

## طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه به روش کلاسیک و الگوریتم ژنتیک

غلامرضا صیاد  
 کارشناس ارشد دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان  
 امین خدابخشیان  
 دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان  
 رحمت الله هوشمند  
 دانشیار دانشکده مهندسی، دانشگاه اصفهان

### چکیده:

با افزایش روزافزون تولید برق از انرژی باد، لزوم بررسی و بهبود رفتار دینامیکی توربین‌های بادی به هنگام وقوع اغتشاشات گوناگون در سیستم‌های قدرت اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در این مقاله، جهت بهبود پایداری سیستم قدرت، شیوه جدید سیستماتیکی در طراحی پایدارساز سیستم قدرت (PSS) با استفاده از روش کلاسیک پیش فاز و الگوریتم ژنتیک برای یک توربین بادی مجهز به ژنراتورهای القایی دو تغذیه (یا دوسویه) (DFIG) ارائه می‌شود. به منظور تحلیل عمل‌کرد توربین بادی و بررسی کارایی پایدارساز پیشنهادی، شبکه‌ای حاوی یک توربین بادی معادل مجهز به DFIG برای یک مزرعه بادی به عنوان مولد پراکنده و یک ژنراتور سنکرون معادل مدنظر قرار می‌گیرد. بررسی مقادیر ویژه و رفتار پارامترهای DFIG در شبکه مورد مطالعه نشان می‌دهد که پایدارساز پیشنهادی، توانایی افزایش پایداری دینامیکی DFIG را در میرایی نوسانات توسط سیستم قدرت هنگام وقوع اغتشاشات کوچک و بزرگ خواهد داشت.

کلمات کلیدی: الگوریتم ژنتیک، پایدارساز سیستم قدرت (PSS)، پایداری دینامیکی، ژنراتور القایی دو تغذیه (DFIG).

## A New Systematic Design of Power System Stabilizer Using Classical and Genetic Algorithm Techniques for Wind Power Systems

R. Sayyad  
 A. Khodabakhshian  
 R. Hooshmand  
 Department of Electrical Engineering, University of Isfahan  
 Department of Electrical Engineering, University of Isfahan  
 Department of Electrical Engineering, University of Isfahan

### Abstract

Wind power industry equipped with Double Feed Induction Generators (DFIG) is developing rapidly and more wind farms are being connected to power systems. Integration of large scale wind farms into power systems presents some challenges such as dynamic stability must be addressed and analyzed. This paper presents a systematic approach to design a classical lead-lag power system stabilizer (PSS) for improving the stability of the system following a small disturbance. The parameters of the PSS are also designed using Genetic Algorithm (GA). Simulation results of a typical multi-machine power system that includes a wind farm show that the dynamic stability of the system will be improved considerably when the PSS is installed in wind farm.

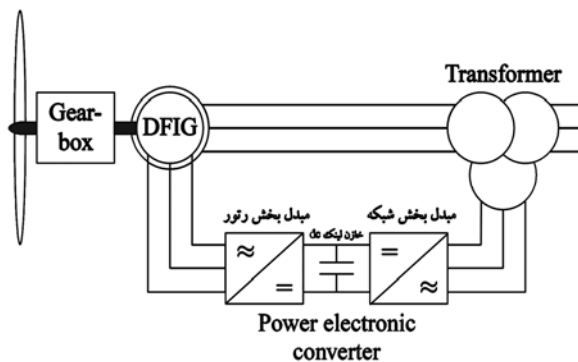
**Keywords:** Double feed induction generator (DFIG), Genetic algorithm, Power system dynamics, Power system stabilizer (PSS).

## ۱- مقدمه

سیستم می‌تواند با کمک PSS طراحی شده با الگوریتم ژنتیک به شکل مطلوبی افزایش یابد.

## ۲- ژنراتور القایی دو تغذیه (DFIG)

علت نامیدن این نوع ژنراتور به ژنراتور القایی دو تغذیه، انتقال الکتریکی برق تولیدی به شبکه از دو راه استاتور و رتور می‌باشد. شکل (۱) یک توربین بادی سرعت متغیر مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه را نشان می‌دهد. در این شکل، مدار رتور ماشین به دو مبدل و یک خازن لینک DC مجهز می‌باشد. مبدلی که مستقیماً به سیم‌پیچ‌های رتور متصل است، مبدل بخش رتور و مبدلی که مستقیماً به شبکه متصل است، مبدل بخش استاتور است. مبدل بخش شبکه نامیده می‌شود. در بخش بعدی اجزای این ژنراتور توضیح داده خواهد شد.



شکل ۱- توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه (DFIG)

## ۳- مبدل‌های بخش شبکه و بخش رتور

شکل (۲) مدل کلی یک توربین بادی مجهز به DFIG (شامل دو مبدل بخش شبکه و بخش رتور و یک لینک DC بین آن‌ها) همراه با کنترل‌کننده‌های مبدل‌های آن را نشان می‌دهد. به علت عملکرد مطلوب روش کنترل برداری نسبت به روش کنترل اسکالر، نوع کنترل‌کننده مبدل‌ها در این مقاله از نوع برداری می‌باشد [۱۱]. در قسمت ۳-۱ به بررسی مبدل بخش شبکه و در قسمت ۳-۲ به بررسی مبدل بخش رتور می‌پردازیم.

با رشد روز افزون نصب نیروگاه‌های بادی به نظر می‌رسد این نیروگاه‌ها با توجه به افزایش ظرفیت آنها در شبکه سراسری برق تاثیر به سزایی خواهند داشت [۱]. توربین‌های بادی می‌توانند در سرعت‌های ثابت و متغیر باد، برق تولید کنند. توربین‌های سرعت متغیر در مقایسه با توربین‌های سرعت ثابت بازدهی بسیار بالاتری دارند و در انواع پیشرفته‌تر می‌توان جهت آنها را با جهت وزش باد تنظیم نمود، اما ساختمان پیچیده‌تر و گران‌تری خواهند داشت [۲]. معمولاً در نیروگاه‌های بادی سرعت متغیر، از ژنراتور القایی دو تغذیه (DFIG) استفاده می‌کنند [۳]. از مزایای مهم ژنراتور القایی دو تغذیه که آن را از سایر ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی متمایز می‌کند می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: مبدل ارزان‌تر و دارای تلفات کم‌تر، تولید انرژی بیشتر از دو راه استاتور و رتور و بازده بالاتر. مطالعات و محاسبات مربوط به بازده سیستم DFIG در مقالات مختلفی ارائه شده است [۴ و ۵]. بر اساس مرجع [۵]، انرژی به دست آمده از باد می‌تواند در توربین بادی مجهز به DFIG تا ۲۰٪ نسبت به سایر سیستم‌های توربین بادی سرعت متغیر و ۶۰٪ نسبت به سیستم توربین بادی سرعت ثابت افزایش داشته باشد.

