

# مدل کردن ژنراتور و طراحی پایدار ساز در سیستم‌های قدرت چند ماشینه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و شبکه های عصبی

محمد رضا بسمی

استادیار دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شاهد

m\_r\_besmi@yahoo.com

J.W.Finch

University of Newcastle, UK

j.w.finch@ncl.ac.uk

(تاریخ دریافت ۸۳/۱۱/۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۸/۳۰، تاریخ تصویب ۸۴/۹/۲۶)

## چکیده

هدف این مقاله طراحی پایدار سازهای قدرت (PSS) در سیستم‌های قدرت چند ماشینه می باشد. در این مطالعه نقش مدل کردن ژنراتور و شبکه که تاثیر مستقیمی در طراحی PSS دارد مورد توجه ویژه قرار گرفته است. جهت این منظور مهمترین مدل های ژنراتور در یک سیستم قدرت چند ماشینه در شبکه قدرت بدون اتصال به شین بینهایت (MMPS) و نیز شبکه ای که به شین بینهایت متصل شده باشد (MMPSW) شبیه سازی شده اند و اثرات این مدل ها و شین بینهایت در شبکه در شرایط دینامیک سیستم مورد توجه قرار گرفته و نتایج حاصله برای انتخاب مدل مورد نظر و شبکه مورد نظر در طراحی PSS مورد بررسی قرار گرفته است. کنترل کننده PID جهت طراحی PSS مورد استفاده قرار گرفته است و پارامترهای این کنترل کننده در تعدادی از شرایط کاری مشخص در یک سیستم قدرت چند ماشینه از روش جدید الگوریتم ژنتیک ساده (NSGA) بدست آمده است. از روش شبکه های عصبی (ANN) جهت ارتباط و استفاده مناسب از پارامترهای بدست آمده از طریق GA در یک فضای کاری پیوسته و وسیع استفاده شده است.

**واژه های کلیدی:** پایدار ساز سیستم قدرت، سیستم قدرت چند ماشینه، الگوریتم ژنتیک، شبکه های عصبی

## مقدمه

پارامترهای استخراج شده برای تعدادی از نقاط کاری ژنراتوری که قرار است به PSS تجهیز شود بدست می آیند. پارامترهای بدست آمده توسط GA برای نقاط کاری مختلف ژنراتور از طریق ANN بهم مرتبط می شوند تا PSS طراحی شده بتواند در هر شرایط کاری بهترین پارامترهای کنترل کننده را ارائه دهد.

## سیستم های قدرت چند ماشینه

در سیستم های قدرت، ولتاژ ترمینال ژنراتورهای متصل شده به شین ها از طریق حل معادلات پخش بار بدست می آیند. این ولتاژها نسبت به یک مرجع مختصات که معادلات شبکه نیز نسبت به آن حل می شوند، بدست می آیند. این مرجع مختصات سنکرون که D-Q نامیده شده است جهت حل معادلات شبکه استفاده می شود. مدل های ریاضی هر ژنراتور در محورهای d-q مربوط به آن ژنراتور از طریق مدل پارک بدست می آیند. زاویه بین

به علت وابستگی شدید عملکرد PSS ها به مدل شبکه و مدل ژنراتور نیاز هست تا قبل از هر گونه طراحی مدل شبکه و مدل ژنراتور بطور دقیق بدست آید. از آنجائیکه در مطالعه سیستم‌های قدرت چند ماشینه مدل ژنراتور نقش مهمی را بعهده دارد، در این مقاله در ابتدا تلاش شده است تا نقش کلیدی تعدادی از مدل های مهم ژنراتور که در مطالعه دینامیک سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرند مشخص شوند. همچنین اثرات حالت گذرا در مدل سازی ژنراتورها و شبکه مورد توجه قرار گرفته است. در طراحی PSS بدلیل وابستگی شدید عملکرد PSS به مدل شبکه تلاش شده است تا پایدار ساز قدرت در شبکه قدرت با شین بینهایت (MMPSW) و نیز بدون شین بینهایت (MMPS) مورد بررسی قرار گیرد تا تاثیر شین بینهایت بر عملکرد PSS بدست آید. بعد از انتخاب شبکه و مدل مورد نظر، پارامترهای کنترل کننده PID استفاده شده در PSS از طریق GA بدست می آیند.

