

## بررسی سرعت و زمان رفع خطای بحرانی در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه

وحید مرتضی پور<sup>۱</sup>، حمید لسانی<sup>۱</sup>، علیرضا عباسزاده<sup>۲</sup>، ایمان احمدی جنیدی<sup>۱</sup>  
۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تهران  
۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل  
ایران

واژه‌های کلیدی: ژنراتور القایی دوسو تغذیه، سرعت بحرانی رفع خطا، زمان بحرانی رفع خطا

### چکیده

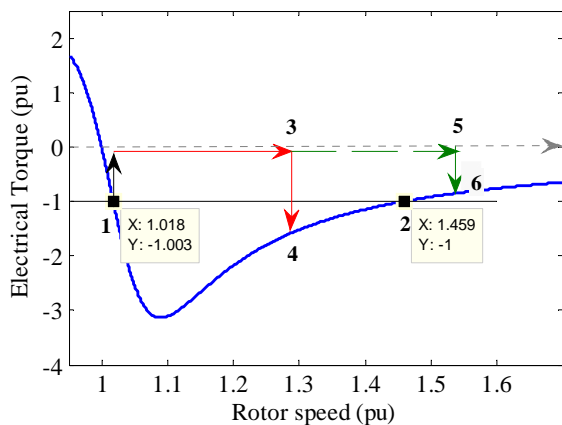
به دلیل نفوذ ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه در شبکه قدرت و نیاز به باقی ماندن در شبکه در طول خطا، بحث سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی در طول خطاهای بزرگ برای این ژنراتورها از اهمیت خاصی برخوردار است. در این مقاله سرعت بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا بدست آمده و اثر اینرسی توربین، تغییر گشتاور مکانیکی، تغییر مقاومت کربار و همچنین تغییر زاویه گشتاور بر سرعت و زمان رفع خطای بحرانی بررسی شده است.

### ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، مشکلات ناشی از آلودگی سوخت‌های فسیلی و همچنین کاهش منابع انرژی، باعث شده تا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریکی افزایش یابد. یکی از روش‌ها که در بسیاری از کشورها مورد تحقیق و بهره‌برداری است و در سال‌های اخیر پیشرفت زیادی در آن

وجود آمده است، استفاده از نیروگاه‌های بادی است. در سال‌های اخیر توربین‌های بادی سرعت متغیر بطور وسیعی نصب و بهره‌برداری شده‌اند. در این بین ژنراتور القایی دوسو تغذیه به عنوان ژنراتور برتر در مقایسه با دیگر ژنراتور سرعت متغیر یعنی ژنراتور سنکرون (با مبدل الکترونیک قدرت با توان نامی در استاتور) مطرح شده‌است. از مزایای ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه می‌توان به نصب مبدل قدرت با ۳۰٪ توان نامی و توانایی کنترل مجزای توان اکتیو و راکتیو اشاره کرد. مبدل قدرت با ۳۰٪ توان نامی علاوه بر هزینه، سایز و وزن کمتر، تلفات کمتری در مقایسه مبدل‌های الکترونیک قدرت با توان نامی دارد [۱]. با توجه به نفوذ مزارع بادی و افزایش توان آن‌ها در شبکه قدرت، نقش این مزارع در مسائل مربوط به پایداری شبکه و کیفیت توان اهمیت یافته است. در کشورهایی که انرژی باد در آن نفوذ زیادی یافته است، الزاماتی برای مزارع بادی در مسائل مربوط به شبکه قدرت وجود دارد [۲]. از الزامات تعیین شده در این شبکه‌ها، قابلیت عملکرد ژنراتور

با فرض ثابت ماندن گشتاور مکانیکی، شفت روتور به شدت شتاب می‌گیرد بنابراین در مطالعه و تحلیل پایداری اغتشاش بزرگ (به عنوان مثال اتصال کوتاه)، آنالیز سرعت در زمان بعد از اتصال کوتاه و عوامل موثر از آن نیز از اهمیت برخوردار است.



شکل ۱: منحنی گشتاور-سرعت ژنراتور القایی

پایداری یا ناپایداری ژنراتور به زمان رفع خطا و سرعت ژنراتور قبل از رفع خطا بستگی دارد. مفهوم سرعت بحرانی روتور یک ژنراتور القایی را می‌توان با استفاده از منحنی گشتاور-سرعت بهتر درک کرد. در طول خطا ژنراتور القایی دوسو تغذیه به ژنراتور القایی معمولی تبدیل می‌شود و بنابراین برای سادگی در درک این مفهوم از منحنی گشتاور ژنراتور القایی معمولی که در شکل (۱) نشان داده، استفاده شده است. در شکل (۱)، به ازای گشتاور مکانیکی و ثابت یک پریونیتی دو نقطه تعادل وجود دارد. این دو سرعت پایدار برای ژنراتور نمونه  $1/0.18$  و  $1/0.45$  پریونیت است. نقطه (۱)، سرعت حالت پایدار و نقطه (۲) سرعت بحرانی است. با رخ دادن اتصال کوتاه گشتاور الکتریکی صفر می‌شود و بنابراین سرعت افزایش می‌یابد و اگر خطا تا قبل از سرعت بحرانی به عنوان مثال در نقطه (۳) برطرف شود گشتاور الکتریکی، نقطه (۴)، بیشتر از گشتاور مکانیکی بوده و سرعت کاهش می‌یابد و به سرعت پایدار بازمی‌گردد و اگر بعد از سرعت بحرانی بطور مثال در نقطه (۵) خطا برطرف شود، گشتاور الکتریکی، نقطه (۶)، کمتر از گشتاور مکانیکی می‌شود و

