌پیچ و اندوکتانس پیوندی دوسیم‌پیچ را نشان می‌دهند. شارهای پیوندی سیم‌پیچی‌ها که با علامت $\lambda$ نمایش داده شده است، از روابط زیر حاصل می‌گردد.

$$\lambda_{1d} = L_1 i_{1d} + M_{1r} i_{rd} \qquad (۸)$$




[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

$$\lambda_{1q} = L_1 i_{1q} + M_{1r} i_{rq} \quad (۹)$$

$$\lambda_{2d} = L_2 i_{2d} + M_{2r} i_{rd} \quad (۱۰)$$

$$\lambda_{2q} = L_2 i_{2q} + M_{2r} i_{rq} \quad (۱۱)$$

$$\lambda_{rd} = L_r i_{rd} + M_{1r} i_{1d} + M_{2r} i_{2d} \quad (۱۲)$$

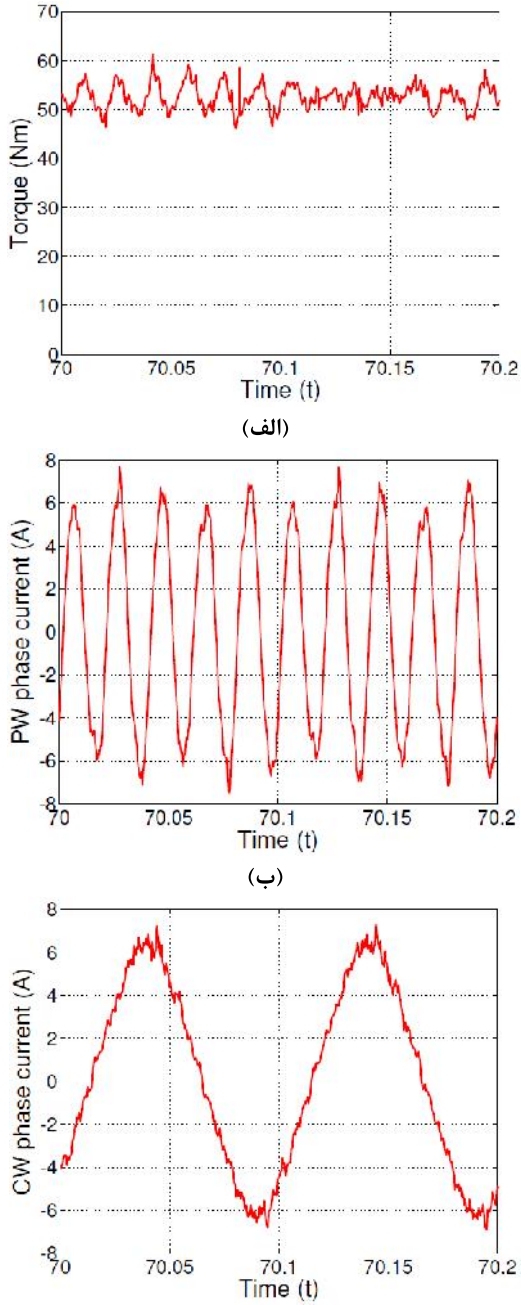
$$\lambda_{rq} = L_r i_{rq} + M_{1r} i_{1q} + M_{2r} i_{2q} \quad (۱۳)$$

جهت تأیید روابط فوق از نتایج عملی استفاده شده است. یک BDFM که مشخصات آن در پیوست آمده است [۱۲]، در مود سنکرون مورد آزمایش قرار گرفته است. در جدول (۲) گشتاورهای اندازه‌گیری شده و محاسبه شده BDFM در سرعت ۶۰۰ دور بر دقیقه نشان داده شده است. این شکل به روشنی درستی رابطه (۶) و (۷) را نشان می‌دهد. اختلاف مشاهده شده در مقادیر اندازه‌گیری شده و محاسبه شده می‌تواند ناشی از عوامل زیر باشد:

- خطا در تخمین پارامترها و اندازه‌گیری گشتاور
- وجود گشتاورهای ناشی از هارمونیک‌های بالاتر فضایی، خصوصا با توجه به ساختار خاص رتور که منجر به تولید MMF با محتوای هارمونیکی بالایی می‌گردد
- نادیده گرفتن اثر اشباع هسته.