با استفاده روزافزون از نیروگاه‌های بادی مجهز به ژنراتور DFIG، بررسی تاثیر آنها در پایداری سیستم‌های قدرت از اهمیت خاصی برخوردار است. بدین منظور روش‌های کنترل برداری مختلفی برای کنترل DFIG پیشنهاد شده است [۶ و ۷]. یکی از این روش‌های مورد استفاده معمول، کنترل مدار رتور در امتداد شار استاتور می‌باشد [۷]. در مرجع [۸] نیز پایداری سیستم DFIG با نشان دادن مدل دینامیکی DFIG بررسی شده و پایداری سیگنال کوچک در دو حالت one-mass و two-mass مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در مراجع [۹ و ۱۰] بدون ارایه روش طراحی، PSS با وجود کنترل‌کننده از نوع FMAC<sup>۳</sup> ارائه شده است.

در این مقاله ضمن ارایه یک روش سیستماتیک کلاسیک، از الگوریتم ژنتیک نیز برای طراحی پارامترهای PSS برای یک توربین بادی مجهز به ژنراتورهای DFIG استفاده شده و نتایج با هم مقایسه خواهند شد.

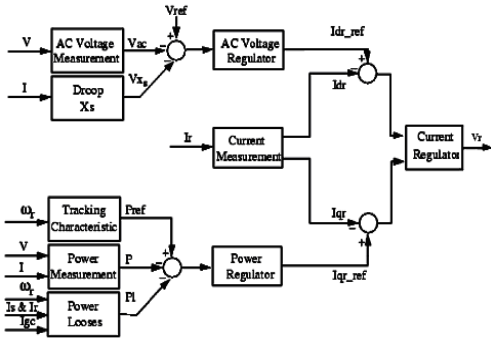
در این روش، مدل‌سازی براساس کنترل‌کننده برداری صورت گرفته است. نتایج شبیه‌سازی بیانگر آن است که میرایی کل

(۲) حلقه تنظیم بالایی و پایینی که به ترتیب شامل تنظیم کننده ولتاژ DC و مولفه q جریان مرجع ( $I_{q\_ref}$ ) می باشد. خروجی تنظیم کننده ولتاژ DC، جریان مرجع  $I_{d\_ref}$  می باشد که بعد از عبور از تنظیم کننده جریان<sup>۵</sup> به همراه خروجی حلقه پایینی به مولفه های d و q ولتاژ بخش شبکه تبدیل می شوند.

### ۳-۲- مبدل بخش رتور

وظیفه اصلی مبدل بخش رتور، کنترل توان خروجی و ولتاژ پایانه DFIG است. شکل (۴) طرح کلی حلقه کنترل مبدل بخش رتور را نشان می دهد [۱۲].

همان طور که مشاهده می شود این حلقه به ترتیب شامل دو حلقه بالایی برای کنترل ولتاژ و حلقه پایینی برای کنترل توان ماشین می باشد. از تنظیم مولفه d و q جریان رتور به ترتیب برای کنترل حلقه ولتاژ و حلقه توان استفاده می شود. مولفه q جریان مرجع رتور برای تولید  $V_{qr}$  و مولفه d جریان مرجع رتور برای تولید  $V_{dr}$  به کار می روند.

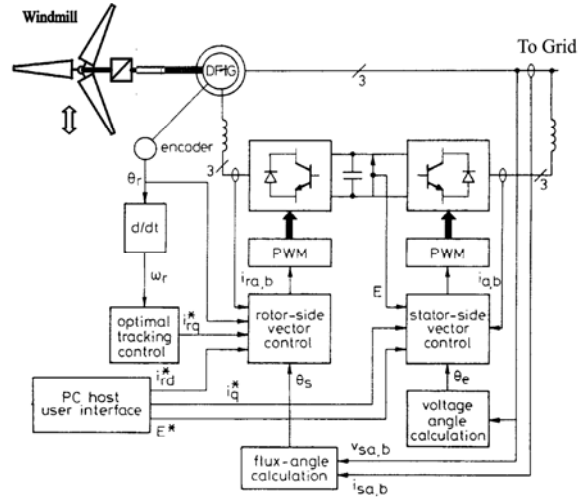


شکل ۴- بلوک دیاگرام مبدل بخش رتور [۱۲]

### ۴- بررسی افزایش پایداری دینامیکی DFIG توسط کاهش تغییرات سرعت رتور

#### ۴-۱- اصول کلی پایداری در DFIG

توزیع بهینه برق بدون کنترل و برنامه ریزی صحیح نیروگاه های تولید بی فایده می باشد. یک مولد برق که محور آن چرخانده می شود را می توان به صورت جرم بزرگی که دو گشتاور مختلف علامه بر چرخش آن اثر می کنند در نظر گرفت. شکل (۵) رفتار گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی را در یک واحد مولد برق نشان می دهد.

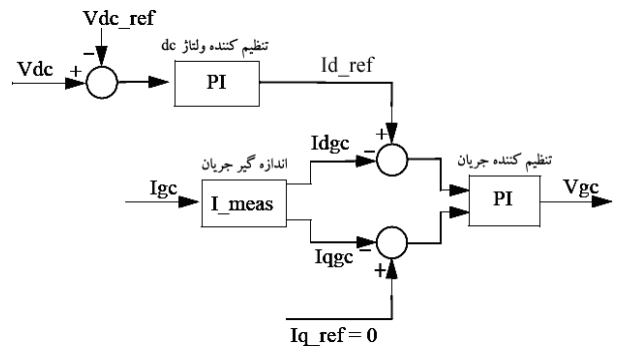


شکل ۲- مدل یک DFIG با کنترل کننده های آن [۱۱]

### ۳-۱- مبدل بخش شبکه

مهم ترین وظیفه مبدل بخش شبکه، کنترل ولتاژ لینک DC و توان راکتیو بخش شبکه است. اندازه ثابت ولتاژ لینک DC می تواند ولتاژ خروجی مبدل را به آن اندازه ای که مورد نظر است تبدیل کند. بنابراین، حفظ اندازه ولتاژ مناسب و کم ریپل می تواند خروجی مبدل را هموارتر و کم هارمونیک تر نماید. شکل (۳)، کنترل کننده مبدل بخش شبکه را نشان می دهد [۱۲].

کنترل کننده مبدل بخش شبکه شامل دو حلقه، الف) حلقه پایینی برای کنترل توان راکتیو شبکه و ب) حلقه بالایی برای کنترل ولتاژ DC (توان اکتیو بخش شبکه) می باشد. اجزای کنترل کننده شکل (۳) دو کار زیر را انجام می دهند: (۱) یک سیستم اندازه گیری که مولفه های d و q جریان های بخش شبکه را اندازه می گیرد ( $I_{dgc}$  و  $I_{qgc}$ ).