در طول خطاست. ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه با توجه به اتصال مستقیم استاتور آن‌ها به شبکه، در صورت محافظت از مبدل قدرت و لینک dc قرار گرفته در مبدل می‌توانند در طول خطا نیز متصل به شبکه باقی بمانند. یکی از روش‌های متداول و پرکاربرد برای حفاظت از مبدل و لینک dc، اتصال مقاومت کنار گذر موسوم به مقاومت کروبار در سمت روتور است [۳ و ۴]. بنابراین در طول خطاهای بزرگ ژنراتور القایی دوسو تغذیه عملکردی مشابه ژنراتور القایی معمولی خواهد داشت و مباحث مربوط به سرعت بحرانی و زمان بحرانی رفع خطا برای آن مطرح خواهد بود.

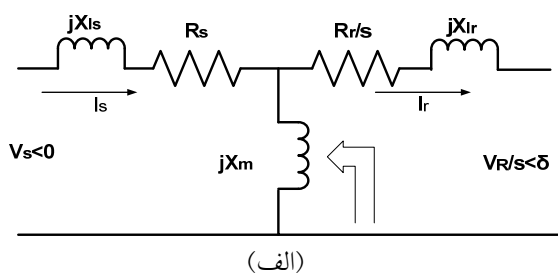
سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی در مورد ژنراتورهای القایی، بصورت روابط ریاضی در مرجع [۵] مطرح شد و تأثیر تغییر پارامترها نیز در آن بررسی شد. مرجع [۶] تأثیر مدل‌های مختلف ژنراتور و توربین را بر زمان بحرانی رفع خطا بررسی کرده است. مرجع [۶] تأثیر لحاظ کردن توربین را بر زمان رفع خطای بحرانی با شبیه‌سازی و روش سعی و خطا بررسی کرده است. در این مقاله سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی ژنراتور القایی دوسو تغذیه بصورت روابط ریاضی بدست آمده و تأثیر تغییر گشتاور مکانیکی، اثر لختی توربین و تغییر مقاومت کروبار در زمان رفع خطای بحرانی بررسی شده است.

در بخش بعد این مقاله مفهوم سرعت و زمان رفع خطای بحرانی آمده، در بخش سوم گشتاور الکتریکی قبل و بعد از خطا در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه بدست آمده است. در بخش چهارم سرعت حالت پایدار و سرعت بحرانی رفع خطا محاسبه شده است. در بخش پنجم زمان بحرانی رفع خطا بدست آمده است. در بخش آخر این نتایج بدست آمده از این مقاله بطور خلاصه بیان شده است.

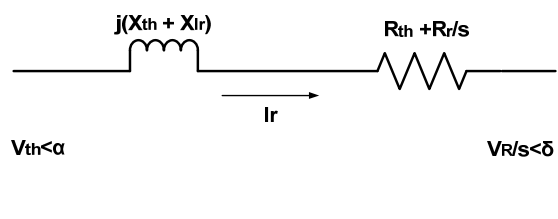
## ۲- مفهوم سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی

در شرایط وقوع اتصال کوتاه در شبکه، به علت فقدان و یا کاهش گشتاور الکتریکی در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه و

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



(الف)



(ب)

شکل ۳: مدار معادل ژنراتور القایی دوسو تغذیه  
الف) مدار معادل کامل ب) مدار معادل ساده شده

$$R_{th} = \frac{X_m^2 R_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (1)$$

$$X_{th} = \frac{R_s^2 X_m + X_m X_{ls} X_s}{R_s^2 + X_s^2} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \tan^{-1} \left( \frac{X_s}{R_s} \right) \quad (3)$$