$$\begin{bmatrix} i \\ V_D \\ i \\ V_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\delta^i) & -\sin(\delta^i) \\ \sin(\delta^i) & \cos(\delta^i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d^i \\ V_q^i \end{bmatrix} \quad (1)$$

که در آن  $\delta^i$  زاویه روتور ژنراتور  $i$ ، زاویه بین مرجع واقع بر ژنراتور و مرجع اصلی می باشد. معادله (۱) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$V_{DQ}^i = T^i V_{dq}^i \quad (2)$$

که در آن

$$T^i = \begin{bmatrix} \cos(\delta^i) & -\sin(\delta^i) \\ \sin(\delta^i) & \cos(\delta^i) \end{bmatrix}, V_{DQ}^i = \begin{bmatrix} V_D \\ i \\ V_Q \end{bmatrix}, V_{dq}^i = \begin{bmatrix} V_d^i \\ V_q^i \end{bmatrix}$$

برای یک سیستم چند ماشینه با  $m$  ژنراتور معادله (۲) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$V_{DQ} = T V_{dq} \quad (3)$$

که در آن

$$V_{DQ} = \begin{bmatrix} V_{DQ}^1 \\ V_{DQ}^i \\ V_{DQ}^m \end{bmatrix}, T = \begin{bmatrix} T^1 & & \\ & T^i & \\ & & T^m \end{bmatrix}, V_{dq} = \begin{bmatrix} V_{dq}^1 \\ V_{dq}^i \\ V_{dq}^m \end{bmatrix}$$

### حل معادلات شبکه

بعد از محاسبه پخش بار و بدست آوردن ولتاژ در مرجع اصلی توسط تابع تبدیل انتقال، ولتاژ ترمینال  $V_d$  و  $V_q$  در هر ژنراتور متصل به شبکه بدست خواهد آمد. معادلات شبکه در مرجع اصلی می تواند به شکل ماتریسی به مرجع مربوط به هر ژنراتور یعنی مرجع  $d-q$  تبدیل شود.

$$V_{DQ} = Z_{DQ} I_{DQ} \quad (4)$$

در معادله (۴) با جایگزینی  $V_{DQ}$  و  $I_{DQ}$  در مرجع  $d-q$  داریم:

$$V_{dq} = Z_{dq} I_{dq} \quad (5)$$

که در آن

$$Z_{dq} = T^{-1} Z_{DQ} T \quad (6)$$

محورهای مختصات هر واحد و محورهای مختصات مرجع، توصیف کننده زاویه بار می باشد. ژنراتورها از طریق شین های مشخصی به شبکه متصل شده اند. جریان و ولتاژ در ژنراتورها در محورهای  $d-q$  از طریق تابع تبدیل انتقال محورها به جریان و ولتاژ در محور های  $D-Q$  و یا بالعکس مرتبط می شوند. در اثر هر شوک یا اغتشاش به سیستم، نظیر افزایش یا کاهش ناگهانی بار و یا بروز هر گونه خطا در شبکه، سرعت ژنراتورها تغییر خواهد نمود. بنابراین محورهای مختصات هر واحد نسبت به محورهای مختصات مرجع نوسان خواهد نمود [۱].

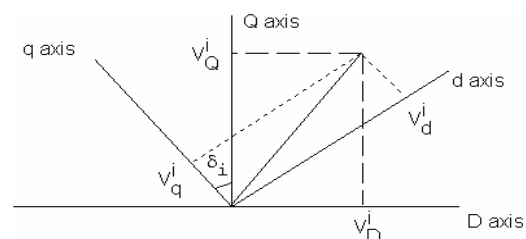
### مطالعه پخش بار

یک قسمت از شبیه سازی سیستم قدرت چند ماشینه مربوط به حل معادلات پخش بار می باشد. با توجه به امیدانس خطوط و نقاط کاری مشخص شده برای هر شین از حیث توان تزریق شده بغیر از شین مرجع، می توان از تکنیک های عددی، ولتاژ در هر شین را بدست آورد [۱].