شکل ۳- دیاگرام بلوکی کنترل کننده بخش شبکه [۱۲]

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{M} (P_m \cdot \frac{\omega_s}{\omega} - \frac{V \cdot E'}{X'} \cdot \sin(\delta - \theta)) \quad (2)$$

که  $\omega_s$  سرعت سنکرون،  $\omega$  سرعت رتور و  $M$  (نشان دهنده اینرسی ماشین) برابر با  $\frac{2H}{\omega_s}$  می‌باشد. با توجه به رابطه (۲)، می‌توان با تغییر زاویه  $\delta$  (زاویه ولتاژ داخلی استاتور)، تغییرات سرعت را به منظور افزایش پایداری دینامیکی به حداقل رساند.

#### ۴-۲- چگونگی استفاده از بردار شار رتور در افزایش پایداری

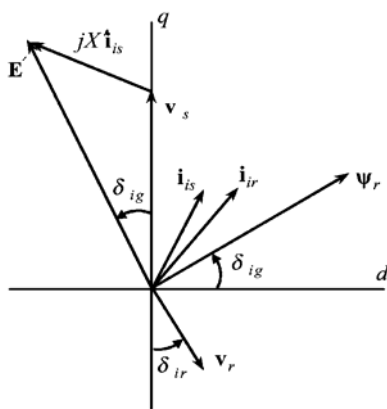
##### دینامیکی

شکل (۷) دیاگرام برداری عملکرد DFIG را با فازور جریان‌های رتور و استاتور، ولتاژ استاتور و رتور نشان می‌دهد. در ژنراتورهای DFIG، شار رتور به جریان‌های رتور و استاتور بستگی دارد، اما می‌توان رابطه بردار شار رتور با بردار  $\vec{V}_r$  را به صورت رابطه (۳) نوشت [۹]:

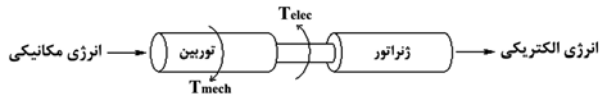
$$\vec{\Psi}_r = -j \frac{L_{rr}}{s\omega_s L_m} \vec{V}_r \quad (3)$$

که  $L_{rr}$  اندوکتانس پراکنده رتور و  $L_m$  اندوکتانس مغناطیسی DFIG می‌باشد. از طرفی، در حالت ماندگار بین متغیر  $\vec{E}'$  و بردار ولتاژ رتور ( $\vec{V}_r$ ) رابطه (۴) برقرار می‌باشد [۱۰]:

$$\vec{V}_r \approx s\vec{E}' \quad (4)$$



شکل ۷- دیاگرام برداری حالت کاری DFIG [۱۰]



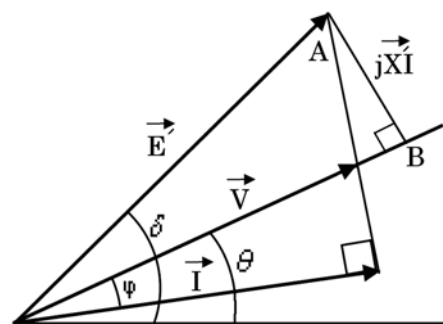
شکل ۵- بیان گشتاورهای الکتریکی و مکانیکی در یک ژنراتور

با توجه به شکل (۵)، ارتباط بین گشتاورهای مکانیکی و الکتریکی و تغییرات سرعت به صورت زیر بیان می‌شود [۱۳]:

$$T_{mech} - T_{elec} = 2H \cdot \frac{d}{dt} \left( \frac{\omega}{\omega_s} \right) \quad (1)$$

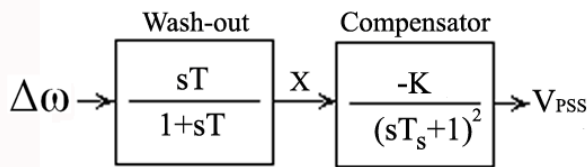
که  $\omega_s$  سرعت سنکرون استاتور (سرعت مبنا) و  $H$  اینرسی کل می‌باشد. با توجه به رابطه فوق، اگر بتوان جمله سمت راست رابطه (۱) (تغییرات سرعت رتور) را صفر نمود، مقدار  $T_{elec}$  با  $T_{mech}$  برابر می‌گردد. این تساوی به معنی رسیدن مجدد به نقطه تعادل و برقراری پایداری دینامیکی خواهد بود. بنابراین می‌توان قید مورد نظر را برای افزایش پایداری دینامیکی به حداقل رساندن مقدار  $\frac{d}{dt}(\omega)$  تلقی نمود. در ادامه، نحوه کنترل تغییرات سرعت در یک DFIG بیان می‌گردد.

شکل (۶) نمودار فازوری ساده شده ژنراتور القایی دو تغذیه متصل به شین بی‌نهایت را نشان می‌دهد که در آن از مقاومت استاتور صرف نظر شده است. در این شکل،  $\vec{E}'$  نشان دهنده ولتاژ داخلی پشت سر اکتانس گذرا ( $\vec{E}' = E' \cdot e^{j\delta}$ )،  $\vec{V}$  ولتاژ استاتور ( $\vec{V} = V \cdot e^{j\theta}$ )،  $I$  جریان استاتور و  $\phi$  زاویه بین بردار ولتاژ و بردار جریان استاتور DFIG می‌باشد. با توجه به شکل (۶)، رابطه (۱) را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود [۱۳]:



شکل ۶- دیاگرام فازوری یک DFIG با ولتاژ استاتور  $\vec{V}$

حلقه PSS در شکل (۹)، شامل اجزاء مختلفی (تابع جبران گر، تابع wash-out و محدودگر) برای تولید سیگنال مکمل می‌باشد.