مطلب مهم‌تری که باید مورد بررسی قرار گیرد، تعیین سهم گشتاورهای القایی و سنکرون است که این کار در جدول (۲) انجام شده است. با توجه به این نمودار به روشنی می‌توان دریافت که در مود سنکرون، گشتاور سنکرون نقش اصلی را بر عهده دارد و گشتاورهای القایی به مراتب سهم کمتری دارند. دلیل این امر را می‌توان لغزش بالای ماشین در سرعت سنکرون ۶۰۰ دور بر دقیقه نسبت به میدان-های دوار ناشی از جریان PW و CW و همچنین اندوکتانس نشتی قابل توجه رتور دانست. نتیجه مهمی که می‌توان گرفت آن است که در محاسبه گشتاور BDFM در مود سنکرون می‌توان با تقریب خوبی از گشتاورهای القایی صرف نظر نمود و $T_e$ را برابر $T_S$ قلمداد کرد.

نمودارهای اندازه‌گیری شده گشتاور، جریان فاز a در PW و جریان فاز a در CW در شکل (۴) نشان داده شده است. با توجه به شکل (۴-الف) مشاهده می‌شود ریپل گشتاور BDFM نسبتا قابل توجه است. دلیل این مساله را می‌توان عمدتا وجود هارمونیک‌های فضایی غیر مفید تولید شده توسط رتور دانست. البته ریپل گشتاور نه چندان مطلوب BDFM را می‌توان یکی از معایب آن برشمرد که باعث شده تحقیقات در مورد طراحی این ماشین کماکان ادامه داشته باشد. شکل (۴-ب) و (۴-ج) نیز به ترتیب نمودارهای جریان‌های PW و CW را نشان می‌دهد که به ترتیب حدودا دارای فرکانسهای ۵۰ هرتز و ۱۰ هرتز هستند. این فرکانس‌ها رابطه (۴) را تایید می‌کند.




**شکل (۴): نتایج اندازه گیری شده در سرعت مرجع ۶۰۰ rpm**
**الف: گشتاور خروجی موتور، ب: جریان فاز a سیم‌پیچ توان**
**ج: جریان فاز a سیم‌پیچ کنترل**

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017

**جدول (۲): اندازه گشتاورهای اندازه‌گیری شده، محاسبه شده و مؤلفه‌های القایی و سنکرون BDFM**

| | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| گشتاور اندازه‌گیری شده (Nm) | ۲۱ | ۲۹ | ۴۰/۵ | ۵۲/۵ | ۶۰/۶ |
| گشتاور محاسبه شده (Nm) | ۱۵/۲۹ | ۲۲/۶۶ | ۳۵/۲۳ | ۴۹/۹۰ | ۵۹/۳۹ |
| گشتاور سنکرون ناشی از تزویج غیر مستقیم سیم‌پیچ توان و سیم‌پیچ کنترل از طریق رتور (Nm) | ۱۵/۲۶ | ۲۲/۳۷ | ۳۴/۴۲ | ۴۸/۳۷ | ۵۷/۳۷ |
| گشتاور القایی ناشی از تزویج مستقیم سیم‌پیچ توان و رتور (Nm) | ۰/۲۵ | ۰/۲۰ | ۰/۱۸ | ۰/۱۹ | ۰/۱۴ |
| گشتاور القایی ناشی از تزویج مستقیم سیم‌پیچ کنترل و رتور (Nm) | -۰/۲۲ | ۰/۰۸ | ۰/۶۳ | ۱/۳۴ | ۱/۸۸ |

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله رابطه جدیدی برای گشتاور ماشین دوتحریکه بدون جاروبک ارائه شد. طبق این رابطه، گشتاور تولیدی ماشین از سه مؤلفه زیر تشکیل یافته است:

۱- گشتاور القایی ناشی از تزویج مستقیم سیم‌پیچ توان و رتور

۲- گشتاور القایی ناشی از تزویج مستقیم سیم‌پیچ کنترل و رتور

۳- گشتاور سنکرون ناشی از تزویج غیر مستقیم سیم‌پیچ توان و سیم-پیچ کنترل از طریق رتور

درستی رابطه ارائه شده با استفاده از نتایج عملی مورد تایید قرار گرفت. همچنین، سهم هر یک از سه گشتاور مذکور در تولید گشتاور تعیین شد. نشان داده شد که در مود سنکرون، گشتاور سنکرون بخش عمده را تشکیل می‌دهد و گشتاورهای القایی به علت لغزش بالای رتور نسبت به میدان‌های ناشی از سیم‌پیچ‌های استاتور و همچنین بالا بودن اندوکتانس رتور، سهم بسیار کمتری را به خود اختصاص می‌دهند. بنابراین می‌توان با تقریب خوبی گشتاور BDFM را معادل گشتاور سنکرون دانست. اهمیت این نتیجه‌گیری را می‌توان در ساده‌سازی مدل‌سازی و تحلیل حالت دائم ماشین و کاهش حجم محاسبات دانست.