گشتاور الکتریکی با توجه به رابطه (۴) محاسبه می‌شود  
[۸]:

$$T_e = \frac{P_{ag}}{\omega_s} \quad (4)$$

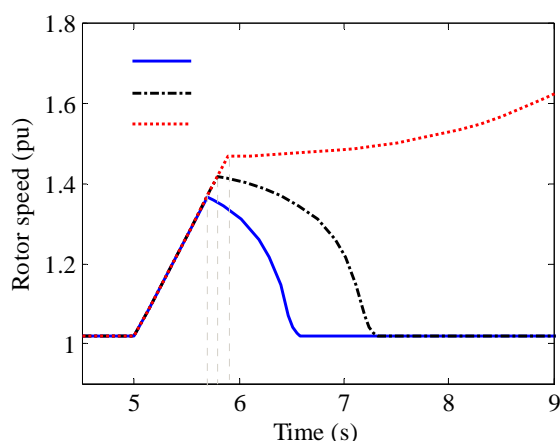
در رابطه فوق  $P_{ag}$  توانی است که به فاصله هوایی در ژنراتور می‌رسد و با استفاده از رابطه زیر قابل محاسبه است  
[۶]:

$$P_{ag} = \text{Re}(V_{th} \angle \alpha I_r^* - R_{th} |I_r|^2) \quad (5)$$

$$= \text{Re} \left( \frac{R_r}{S} |I_r|^2 + \frac{V_r}{S} \angle \delta I_r^* \right)$$

با توجه به مدار معادل، جریان روتور بصورت رابطه (۶) قابل محاسبه است:

سرعت همچنان افزایش خواهد یافت و به سرعت پایدار نخواهد رسید. شکل (۲)، سرعت روتور را به ازای زمان‌های مختلف رفع خطا برای ژنراتور شکل (۱) نشان می‌دهد. در خطی که با نقطه چین نشان داده شده سرعت از سرعت بحرانی یعنی ۱/۴۵۸ تجاوز کرده و با توجه به اینکه خطا برطرف شده ولی سرعت به سرعت پایداری نرسیده است.



شکل ۲: سرعت روتور به ازای زمان‌های رفع خطای مختلف

### ۳- محاسبه گشتاور الکتریکی ژنراتور القایی دوسو تغذیه

مفهوم سرعت بحرانی روتور یک ژنراتور القایی را می‌توان با استفاده از منحنی گشتاور سرعت، بهتر درک کرد. لذا در این بخش ابتدا رابطه‌ی گشتاور قبل و بعد از خطا تشریح می‌شود و در ادامه مسائل مربوط به سرعت و زمان بحرانی ارائه خواهند شد.

#### ۳-۱- محاسبه گشتاور حالت پایدار

برای محاسبه گشتاور الکتریکی از مدار معادل الکتریکی ژنراتور القایی با تغذیه دوسویه که در شکل (۳-الف) نشان داده شده، استفاده شده است.

برای ساده‌تر شدن محاسبات، از قسمتی که در شکل (۳) نشان داده شده، معادل تونن گرفته شده است. روابط (۱)-(۳) روابط مربوط به این تبدیل و شکل (۳-ب) مدار معادل بعد از تبدیل را نشان می‌دهد.

حسب سرعت روتور و زاویه گشتاور را می‌توان رسم کرد، این منحنی در شکل (۴) نشان داده شده است.

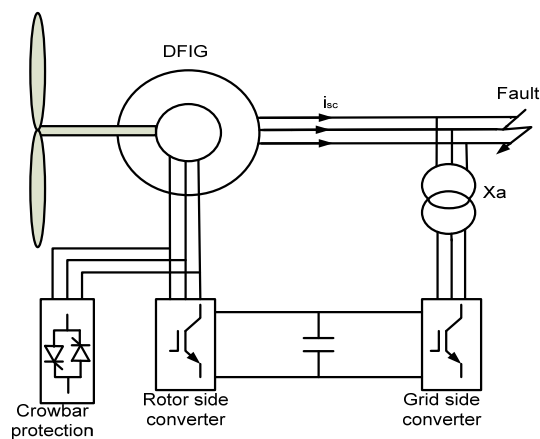
با توجه به شکل منحنی فوق هم در سرعت زیرسنکرون و هم در سرعت فوق سنکرون نقطه تعادل دارد.

### ۳-۲- محاسبه گشتاور بعد از خطا

بعد از وقوع خطا، جریان استاتور افزایش می‌یابد، با توجه به تزویج مغناطیسی بین روتور و استاتور و بدلیل عمل القا جریان روتور نیز افزایش می‌یابد. اگر جریان روتور در حالت خطا از جریان نامی مبدل تجاوز کند، به مبدل سمت روتور آسیب می‌رسد و همچنین اگر در حالت خطا ولتاژ لینک DC از محدوده قابل تحمل خارج شود به خازن لینک DC آسیب می‌رسد. برای اینکه بدون قطع از شبکه ژنراتور بدون اینکه آسیبی ببیند، متصل به شبکه باقی بماند، مقاومت‌های کروبار، مطابق شکل (۵) در سمت روتور قرار گرفته که در اینصورت مبدل سمت روتور نیز غیر فعال می‌شود.