شکل ۹- جبران گر PSS به همراه پارامترهای موجود در آن

مهم‌ترین جزء حلقه PSS، انتخاب جبران کننده می‌باشد. معمولی‌ترین جبران کننده مورد استفاده در بحث پایداری دینامیکی، جبران کننده پیش فاز می‌باشد. جبران گر پیش فاز باید زاویه ورودی PSS را به اندازه‌ای  $X^\circ$  انتقال دهد که حاصل جمع آن با بردار ولتاژ رتور، زاویه بردار ولتاژ رتور را  $\alpha$  درجه به جلو انتقال دهد. با انتخاب تابع  $G(s) = -\frac{K}{(1+sT_s)^2}$  به عنوان تابع جبران گر پیش فاز، می‌توان زاویه این تابع را از رابطه (۵) به دست آورد:

$$\angle G(s) = 180 - 2 \tan^{-1}(\omega T_s) = x^\circ \quad (5)$$

که  $\omega$  مقدار فرکانس اغتشاشات می‌باشد. اندازه تابع  $G(s)$  نیز با داشتن پارامترهای  $T_s$  و  $\omega$  از رابطه (۶) به دست خواهد آمد:

$$|G(s)| = \frac{K}{1 + (\omega T_s)^2} \quad (6)$$

اندازه  $G(s)$  در رابطه (۶) باید طوری باشد که جمع بردار تولید شده توسط PSS ( $V_{PSS}$ ) با بردار ولتاژ رتور ( $V_r$ ) برداری شود که اندازه آن همان اندازه بردار ولتاژ رتور شود (چون هدف، تغییر زاویه ولتاژ رتور است نه اندازه آن). طبق این هدف،  $K$  طوری تعیین می‌شود که اندازه بردار جدید ولتاژ رتور ( $V_{r_{new}}$ ) همان اندازه بردار  $V_r$  باقی بماند.

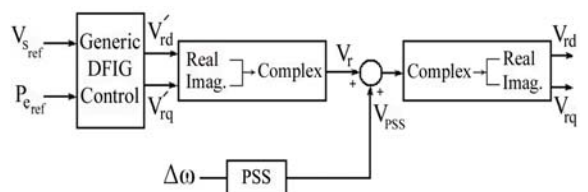
ملاحظه می‌شود که بردار ولتاژ رتور، رابطه مستقیمی با بردار ولتاژ داخلی استاتور دارد. این نتیجه از شکل (۷) نیز قابل مشاهده می‌باشد. از آنجایی که اندازه ولتاژ داخلی  $|E'|$ ، تغییرات بسیار کمی دارد، لذا اندازه ولتاژ رتور تقریباً متناسب با مقدار لغزش می‌باشد. طبق رابطه (۴) همیشه بردارهای این دو پارامتر (چه در حالت موتوری و چه در حالت ژنراتوری) در یک راستا قرار می‌گیرند به طوری که تغییر زاویه ولتاژ رتور باعث تغییر زاویه بردار ولتاژ داخلی استاتور می‌گردد. با توجه به این که در رابطه (۲) افزایش زاویه بردار  $\bar{E}'$  سبب افزایش پایداری دینامیکی می‌گردد، طبق رابطه (۴) این تغییر می‌تواند توسط تغییر زاویه بردار ولتاژ رتور که رابطه مستقیمی با  $\bar{E}'$  دارد انجام شود.

حال می‌توان بردار  $\bar{V}_r$  را با بردار دیگری جمع نماییم تا حاصل، برداری جدید با اندازه قبلی ولی زاویه مورد نظر ما باشد. چگونگی ایجاد این تغییرات برای میرا کردن اغتشاشات با تعریف پایدارساز سیستم قدرت در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

#### ۵- طراحی پایدارساز سیستم قدرت برای DFIG

##### ۵-۱- مکانیزم تولید سیگنال پایدارساز سیستم قدرت

حلقه کمکی پایدارساز سیستم قدرت، مکانیزمی برای تولید سیگنال مورد نیاز دارد. شکل (۸) نشان دهنده یک بلوک کنترل کننده نوعی DFIG مجهز به حلقه کمکی PSS می‌باشد. حاصل جمع این دو بردار، همان اندازه بردار ولتاژ را با شیفیت زاویه مناسب نتیجه می‌دهد. کنترل کننده DFIG با ورودی  $V_{s_{ref}}$  و  $P_{e_{ref}}$  می‌تواند از هر نوع متعارف مرتبه‌های مختلف تا نوع کامل و حتی از نوع کنترل برداری باشد. این کنترل کننده در شکل (۸) با بلوک Generic DFIG Control نشان داده شده است.



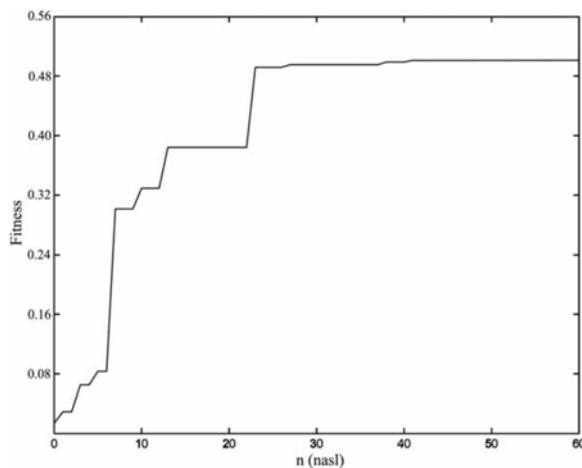
شکل ۸- بلوک دیاگرام کنترل کننده DFIG با حلقه کمکی PSS

[۱۴]

##### ۵-۲- طراحی پارامترهای PSS به روش کلاسیک

**مرحله هفتم (معیار همگرایی):** در صورتی که یک کروموزوم با بهترین مقدار در تابع هدف مورد نظر، به تعداد ۲۰ بار تکرار گردد، می‌توان نتیجه گرفت که آن کروموزوم به عنوان بهترین کروموزوم خواهد بود. با انتخاب بهترین کروموزوم، مقدار پارامترهای مورد نظر در طراحی PSS انتخاب می‌گردد. همچنین شکل (۱۰) نشان دهنده تغییرات تابع شایستگی الگوریتم ژنتیک (طبق رابطه ۷) و برحسب تعداد نسل‌های به‌وجود آمده می‌باشد.

ملاحظه می‌گردد که مقدار تابع شایستگی از نسل چهارم به بعد ثابت می‌شود و طبق شرط خاتمه الگوریتم (تکرار ۲۰ بار یک کروموزوم به عنوان بهترین)، برنامه در نسل شصتم خاتمه می‌یابد.



شکل ۱۰- نحوه تغییرات تابع شایستگی در طول نسل‌های اجرای برنامه الگوریتم ژنتیک

با طی مراحل فوق، پارامترهای تابع تبدیل داده شده به روش الگوریتم ژنتیک نیز به دست خواهند آمد. البته در مورد روند استفاده از الگوریتم ژنتیک که در این مقاله استفاده شده است، ذکر دو نکته زیر الزامی می‌باشد:

**نکته اول:** در هر نسل اعداد داخل ژن‌ها که به عنوان معرف مقدار متغیرها قرار گرفتند، باید در محدوده طبیعی خود باشند تا مثلاً متغیر  $T_s$  در محدوده صفر تا ۰/۱ تعیین شود.