### تابع تبدیل انتقال محورها

با حل معادلات پخش بار، ولتاژ در هر شین بدست خواهد آمد. ولتاژ های حاصل در شین ها از طریق حل معادلات پخش بار در مرجع اصلی  $D-Q$  بدست خواهد آمد. می توان از طریق تابع تبدیل انتقال این ولتاژها را به محورهای مختصات مرتبط به هر ژنراتور منتقل نمود. ارتباط بین یک مرجع دلخواه  $d-q$  نسبت به مرجع اصلی در شکل ۱- نشان داده شده است. تبدیل ولتاژ و جریان و یا هر متغیر دیگر در مرجع اصلی به مرجع های منفرد از طریق تابع تبدیل انتقال از روی شکل (۱) بصورتی که خواهد آمد، بدست می آید.

ولتاژ بدست آمده در هر مرجع انفرادی  $d-q$  توسط معادله (۱) به ولتاژ در مرجع اصلی  $D-Q$  تبدیل می گردد [۱].



شکل ۱: محورهای مختصات ولتاژ در باس  $i$ .

### شبیه سازی MMPS با مدل های متداول

بررسی قرار گیرد. در این بررسی مدل ۱ بعنوان مدل دقیق معرفی شده است و مدل های ۲ الی ۴ مدل های ساده شده مدل ۱ می باشند، که به بررسی آنها می پردازیم.

$$V_{dq} = \begin{bmatrix} V_{dq}^l \\ V_{dq}^i \\ V_{dq}^m \end{bmatrix}, I_{dq} = \begin{bmatrix} I_{dq}^l \\ I_{dq}^i \\ I_{dq}^m \end{bmatrix}, V_{dq}^i = \begin{bmatrix} V_d^i \\ V_q^i \end{bmatrix}, I_{dq}^i = \begin{bmatrix} I_d^i \\ I_q^i \end{bmatrix}$$

### مرجع اصلی

فرض می شود که مرجع اصلی D-Q بطور سنکرون با فرکانس پایه شبکه می چرخد و در حالت پایدار کلیه ژنراتورها با یک سرعت مساوی با فرکانس پایه می چرخند. در یک شبکه چند ماشینه متصل به شین بینهایت، هنگام وقوع یک اغتشاش در شبکه، متداول است تا سرعت گردش مرجع D-Q، سنکرون با شین بینهایت بر اساس فرکانس پایه باشد. در یک شبکه چند ماشینه واقعی، بدون در نظر گرفتن شین بینهایت، یکی از ماشین ها بعنوان مرجع در نظر گرفته می شود.

### شبیه سازی شبکه قدرت با چند ماشین

یک سیستم قدرت بطور واقعی متشکل از چند ماشین بدون حضور شین بینهایت می باشد. مدل ژنراتور در نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم قدرت از اهمیت خاصی برخوردار می باشد. از آنجائیکه در کارهای تحقیقاتی از مدل های مختلف ژنراتور و در تعدادی از شبیه سازی ها مدل شبکه متصل به شین بینهایت در نظر گرفته شده است، در این مقاله تلاش شده است تا با یک مطالعه سیستماتیک دقت تعدادی از مدل های ژنراتور را که استفاده زیادی در کارهای تحقیقاتی می شود را با یکدیگر مقایسه نموده و نیز تاثیر شبکه بینهایت را با نتایج حاصل از یک شبکه واقعی مشابه مقایسه نمائیم. این بررسی ها سبب خواهد شد تا بتوان مدل ژنراتور و شبکه مورد نظر را با دقت مناسب در طراحی پایدار ساز قدرت انتخاب نمود. بنابراین در این بخش ابتدا چند مدل متداول ژنراتور در یک شبکه قدرت واقعی مورد استفاده قرار می گیرد و نتایج آنها تحت تاثیر اتصال کوتاه سه فاز با یکدیگر مقایسه می شوند و ثانیاً اثر شبکه بینهایت مورد بررسی قرار می گیرد. در این مقاله برای اختصار مدل شبکه قدرت چند ماشینه بدون اتصال به شین بینهایت را با کد MMPS و شبکه قدرت چند ماشینه با شین بینهایت را با کد MMPSW نمایش می دهیم.