بعد از خطا و با اتصال مقاومت‌های کروبار ولتاژ روتور به رابطه زیر تبدیل می‌شود:

$$V_r = -R_{cb} I_r \quad (9)$$



شکل ۵: نحوه اتصال مقاومت کروبار به ژنراتور القایی دوسو تغذیه

با قرار دادن رابطه (۹) در رابطه (۴)، رابطه گشتاور بصورت رابطه (۱۰) بدست می‌آید:

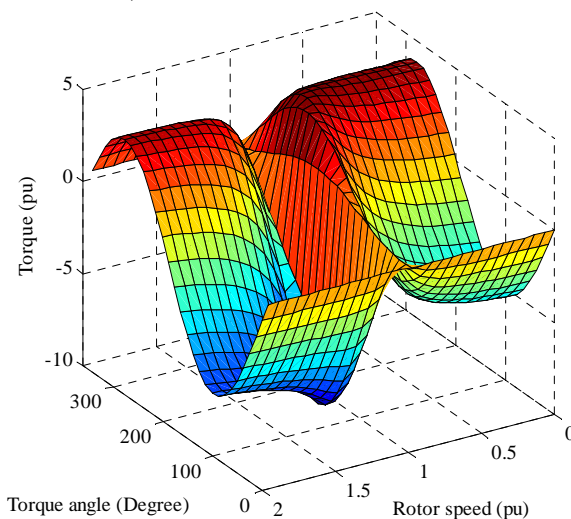
$$I_r = \frac{V_{th} \angle \alpha - \frac{V_r}{S} \angle \delta}{R_{th} + \frac{R_r}{S} + j(X_{th} + X_{lr})} \quad (6)$$

با جایگذاری رابطه (۶) در رابطه (۵) توان فاصله هوایی قابل محاسبه است. توان فاصله هوایی را در رابطه (۴) فرار داده و پس از ساده سازی رابطه گشتاور بصورت رابطه زیر بدست می‌آید [۸ و ۹]:

$$T = \frac{\frac{R_r}{S} V_{th}^2}{\omega_s |Z_s|^2} - \frac{R_{th} \left(\frac{V_r}{S}\right)^2}{\omega_s |Z_s|^2} + \frac{\frac{V_r}{S} V_{th} (R_{th} - \frac{R_r}{S})}{\omega_s |Z_s|^2} \cos(\delta - \alpha) - \frac{\frac{V_r}{S} V_{th} (X_{th} + X_{lr})}{\omega_s |Z_s|^2} \sin(\delta - \alpha) \quad (7)$$

در رابطه (۷)، اندازه  $Z_s$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

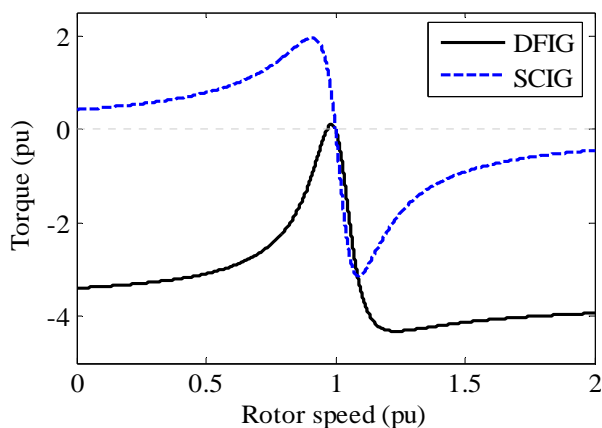
$$|Z_s| = \sqrt{\left(R_{th} + \frac{R_r}{S}\right)^2 + (X_{th} + X_{lr})^2} \quad (8)$$



شکل ۴: منحنی سه بعدی گشتاور-سرعت-زاویه گشتاور در ژنراتورهای القایی دوسو تغذیه

گشتاور الکتریکی بدست آمده برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه را می‌توان برحسب ولتاژ روتور و زاویه گشتاور تغییر داد. ولتاژ روتور در حالت پایدار بطور تقریبی  $sV_s$  است، بنابراین با قرار دادن ولتاژ روتور، منحنی سه بعدی گشتاور بر

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۷: مقایسه منحنی گشتاور-سرعت ژنراتور القایی معمولی و ژنراتور القایی دوسو تغذیه

۴- محاسبه نقاط تعادل سرعت روتور

بعد از محاسبه‌ی گشتاور الکتریکی شرایط برای به دست آوردن سرعت بحرانی فراهم شده است. محاسبه نقاط تعادل سرعت روتور شامل دو سرعت، یکی قبل از وقوع خطا و دیگری بعد از وقوع آن است که در این بخش به آنها پرداخته می‌شود.