**نکته دوم:** ممکن است یک کروموزوم به چند دلیل زیر از رقابت با سایر کروموزوم‌ها حذف گردد:

### ۵-۳- طراحی پارامترهای PSS به روش الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های هوشمند است که از وراثت طبیعی الهام گرفته و بر پایه اصول داروین می‌باشد. در این راستا، طراحی پارامترهای جبران گر PSS به روش الگوریتم ژنتیک بر اساس مراحل زیر انجام می‌گیرد:

**مرحله اول (تولید جمعیت اولیه):** الگوریتم ژنتیک برای طراحی دو پارامتر PSS می‌باشد که این دو پارامتر به صورت اعشاری و به روش باینری در نظر گرفته شده است. لذا با انتخاب ۱۰ ژن برای هر پارامتر، طول کروموزوم برابر ۲۰ ژن خواهد بود. از طرف دیگر در طراحی الگوریتم ژنتیک، بهتر است که تعداد کروموزوم‌های هر جمعیت، بین ۲ تا ۳ برابر تعداد ژن‌ها باشد. لذا در این مقاله تعداد جمعیت  $N=50$  در نظر گرفته شده است [۱۵].

**مرحله دوم (متغیرهای کروموزوم‌ها):** هر کروموزوم از دو متغیر برای انتخاب بهینه  $T_s$  و  $K$  جبران گر تشکیل شده است.

**مرحله سوم (تابع شایستگی):** تابع شایستگی (تابع هدف) به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\text{error} = \sum (|\text{real}(\text{eig}(A)) + 10|)$$

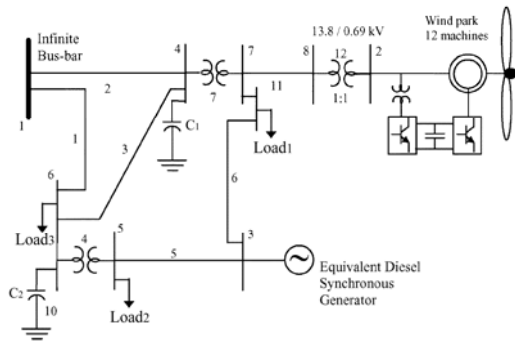
$$f_{\text{obj}} = 1 / \text{error} \quad (7)$$

در این رابطه،  $A$  نشان دهنده ماتریس  $A$  سیستم بوده و تابع  $\text{error}$  نشان دهنده مجموع اختلاف قسمت حقیقی مقادیر ویژه ماتریس  $A$  از مقدار ۱۰- (انتخاب به صورت تجربی) می‌باشد. این عدد بیان گر این است که در تشکیل مقادیر ویژه جدید ماتریس  $A$ ، مطلوب این بوده که قسمت حقیقی تمامی مدما ۱۰- باشد. بدیهی است که هر چه مجموع قسمت حقیقی مقادیر ویژه از عدد ۱۰- کمتر باشد مقدار  $\text{error}$  کمتر و تابع هدف ( $f_{\text{obj}}$ ) بیشتر می‌گردد.

**مرحله چهارم (انتخاب کروموزوم برای همبری):** انتخاب کروموزوم‌ها برای انجام عمل همبری براساس روش چرخ گردان صورت می‌گیرد (تعداد ۴۰ کروموزوم به عنوان والدین برای همبری انتخاب شده است).

**مرحله پنجم (عمل همبری):** عمل همبری به روش دو نقطه‌ای انجام می‌شود [۱۵].

**مرحله ششم (اعمال جهش):** در الگوریتم مورد نظر، ۴ بار جهش در هر نسل در نظر گرفته می‌شود [۱۵].



شکل ۱۱- شبکه مورد مطالعه شامل یک مزرعه بادی مجهز به DFIG

[۱۶]

با توجه به مقادیر نامی پارامترهای سیستم که در ضمیمه مقاله بیان شده است، مقدار  $\delta$  لازم برای به حداقل رساندن رابطه (۲) حدود ۱۴ درجه به دست می‌آید. این اختلاف زاویه که تفاوت زاویه مقدار فعلی با مقدار مطلوب می‌باشد با حضور یک پایدارساز جبران خواهد شد. بنابراین هدف این است که بردار  $V_r$  را حدود ۱۴ درجه انتقال زاویه بدهیم.

توضیحات فوق را می‌توان به صورت رابطه (۸) بیان نمود:

$$|V_{fold}| < \theta_{fold} + |V_{PSS}| < \theta_{PSS} = |V_{fnew}| < \theta_{fnew} \quad (8)$$

که مقدار اندازه و زاویه بردار مورد نظر ( $|V_{PSS}| < \theta_{PSS}$ ) به صورت  $224.09^\circ < 0.537$  به دست می‌آید. شکل (۱۲) حاصل جمع برداری ولتاژ رتور و بردار خروجی PSS را در نقطه نامی نشان می‌دهد. نتیجه حاصله ( $V_{fnew}$ )، برداری هم اندازه با بردار رتور ولی با اختلاف فازی حدود ۱۴ درجه می‌باشد.

با توجه به اینکه زاویه ورودی PSS، ۱۸۰ درجه و زاویه مورد نظر خروجی بلوک PSS (یعنی زاویه  $V_{PSS}$ ) حدود ۲۲۴ درجه (از محور d) می‌باشد، زاویه مورد جبران پایدارساز، حدود ۴۴ درجه و نوع جبران‌گر به خاطر جلوتر بودن زاویه خروجی جبران‌گر نسبت به ورودی آن، پیش‌فاز انتخاب می‌گردد. پارامتر  $T_s$  طبق رابطه (۵) و با فرکانس نوسانات  $\omega = 78.5 \text{ rad/sec}$ ، به مقدار ۰.۳۱۵ به دست می‌آید.

اندازه K نیز طبق رابطه (۶) و با توجه به اندازه ورودی PSS، ۱.۸۱۹ تعیین می‌شود. بنابراین تابع تبدیل جبران‌ساز

$$G(s) = \frac{-1.819}{(0.0315s+1)^2}$$

خواهد شد. در ضمن، با استفاده از

(۱) متغیرهای داخل کروموزوم در محدوده طبیعی خود نباشند.  
 (۲) با استفاده از تعریف ضریب میرایی به صورت  $\xi = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega^2}}$  (قسمت حقیقی مقدار ویژه با  $\sigma$  و قسمت موهومی آن با  $\omega$  نشان داده می‌شود)، اگر مقدار  $\xi$  هر مقدار ویژه در محدوده ۰.۱ تا ۰.۳ نباشد. بدیهی است که اگر قسمت حقیقی مقدار ویژه ماتریس A در کروموزومی دارای علامت مثبت باشد، علامت  $\xi$  منفی می‌گردد و خودبه‌خود آن کروموزوم حذف می‌گردد. لازم به ذکر است که انتخاب مقدار  $\xi$  بین حدود ۰.۱ تا ۰.۳ حاشیه امنیتی کاربردی مقادیر ویژه در اکثر طراحی‌های عملی می‌باشد.