### شبیه سازی MMPS با مدل ۱ ژنراتور

مدل ۱، مدل کامل و دقیقی است [۱] که جهت شبیه سازی ژنراتور در سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرد. این مدل توسط هفت معادله دیفرانسیل غیر خطی [ضمیمه-الف] ارائه شده است و نیز اثر حالت گذرای جریان که در شرایط خطای واقع بر شبکه رخ می دهد مورد توجه قرار گرفته است. در این مطالعه از تغییرات فرکانس در اثر اتصال کوتاه سه فاز بدلیل تاثیرات نامحسوس تغییرات فرکانس در حل معادلات پخش بار و پیچیده کردن محاسبات پرهیز شده است. بنابراین MMPS با m ژنراتور با مدل ۱ مورد بررسی قرار می گیرد. معادلات پخش بار که بصورت ماتریسی نمایش داده شده است، در این مدل عبارت است از:

$$V = ZI + LI \quad (7)$$

که در آن V بردار ولتاژ شین ها می باشد که اندازه گیری مقدار آنها نسبت به مرجع اصلی صورت می گیرد، I بردار جریان تزریق شده در شین ها، I بردار جریان گذرا که بر اثر اغتشاش و یا خطا در شبکه ایجاد می گردد، Z امپدانس شبکه و L نیز اندوکتانس شبکه می باشد. معادلات شبکه در مرجع اصلی D-Q و مرجع منفرد d-q برای هر ژنراتور بصورت زیر می باشد:

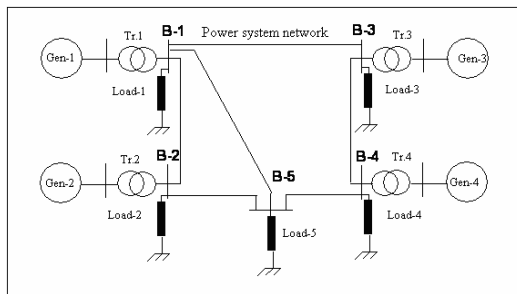
$$VDQ = ZDQ IDQ + LDQ IDQ \quad (8)$$

$$V_{dq} = T^{-1} ZDQ^T I_{dq} + T^{-1} LDQ^T I_{dq} \quad (9)$$

### شبیه سازی MMPS با مدل ۲ ژنراتور

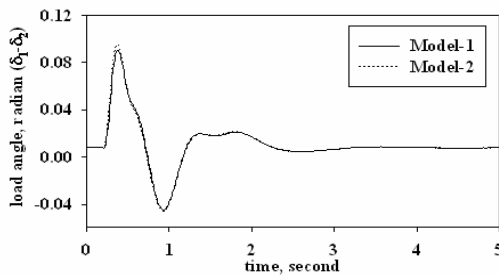
در این قسمت چهار مدل از ژنراتور [۱] را که معمولاً در مطالعه دینامیک سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرد، شبیه سازی نموده تا دقت هر مدل در شرایط

استفاده قرار گرفته است.

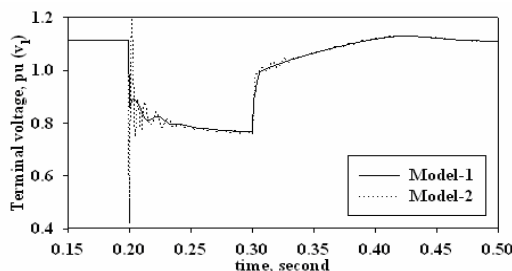


شکل ۲: سیستم قدرت با چهار ژنراتور.

کلیه مقادیر پارامترهای ژنراتورها، خطوط انتقال، کنترل کننده های میدان تحریک و گاورنر در ضمیمه ب ارائه شده است. این مطالعه برای یک اتصال کوتاه سه فاز در شین B-5 در لحظه 0.2s برای مدت زمان 0.1s آزمایش شده است تا رفتار مدل های ارائه شده برای ژنراتورها مورد بررسی قرار گیرند. شکل های (۳) الی (۵) مقایسه نتایج زاویه بار و ولتاژ ترمینال را در تعدادی از شین ها برای مدل های ۱ و ۲ ژنراتور نشان می دهد. نتایج حاصل از ولتاژ ترمینال نشان می دهد که حذف جریان گذرای ژنراتور در مدل ۲ دقت لازم را به این مدل در مشاهده نتایج خروجی ولتاژ در لحظات وقوع خطا ارائه نمی دهد. هرچند تاثیر آن بر نتایج خروجی زاویه بار قابل صرف نظر کردن می باشد.