۴-۱- محاسبه سرعت حالت پایدار

برای بدست آوردن نقاط تعادل،  $T_e = T_m$  قرار داده و معادله گشتاور (۷) را با جایگذاری  $Z_s$  که به لغزش ( $s$ ) وابسته است به یک رابطه بر حسب لغزش تبدیل شده است. پس از ساده سازی‌ها معادله درجه دومی بصورت زیر بدست آمده است [۵].

$$as^2 + bs + c = 0 \quad (11)$$

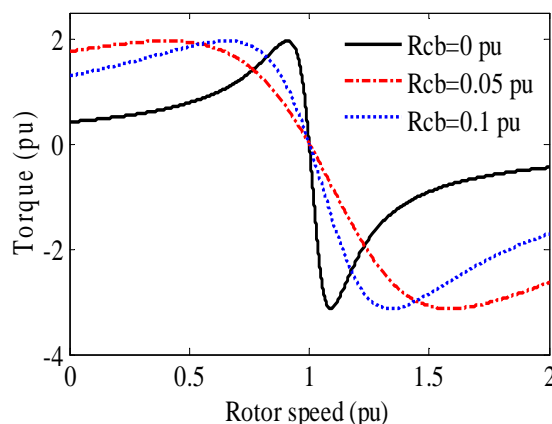
در رابطه‌ی (۱۱) ثابت‌های  $a$ ،  $b$  و  $c$  به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} a_{DFIG} &= T_m \omega_s (R_{th}^2 + (X_{th} + X_{lr})^2) \\ b_{DFIG} &= 2T_m \omega_s R_{th} R_r - R_{th} V_{th}^2 - V_r V_{th} \\ &((X_{th} + X_{lr}) \sin(\delta - \alpha) + R_{th} \cos(\delta - \alpha)) \end{aligned} \quad (12)$$

$$c_{DFIG} = T_m \omega_s R_r^2 + R_{th} V_r^2 + V_r R_r \cos(\delta - \alpha)$$

دو جواب از حل معادله درجه ۲ فوق برای لغزش حاصل می‌شود که از روی آن دو سرعت برای روتور قابل محاسبه است. سرعت کمتر  $\omega_{1DFIG}$  در منحنی رسم شده در شکل

$$T = \frac{\frac{R_r + R_{cb}}{\omega_s S} V_{th}^2}{(R_{th} + \frac{R_r + R_{cb}}{S})^2 + (X_{th} + X_{lr})^2} \quad (10)$$



شکل ۶: منحنی گشتاور - سرعت ژنراتور به ازای مقاومت‌های کربار مختلف

با توجه به شکل (۶) به ازای افزایش مقاومت کربار سرعت بحرانی ژنراتور نیز افزایش خواهد یافت.

۳-۳- مقایسه گشتاور ژنراتور القایی دوسو تغذیه و ژنراتور القایی

شکل (۷) منحنی گشتاور سرعت ژنراتور القایی دوسو تغذیه را با زاویه گشتاور ثابت ۴۵ درجه و ژنراتور القایی قفس سنجایی با پارامترهای مشابه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح است که ژنراتور القایی دوسو تغذیه در سرعت زیر سنکرون نیز می‌تواند نقطه پایداری داشته باشد در صورتیکه ژنراتور القایی قفس سنجایی فقط در سرعت فوق سنکرون نقطه پایدار می‌تواند داشته باشد.

بعد از خطا مقاومت کربار ژنراتور القایی با تغذیه دوسویه را به ژنراتور القایی معمولی تبدیل می‌کند. بنابراین برای محاسبه سرعت حالت پایدار از رابطه گشتاور ژنراتور القایی دوسو تغذیه و برای محاسبه سرعت بحرانی از رابطه گشتاور ژنراتور القایی معمولی با مقاومت‌های کربار استفاده شده است.

### ۵- محاسبه زمان بحرانی رفع خطا

چنانچه در بخش دوم مقاله بیان شد اگر سرعت روتور از سرعت بحرانی رفع خطا که در بخش قبل محاسبه شد عبور کند ژنراتور به نقطه تعادل سرعت نرسیده و ناپایدار می‌شود. با محاسبه سرعت حالت پایدار از رابطه (۱۳) و سرعت بحرانی از رابطه (۱۵) با استفاده از معادله سرعت زمان بحرانی رفع خطا قابل محاسبه است. رابطه (۱۶) روابط محاسبه زمان بحرانی رفع خطا را نشان می‌دهد:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H}(T_e - T_m) \quad (16)$$

در طول اتصال کوتاه گشتاور الکتریکی صفر می‌شود بنابراین این در رابطه فوق  $T_e = 0$  قرار می‌گیرد.

$$d\omega_r = \frac{1}{2H}(-T_m)dt \Rightarrow dt = \frac{2H}{-T_m}d\omega_r \quad (17)$$

با انتگرال گیری از بازه‌ی سرعت پایدار و سرعت بحرانی محاسبه شده زمان بحرانی رفع خطا محاسبه می‌شود.

$$T_{critical} = \frac{2H}{-T_m} \int_{\omega_{DFIG}}^{\omega_{1IG}} d\omega_r \quad (18)$$

$$= \frac{2H}{-T_m} (\omega_{1IG} - \omega_{DFIG})$$

### ۶- شبیه سازی

با توجه به رابطه (۱۸) زمان رفع خطای بحرانی به اینرسی توربین وابسته بوده و به ازای اینرسی بیشتر زمان بحرانی نیز افزایش می‌یابد. در جدول (۱) تغییر زمان بحرانی رفع خطا را بدون در نظر گرفتن اینرسی توربین و با در نظر گرفتن اینرسی توربین مقایسه شده است.