(۳) مقدار شایستگی کروموزوم‌ها از میانگین شایستگی سایر کروموزوم‌ها کمتر باشد تا پارامترهای بهینه تعیین گردند.

با توجه به استفاده از الگوریتم GA بیان شده در بخش‌های قبل و طی کردن و در نظر گرفتن شروط عمومی حضور یک کروموزوم در چرخه رقابت با سایر کروموزوم‌ها، مقادیر پارامترهای  $T_s$  و K برای شبکه مورد مطالعه (بیان شده در بخش بعدی) برابر ۰.۴۷ و  $K = 2.11$  به دست می‌آیند.

## ۶- نتایج شبیه‌سازی

### ۶-۱- شبکه مورد مطالعه

شبکه مورد مطالعه استفاده شده در این مقاله در شکل (۱۱) نشان داده شده است [۱۶]. این شبکه شامل یک مزرعه بادی شامل ۱۲ توربین بادی مجهز به DFIG مناسب متصل به خطوط انتقال هر کدام با ظرفیت ۶۶۰ kW، ژنراتورهای سنکرون با ظرفیت معادل ۳۵/۳ MVA و شین بی‌نهایت می‌باشد. سه بار Load1، Load2 و Load3 در این شبکه تغذیه می‌گردند. لازم به ذکر است که توربین بادی در این شکل، معادل توربین‌های بادی موجود در مزرعه بادی است و ژنراتور سنکرون به‌کار رفته نیز معادل چند ژنراتور سنکرون در نظر گرفته شده است [۱۶]. مقادیر پارامترها و جزئیات اجزا شبکه در ضمیمه بیان شده است. برای شبیه‌سازی این شبکه از نرم‌افزار Matlab استفاده شده که برای مدل‌سازی ژنراتور سنکرون این شبکه از مدل مرتبه ۷ آن استفاده شده است.

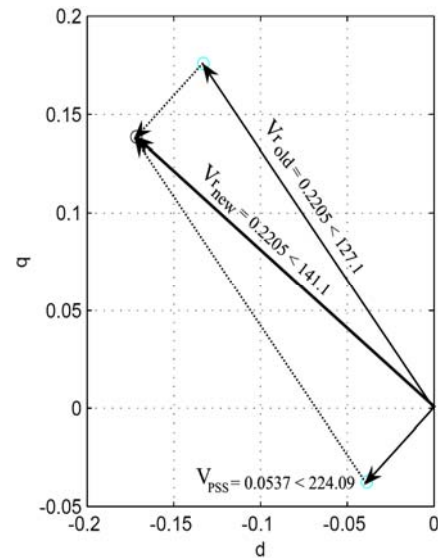
(طبق بند ۲ از بخش ۵-۳) بین ۰/۱ تا ۰/۳ قرار گرفته است. برای بررسی و تحلیل رفتار پارامترهای مختلف نیروگاه بادی مذکور دو حالت خطای جدا از هم برای سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. حالت اول اضافه شدن ۱۰٪ بار اضافی به بار Load1 و حالت دوم خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین در وسط خط انتقال شماره ۱۱ در شکل (۱۱) خواهد بود. در هر دو حالت اول و دوم سرعت باد ثابت و برابر با سرعت باد پایه (۱۱ m/sec) در نظر گرفته شده است.

#### ۶-۲- حالت اول: خطای اضافه بار Load1

در این حالت، باری به اندازه ۱۰٪ بار محلی به بار محلی Load1 در زمان  $t = 40 \text{ sec}$  اضافه می‌شود. این افزایش بار سبب ایجاد نوسان در پارامترهای DFIG می‌گردد. شکل‌های (۱۳) و (۱۴) به ترتیب نشان دهنده نحوه تغییرات پارامترهای توان الکتریکی و ولتاژ پایانه DFIG می‌باشند. نمودارهای با خط نقطه‌چین، خاکستری و پررنگ به ترتیب نشان دهنده رفتار پارامتر بدون حضور پایدارساز سیستم قدرت، با حضور پایدارساز سیستم قدرت به روش کلاسیک و به روش الگوریتم ژنتیک می‌باشد. همان‌طور که در بخش قبل نیز به آن اشاره شد، وظیفه کنترل دو پارامتر فوق بر عهده مبدل بخش رتور می‌باشد.

ملاحظه می‌گردد که سیستم کنترلی مبدل بخش رتور به خوبی به بازگشت توان الکتریکی و ولتاژ پایانه DFIG به حالت ماندگار و مطلوب خود کمک می‌کند اما میرایی سیستم به ترتیب با حضور پایدارساز سیستم قدرت به روش کلاسیک و بعد از آن به روش ژنتیک بیشتر افزایش می‌یابد.

طراحی پارامترهای PSS به روش الگوریتم ژنتیک، پارامترهای  $T_s$  و  $K$  به صورت  $T_s = 0.047$  و  $K = 2.11$  به دست می‌آیند. مقدار  $T$  برای تابع Wash-out، برابر ۲ و مقدار محدودگر PSS نیز صفر تا ۰/۵ در نظر گرفته شده است [۱۰].



شکل ۱۲- بردار ولتاژ رتور در نقطه نامی به همراه انتقال فازی

در جدول (۱) مقایسه‌ای بین مقادیر ویژه DFIG محاسبه شده در شبکه مورد مطالعه با روش‌های بدون استفاده از پایدارساز سیستم قدرت، با استفاده از پایدارساز سیستم قدرت به روش کلاسیک و ژنتیک انجام شده است. با به‌کارگیری مقادیر پارامترهای موردنیاز به دست آمده از شبکه مورد مطالعه، مقادیر ویژه ماتریس A ژنراتور القایی دو تغذیه در سه حالت فوق، به صورت جدول (۱) ارائه می‌گردد:

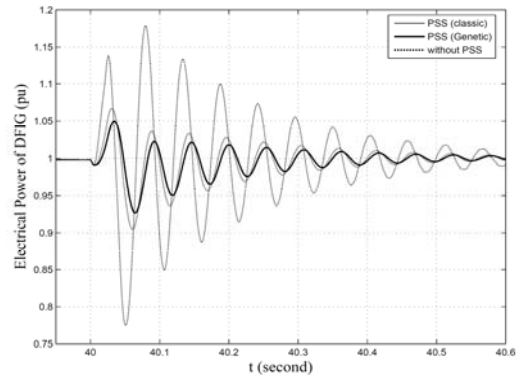
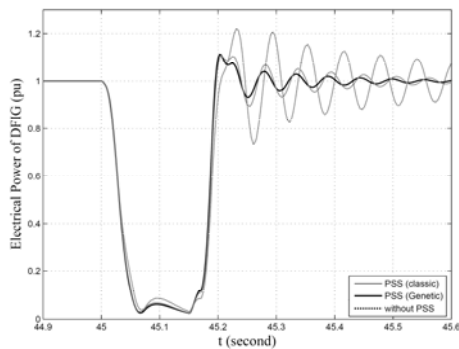
با توجه به جدول (۱) ملاحظه می‌گردد که مد مکانیکی سیستم (سطر اول) بعد از استفاده از پایدارساز سیستم قدرت نسبت به قبل از آن بهبود و با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهتر نیز شده است. البته ضریب میرایی مقادیر ویژه ماتریس A با استفاده از پایدارساز سیستم قدرت به روش الگوریتم ژنتیک