## پیوست

### پارامترهای BDFM ارجاع شده به سمت PW

| Parameter | Value | Parameter | Value |
|---|---|---|---|
| $p_1$ | 2 | $L_{m1}$ | 1.125 $H$ |
| $p_2$ | 4 | $M_2$ | 0.461 $H$ |
| $Nr$ | 6 | $L_{l1}$ | 0.017 $H$ |
| Stator slots | 36 | $L_{l2}$ | 0.021 $H$ |
| Rotor slots | 24 | $L_{lr}$ | 0.067 $H$ |
| PW nominal voltage | 400 V | $R_1$ | 7.28 $\Omega$ |
| CW nominal voltage | 400 V | $R_2$ | 6.65 $\Omega$ |
| PW nominal current | 14 A | $R_r$ | 4 $\Omega$ |
| CW nominal current | 7 A | $n_1/n_2$ | 1.176 |


## سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از گزارش نهائی طرح پژوهشی با عنوان "تجزیه و تحلیل استفاده از ژنراتور القایی دوتحریکه بدون جاروبک در توربین-های بادی" می باشد که از محل اعتبارات پژوهشی دانشگاه تبریز اجرا گردیده است.


## مراجع


[1] Abdi, E., Modeling and instrumentation of Brushless Doubly Fed (Induction) Machines, Ph.D. dissertation, Churchill College, University of Cambridge, Cambridge, 2006.

[2] Hunt, L. J., "A new type of induction motor", Inst. Electr. Eng. Journal, Vol. 39, No. 186, pp. 648-667, 1907.

[3] Hunt, L. J., "The 'cascade' induction motor", Inst. Electr. Eng. Journal, Vol. 52, No. 230, pp. 406-426, 1914.

[4] Broadway, A. R. W., Burbridge, L., "Self-cascaded machine: a low speed motor or high-frequency brushless alternator", IEE Proceeding, Vol. 117, No. 7, pp. 1277-1290, 1970.

[۵] هومن عربیان، مدل قابلیت اطمینان سیستم توربین باد با ژنراتور دوسوتغذیه بدون جاروبک BDFG، رساله دکترای تخصصی، دانشگاه صنعتی شریف، آبان ۱۳۸۸.

[۶] فرهاد براتی، طراحی و پیاده سازی سیستم کنترل برداری ژنراتور القایی بدون جاروبک با تغذیه دوگانه(BDFG) برای کاربرد در نیروگاه‌های بادی، رساله دکترای تخصصی، دانشگاه صنعتی شریف، ۱۳۸۹.

[7] Roberts, P. C., McMahon, R. A., Tavner, P. J., Maciejowski, J. M., Flack, T. J., "Equivalent circuit for the brushless doubly fed machine (BDFM) including parameter estimation and experimental verification", IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 152, No. 4, pp. 933- 942, 2005.

[8] Tohidi, S., Zolghadri, M.R., Oraee, H., Tavner, P., Abdi, E., Logan, T., "Performance of the Brushless Doubly-fed Machine Under Normal and Fault Conditions", IET Electric Power Application, Vol. 6, No. 9, pp. 621-627, 2012.

[9] Wu, Z., Ojo, O., "Coupled-circuit- model simulation and air-gap field calculation of a dual-stator-winding induction machine", IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 153, No. 3, pp. 387-400 , 2006.



[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]

[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]

[10] Roberts, P. C., A Study of Brushless Doubly Fed (Induction) Machines, Ph.D. dissertation, Emanuel College, University of Cambridge, Cambridge, 2004.
[11] Poza, J. , Oyarbide, E. , Roye, D., Rodriguez, M., "Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine", IEE Proceedings - Electric Power Applications, Vol. 153, No. 5, pp. 726-734, 2006.
[12] Tohidi, S., Oraee, H., Zolghadri, M. R., Shao, S., Tavner, P., "Analysis and Enhancement of Low Voltage Ride-through Capability of Brushless Doubly Fed Induction Generator", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 60, No. 3, pp. 1146-1155, 2013.

## زیرنویس‌ها

[1] Brushless Doubly Fed Machine
[2] Power Winding
[3] Control Winding
[4] Gris Side Inverter
[5] Machine Side Inverter
[6] Magneto-motive Force

[ Downloaded from jiaeee.com on 2026-01-08 ]
[ DOR: 20.1001.1.26765810.1396.14.1.12.3 ]
Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers - Vol.14- No.1- Spring 2017