جدول ۱: اثر اینرسی توربین بر زمان بحرانی رفع خطا

	s۷.۲H=	s۱.۲H=
زمان بحرانی رفع خطا(میلی ثانیه)	۶۸۲.۸	۱۱۳.۸

در محاسبه زمان فوق فرض شده زاویه گشتاور  $\frac{\pi}{4}$  بوده بنابراین نقطه پایدار حالت دائم سرعت  $1.033 \text{ pu}$  بدست آمده است. در این شبیه‌سازی مقاومت کربار صفر در نظر گرفته شده است.

(۷)، سرعت حالت پایدار زیر سنکرون و سرعت بیشتر  $\omega_{2DFIG}$  سرعت حالت پایدار فوق سنکرون در نظر گرفته می‌شود. روابط زیر این دو سرعت را نشان می‌دهد.

$$\omega_{1DFIG} = 1 - \frac{b_{DFIG} + \sqrt{\Delta}}{2a_{DFIG}} \quad (13)$$

$$\omega_{2DFIG} = 1 - \frac{b_{DFIG} - \sqrt{\Delta}}{2a_{DFIG}}$$

به ازای تغییر زاویه گشتاور، منحنی گشتاور - سرعت مطابق شکل (۴)، تغییر خواهد کرد و بر اساس شرایط عملکرد سرعت حالت پایدار تعیین خواهد شد.

### ۴-۲- محاسبه سرعت بعد از خطا

برای بدست آوردن نقاط تعادل، با جایگذاری رابطه گشتاور بعد از خطا،  $T_e = T_m$  قرار داده و رابطه بر حسب لغزش ( $s$ ) بصورت رابطه (۱۱) ساده می‌شود. ضرایب در این حالت بصورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$a_{IG} = T_m \omega_s (R_{th}^2 + (X_{th} + X_{lr})^2)$$

$$b_{IG} = 2T_m \omega_s R_{th} (R_r + R_{cb}) - R_{th} V_{th}^2 \quad (14)$$

$$c_{IG} = T_m \omega_s (R_r + R_{cb})^2$$

دو جواب از حل معادله درجه ۲ فوق برای لغزش حاصل می‌شود که از روی آن دو سرعت قابل محاسبه است. سرعت کمتر  $\omega_{1IG}$ ، سرعت حالت پایدار در حالت القایی معمولی است که نقشی در محاسبات ندارد و سرعت بیشتر  $\omega_{2IG}$  سرعت بحرانی است. رابطه (۱۵) دو سرعت محاسبه شده در این حالت را نشان می‌دهد.

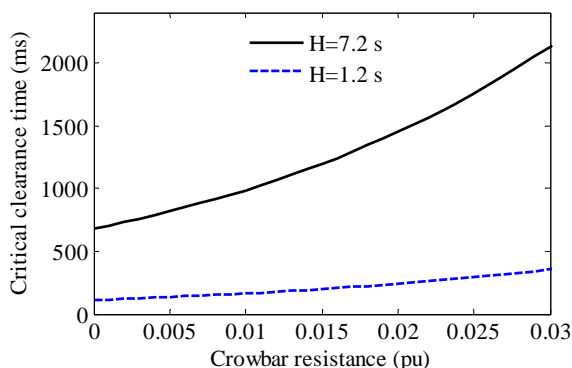
$$\omega_{1IG} = 1 - \frac{b_{IG} + \sqrt{\Delta}}{2a_{IG}} \quad (15)$$

$$\omega_{2IG} = 1 - \frac{b_{IG} - \sqrt{\Delta}}{2a_{IG}}$$

با توجه به شکل (۶) با تغییر مقاومت کربار در طول خطا، منحنی گشتاور نیز تغییر می‌کند و در نتیجه سرعت بحرانی رفع خطا نیز تغییر می‌کند. در شکل واضح است با افزایش مقاومت کربار و به ازای گشتاور مکانیکی ثابت، سرعت بحرانی نیز افزایش می‌یابد.

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

شکل (۹) اثر تغییر مقاومت کربار بر زمان رفع خطای بحرانی را نشان می‌دهد. شکل (۱۰) اثر ثابت اینرسی که در مورد آن بحث شد را نیز بر زمان بحرانی رفع خطا نشان داده است.