جدول ۱- مقادیر ویژه ماتریس A و ضرایب میرایی سیستم با استفاده از PSS و بدون استفاده از آن

با استفاده از PSS (ژنتیک)		با استفاده از PSS (کلاسیک)		بدون استفاده از PSS	
مقادیر ویژه	ضریب میرایی	مقادیر ویژه	ضریب میرایی	مقادیر ویژه	ضریب میرایی
$-11.12 \pm j45.17$	۰/۲۳۹	$-8.83 \pm j53.77$	۰/۱۶۲	$-5.5 \pm j73.325$	۰/۰۷۴
$-9.17 \pm j49.2$	۰/۱۸۳	$-7.39 \pm j62.325$	۰/۱۱۷	-۸/۳۷۶	۱
$-10.09 \pm j64.1$	۰/۱۵۵	$-14.42 \pm j84$	۰/۱۶۹		

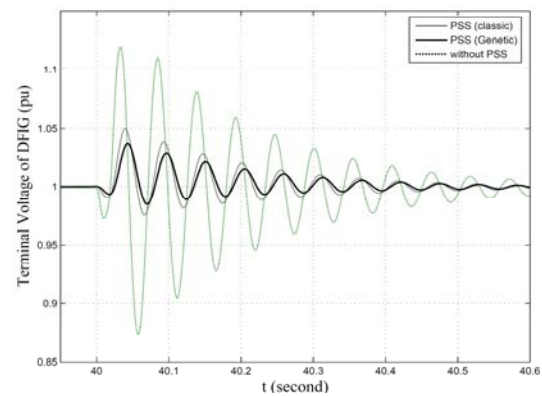
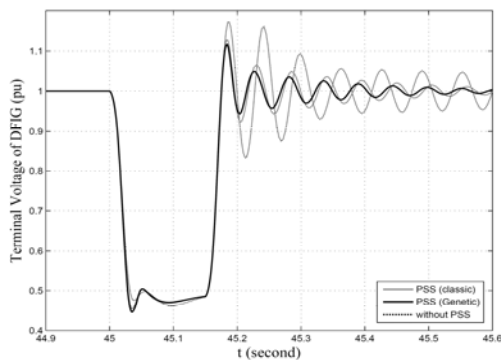


ژنتیک به خوبی توانسته است پایداری دینامیکی را به شکل مطلوبی بهبود بخشد.



شکل ۱۳- نحوه تغییرات توان الکتریکی DFIG هنگام وقوع خطای اضافه بار

شکل ۱۵- نحوه تغییرات توان الکتریکی DFIG در خطای اتصال کوتاه سه فاز



شکل ۱۴- نحوه تغییرات ولتاژ پایانه DFIG هنگام وقوع خطای اضافه بار

شکل ۱۶- نحوه تغییرات ولتاژ الکتریکی DFIG در خطای اتصال کوتاه سه فاز

### ۶-۳- حالت دوم: خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین

در این حالت، از خطای اتصال کوتاه در سیستم برای نشان دادن توانایی پایدارساز سیستم قدرت در میرا نمودن پارامترهای سیستم استفاده می‌شود. این خطا به صورت وقوع اتصال کوتاه سه فاز به زمین در وسط خط انتقال ۱۱ در زمان  $t = 45 \text{ sec}$  به مدت  $150 \text{ msec}$  می‌باشد. نمودارهای شکل‌های (۱۵) و (۱۶) به ترتیب نحوه تغییرات توان الکتریکی و ولتاژ پایانه DFIG را قبل و بعد از وقوع خطای اتصال کوتاه سه فاز به زمین نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که بعد از اغتشاش بزرگ در شبکه، افت شدیدی در توان الکتریکی به وجود می‌آید. بعد از رفع خطا طی مدت  $150 \text{ msec}$ ، سیستم‌های کنترلی مبدل بخش شبکه و بخش رتور، به ترتیب توان الکتریکی و ولتاژ پایانه DFIG را به مقدار مطلوب خود ( $1 \text{ pu}$ ) برمی‌گردانند، اما این بازگشت با نوساناتی همراه می‌باشد. همچنین شکل‌های (۱۵) و (۱۶) نشان می‌دهند که به‌کارگیری PSS طراحی شده با روش الگوریتم

### ۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از الگوریتم ژنتیک، پارامترهای PSS برای یک توربین بادی مجهز به ژنراتورهای DFIG با روش مدونی طراحی گردید. در این راستا از کنترل برداری در مدل DFIG، به منظور کنترل مطلوب توان اکتیو و راکتیو بخش شبکه استفاده شده است. همچنین برای بیان معیار افزایش پایداری دینامیکی، زاویه ولتاژ رتور به عنوان مناسب‌ترین پارامتر برای تغییر زاویه  $E'$  انتخاب گردید. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که حلقه اضافی پایدارساز سیستم قدرت با اعمال سیگنال مکمل مناسب توانست پایداری سیستم را در اغتشاش‌های کوچک و حتی بزرگ به نحو مطلوبی بهبود بخشد. همچنین با استفاده از الگوریتم ژنتیک در طراحی پارامترهای PSS و مقایسه نتایج با طراحی کلاسیک، مشاهده گردید که میرایی سیستم به نحو مطلوبی بهبود یافته است.