شکل ۱۰: اثر تغییر مقاومت کربار بر زمان رفع خطای بحرانی

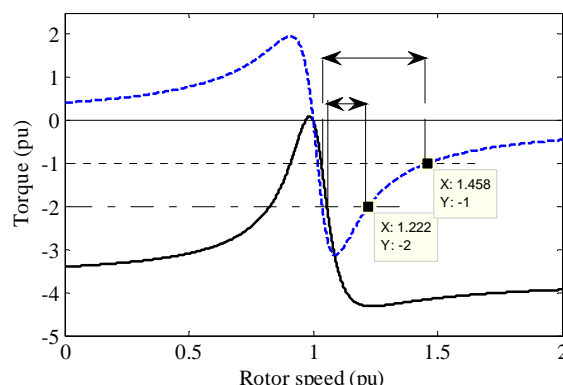
با توجه به شکل، با افزایش مقاومت کربار، زمان بحرانی رفع خطا نیز مانند سرعت بحرانی افزایش می‌یابد. در این شکل تأثیر قابل ملاحظه اینرسی توربین در افزایش زمان رفع خطای بحرانی نیز مشخص است.

تاکنون شبیه سازی برای حالتی از عملکرد ژنراتور القایی دو سو تغذیه با زاویه گشتاور ۴۵ درجه و ولتاژ روتور  $0.7 \text{ pu}$  انجام شد. در این قسمت به ازای مقاومت کربار  $0.01 \text{ pu}$  و در نظر گرفتن اثر اینرسی توربین، اثر زاویه گشتاور و ولتاژ روتور بر زمان بحرانی رفع خطا بررسی شده است.

تغییر در عملکرد ژنراتور القایی دوسو تغذیه تأثیری بر عملکرد بعد از خطای ژنراتور و سرعت بحرانی ندارد ولی بر سرعت حالت پایدار و زمان رفع خطای بحرانی اثر می‌گذارد.

شکل (۱۱) منحنی گشتاور ژنراتور القایی دوسو تغذیه را به ازای زاویه گشتاورهای ۴۵، ۹۰ و ۱۳۵ درجه نشان می‌دهد. منحنی گشتاور برای زوایای منفی، نقاط تعادل در حالت ژنراتوری نداشته و گشتاور در ناحیه مثبت و موتوری قرار دارد.

در حالت فوق سنکرون به ازای تغییر زاویه گشتاور نقطه تعادل آن با گشتاور یک پریونیتی تغییر زیادی ندارد ولی در حالت زیر سنکرون اثر تغییر زاویه بر نقطه تعادل محسوس‌تر



شکل ۸: تغییر سرعت بحرانی به ازای تغییر گشتاور مکانیکی

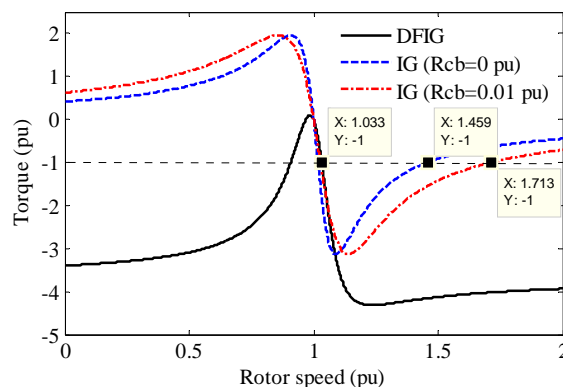
شکل (۸)، تغییر سرعت بحرانی با افزایش گشتاور مکانیکی از  $1 \text{ pu}$  به  $2 \text{ pu}$  را نشان می‌دهد. با توجه به شکل، سرعت بحرانی با افزایش گشتاور مکانیکی، از  $1.458 \text{ pu}$  به  $1.222 \text{ pu}$  کاهش یافته است.

با توجه به رابطه (۱۸)، زمان بحرانی رفع خطا با افزایش گشتاور مکانیکی کاهش می‌یابد. این موضوع از کاهش رنج تغییرات سرعت بعد از خطا در شکل (۸) با افزایش گشتاور مکانیکی نیز قابل درک است. زمان رفع خطای بحرانی با تغییر گشتاور مکانیکی از  $1 \text{ pu}$  به  $2 \text{ pu}$  در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲: اثر گشتاور مکانیکی بر زمان بحرانی رفع خطا

	$T_m = -1 \text{ pu}$	$T_m = -2 \text{ pu}$
زمان بحرانی رفع خطا (میلی ثانیه)	۶۸۲.۸	۵۰۴.۸

شکل (۹) اثر تغییر مقاومت کربار بر سرعت بحرانی را نشان می‌دهد. در این حالت سرعت پایدار تغییری نمی‌کند ولی گشتاور بعد از خطا با تغییر مقاومت روتور تغییر کرده و سرعت بحرانی نیز تغییر می‌کند. با توجه به شکل با افزایش مقاومت روتور سرعت بحرانی نیز افزایش یافته است.



شکل ۹: تغییر سرعت بحرانی به ازای تغییر مقاومت کربار

بیست و چهارمین کنفرانس بین‌المللی برق

با توجه به نتایج بدست آمده اینرسی توربین سبب می‌شود تا زمان رفع خطای بحرانی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یابد. افزایش گشتاور مکانیکی، سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی را کاهش می‌دهد. افزایش مقاومت کربار نیز سبب افزایش سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی می‌شود.