## مراجع

- [11] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly Fed Induction Generator Using Back-to-Back PWM Converters and Its Application to Variable-Speed Wind-Energy," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 143, pp. 231-241, May 1996.
- [12] R. Gagnon, S. Bernard, D. Pare, S. Casoria and C. Larose, "Modeling and Real-Time Simulation of a Doubly-Fed Induction Generator Driven by a Wind Turbine," International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada, Jun. 19-23, 2005.
- [13] K. Elkington, V. Knazkins and M. Ghandhari, "On The Rotor Angle Stability of Power Systems With Doubly Fed Induction Generators," IEEE Power Tech. 2007, Lausanne, pp. 213-218, 1-5 Jul. 2007.
- [14] O. Anaya-Lara, F. M. Hughes, N. Jenkins and G. Strbac, "Power system stabiliser for a generic DFIG-based wind turbine controller," The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission, pp. 145-149, 28-31 Mar. 2006.
- [15] S. Yang, "Adaptive Crossover in Genetic Algorithms using statistics mechanism," in Artificial Life VIII, Standish, Abbass, Bedau, MIT press, pp. 182-185, 2002.
- [16] P. M. Anderson, Analysis of Faulted Power System. Ames, IA: The Iowa State University Press, 1973.
- [1] T. Ackermann and L. Soder, "An Overview of Wind Energy-Status 2002," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 6, no. 1-2, pp. 67-128, Feb./Apr. 2002.
- [2] A. D. Hansen, P. Sørensen, F. Blaabjerg and J. Bech, "Dynamic Modelling of Wind Farm Grid Interaction," Journal of Wind Engineering, vol. 26, no. 4, pp. 191-208, 2002.
- [3] V. Akhmatov, "Variable-Speed Wind Turbines With Doubly-Fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools," Wind Engineering, vol. 26, no. 2, pp. 85-108, 2002.
- [4] B. Rabelo and W. Hofmann, "Optimal Active and Reactive Power Control With The Doubly-Fed Induction Generator In The MW-Class Wind-Turbines," in Proc. International Conference on Power Electronics and Drives Systems, vol. 1, Denpasar, Indonesia, , pp. 53-58, 22-25 Oct. 2001.
- [5] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Variable-Speed Wind Power Generation Using Doubly Fed Wound Rotor Induction Machine-A Comparison With Alternative Schemes," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 17, no. 3, pp. 414-421, Sep. 2002.
- [6] L. Xu and P. Cartwright, "Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation," IEEE Trans. Energy Conversion, vol. 21, no. 3, pp. 750-758, Sep. 2006.
- [7] B. Hopfensperger, D. J. Atkinson, and R. A. Lakin, "Stator-flux-Oriented Control of A Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder," IEE Proc. Electr. Power Appl., vol. 147, pp. 241-250, Jul. 2000.
- [8] F. Mei and B. C. Pal, "Modelling and Small-Signal Analysis of a Grid Connected Doubly-Fed Induction Generator," IEEE Power Engineering Society General Meeting , vol. 3, pp. 2101-2108, Jun. 2005.
- [9] O. Anaya-Lara, F. M. Hughes, N. Jenkins and G. Strbac, "Rotor Flux Magnitude and Angle Control Strategy for Doubly Fed Induction Generators," Wind Energy, vol. 9, pp. 479-495, Jun. 2006.
- [10] F. M. Hughes, O. Anaya-Lara, N. Jenkins and G. Strbac, "A Power System Stabilizer for DFIG-Based Wind Geeration," IEEE Trans. Power Syst., vol. 21, no. 2, pp. 763-772, May 2006.

## ضمیمه (الف) - مشخصات شبکه مورد مطالعه

در این ضمیمه، مشخصات الکتریکی سیستم مورد مطالعه ارائه شده در شکل (۱۱)، در جداول (الف-۱) تا (الف-۴) آورده شده است. همچنین فهرست اختصاری متغیرها به صورت زیر می‌باشد:

$R_s$	مقاومت استاتور:
$R_r$	مقاومت رتور:
$L_{ls}$	اندوکتانس پراکندگی استاتور:
$L_{lr}$	اندوکتانس پراکندگی رتور:
$L_m$	اندوکتانس مغناطیسی:
$H$	ثابت اینرسی:
$F$	ضریب اصطکاک:
$P$	جفت قطب:
$V_n$	ولتاژ نامی ماشین:

جدول (الف-۳): مشخصات ژنراتور سنکرون

S	۳۵٫۳ MVA
V	۱۳٫۸ kV
$R_s$	۰٫۰۰۱ pu
$X_d$	۱۴ pu
$X_q$	۱٫۳۷۲ pu
$X'_d$	۰٫۲۳۱ pu
$X''_d$	۰٫۱۱۸ pu
$X'_q$	۰٫۸ pu
$X''_q$	۰٫۱۱۸ pu
$T'_{do}$	۵٫۵ sec
$T''_{do}$	۰٫۰۵ sec

جدول (الف-۴): مبدل‌های بخش شبکه و رتور

کنترل کننده E - PI به $i_d^*$	$K_p=۰٫۰۰۲$
	$K_I=۰٫۰۵$
کنترل کننده $i_d^*$ - PI به $v_d'$	$K_p=۱$
	$K_I=۱۰۰$
کنترل کننده $i_q^*$ - PI به $v_q'$	$K_p=۱$
	$K_I=۱۰۰$
$E^*$	۲۵۸٫۷۵ V
C	۱۳٫۶۲ $\mu$ F
$R_{Grid}$	۰٫۰۰۳ pu
$L_{Grid}$	۰٫۳ pu
کنترل کننده $i_{dr}^*$ - PI به $v_{dr}'$	$K_p=۰٫۳$
	$K_I=۰٫۸$
کنترل کننده $i_{qr}^*$ - PI به $v_{qr}'$	$K_p=۰٫۳$
	$K_I=۰٫۸$
$I_{q\_ref}$	۰

پی‌نوشت‌ها

- 1- Power System Stabilizer
- 2- Doubly Fed Induction Generator
- 3- Flux Magnitude and Angle Control
- 4- Voltage Regulator
- 5- Current Regulator

$P_n$	توان نامی ماشین:
Load1	بار ۱:
Load2	بار ۲:
Load3	بار ۳:
$V_{inf}$	ولتاژ شین بی‌نهایت:
$P_{inf}$	توان ظاهری شین بی‌نهایت:
C	خازن بین دو مبدل:
$R_{grid}$	مقاومت مبدل بخش شبکه:
$L_{grid}$	اندوکتانس مبدل بخش شبکه:

جدول (الف-۱): مشخصات DFIG

$R_s$	۰٫۰۰۷ pu
$R_r$	۰٫۰۰۵ pu
$L_{ls}$	۰٫۲۹۳ pu
$L_{lr}$	۰٫۲۶۶ pu
$L_m$	۳٫۳ pu
H	۵٫۰۴
F	۰٫۰۱
P	۳
$V_n$	۶۹۰ V
$P_n$	۶۶۰ kW

جدول (الف-۲): خطوط انتقال، شین بینهایت و بارها

Load1	۱۷ MW و ۳٫۵ MVAR
Load2	۱۵ MW و ۹ MVAR
Load3	۲۵ MW و ۹ MVAR
$V_{inf}$	۱۳٫۸ KV
$S_{inf}$	۱۰۰ MVA
$X_1$	۰٫۱۷۳۲ pu
$X_2$	۰٫۱۵۱ pu
$X_3$	۰٫۱ pu
$X_5$	۰٫۲ pu
$X_6$	۰٫۱۹۰۱ pu
$X_{11}$	۰٫۱۰۱ pu
$X_{12(T)}$	۰٫۱۹۰۱ pu