۸- پیوست

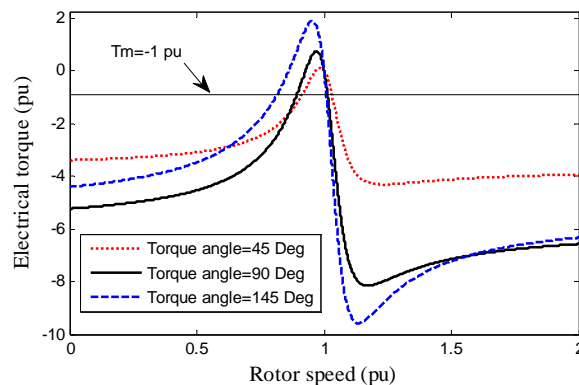
مشخصات ژنراتور القایی ۲ MW به کار رفته در شبیه‌سازی در جدول زیر آمده است.

اطلاعات ژنراتور	
$J_G$	۰.۶ s
$r_s$	pu ۰.۰۴۸
$r_r$	pu ۰.۰۱۸
$X_s$	pu ۰.۰۷۵
$X_r$	pu ۰.۱۲
$X_m$	pu ۳.۸
$f$	Hz ۵۰

۹- مراجع

- [1] Anca D. Hansen, Gabriele Michalke, "Fault ride through capability of DFIG wind turbines" Renewable Energy 32(2007), 1594-1610.
- [2] B.Singh, S.N. Singh, "Wind Power Interconnection into the Power System: A Review of Grid Code Requirements", The Electricity Journal, Vol. 22, Issue 5, June 2009.
- [3] A.Dittrich, A.Stoev,"Comparison of Fault Ride-Through Strategies for Wind Turbines with DFIM Generators", LOB 2005 – Pnosdrn.
- [4] A.H.Kasem, E.F.El-Saadany, H.H.El-Tamaly M.A.A. Wahab,"An improved fault ride-through strategy for doubly fed induction generator-based wind turbines", IET Renew. Power Gener, 2008, Vol. 2, No. 4, pp. 201–214.
- [5] A.P.Grilo, A.A.Mota, T.M.Mota, W.Freitas,"An Analytical Method for Analysis of Large-Disturbance Stability of Induction Generators", IEEE trans on Power systems, Vol. 22, No. 4, Nov 2007.
- [6] H. Li, Z. Chen, L.Han,"Comparison and Evaluation of Induction Generator Models in Wind Turbine Systems for Transient Stability of Power System", 2006 International Conference on Power System Technology.

است. زمان رفع خطای بحرانی برای نقاط تعادل زیر سنکرون در مقابل نقاط تعادل فوق سنکرون



شکل ۱۱: منحنی گشتاور ژنراتور بر حسب سرعت به ازای زوایای گشتاور مختلف

بیشتر است بنابراین بررسی‌ها را همواره در سرعت فوق سنکرون انجام می‌دهیم. در جدول (۳) زمان رفع خطای بحرانی به ازای تغییر در زاویه گشتاور آمده است.

جدول ۳: اثر تغییر زاویه گشتاور بر زمان بحرانی رفع خطا

	$\delta = 45^\circ$	$\delta = 90^\circ$	$\delta = 135^\circ$
زمان رفع خطای بحرانی	۱.۰۸۶.۱	۱.۰۲۳	۱.۰۱۵

۷- نتیجه گیری

برای عملکرد در طول خطای بزرگ ژنراتور القایی دوسو تغذیه علاوه بر محافظت از مبدل و لینک dc قرار گرفته در سمت روتور، بحث پایداری ژنراتور، سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی نیز مطرح است. در این مقاله رابطه‌ای ساده برای محاسبه سرعت پایدار و سرعت بحرانی با استفاده از منحنی گشتاور الکتریکی و گشتاور مکانیکی بیان شده است. همچنین با استفاده از رابطه سرعت، زمان رفع خطای بحرانی نیز محاسبه شده است و اثر تغییر گشتاور مکانیکی، اینرسی توربین، تغییر مقاومت کربار و تغییر زاویه گشتاور بر سرعت بحرانی و زمان رفع خطای بحرانی بررسی شده است.

- [7] B. Badrzadeh, S. K. Salman, "Critical Clearing Time of Doubly Fed Induction Generator", IEEE conference, 2005.
  - [8] L. Jiao, B. Ooi, G. Jo, F. Zhou, "Doubly-fed induction generator (DFIG) as a hybrid of asynchronous and synchronous machines", Electric Power Systems Research 76 (2005) 33–37.
  - [9] J. Smajo, D. Vukadinovic, "Electromagnetic Torque Analysis of a DFIG for Wind Turbine", WSEAS trans on systems, Issue 5, Volume 7, May 2008
-