شکل ۳: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_2)$  برای Model-1 و Model-2.



شکل ۴: مقایسه نتایج برای ولتاژ ترمینال در باس B-1 برای Model-1 و Model-2.

خطای سه فاز وارد شده به یکی از نقاط شبکه مورد مدل ۲ ژنراتور نظیر مدل ۱ با هفت معادله دیفرانسیل غیر خطی مدل می شود، اما در مدل ۲ از اثر جریان حالت گذرای ژنراتور در شبکه صرف نظر می شود. بنابراین با حذف قسمت دیفرانسیل جریان از معادله پخش بار (۸) به معادله (۴) که قبلاً معرفی شد خواهیم رسید. لذا معادله پخش بار به معادله جبری (۴) کاهش می یابد.

### شبیه سازی MMPS با مدل ۳ ژنراتور

در مدل ۳ جملات  $\Psi_d$  و  $\Psi_q$  از معادلات دیفرانسیل ارائه شده برای مدل ۱ حذف می شوند. بنابراین معادلات دیفرانسیل غیر خطی ماشین از هفت در مدل ۱ و مدل ۲ به پنج معادله کاهش خواهد یافت. در این مدل نیز معادله پخش بار نظیر مدل ۲ می باشند، یعنی معادلات (۴).

### شبیه سازی MMPS با مدل ۴ ژنراتور

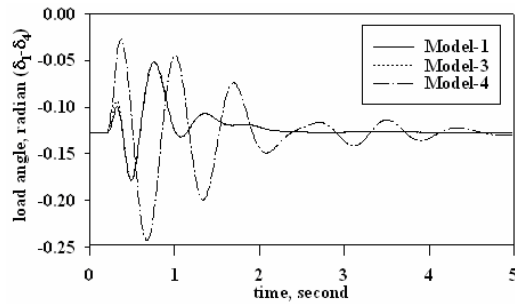
در مدل ۴ ساده سازی بیشتری نسبت به مدل ۳ صورت گرفته است. در این مدل سیم پیچ های دمپر در نظر گرفته نشده اند و نظیر مدل ۳ جملات  $\Psi_d$  و  $\Psi_q$  از معادلات دیفرانسیل ارائه شده برای مدل ۱ حذف شده اند.

### شبیه سازی و مطالعه روی دو شبکه خاص

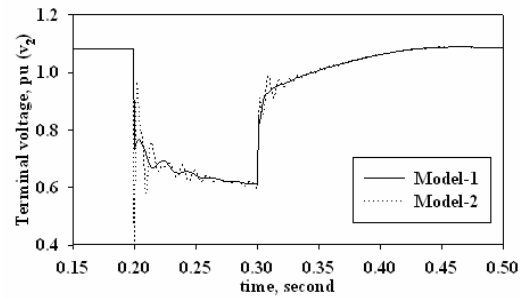
شبیه سازی مدل های معرفی شده برای ژنراتورها در MMPS با استفاده از نرم افزار Simulink می باشد، برای جزئیات بیشتر به مرجع [۱۳] مراجعه نمایید. اولین شبیه سازی و مطالعه روی یک شبکه با چهار ماشین با مدل های معرفی شده برای ژنراتور بدون اتصال به شبکه بینهایت انجام گرفته است، یعنی شبکه MMPS. دومین شبیه سازی و مطالعه روی یک شبکه با سه ماشین با مدل های ارائه شده برای ژنراتور با اتصال به شبکه بینهایت صورت گرفته است، یعنی شبکه MMPSW. جهت مقایسه نتایج MMPS و MMPSW مدل سه ماشینه مجدداً روی MMPS اعمال شده است و تاثیرات شین بینهایت نیز مورد توجه قرار می گیرد.

### مطالعه شبکه بدون اتصال به شین بینهایت

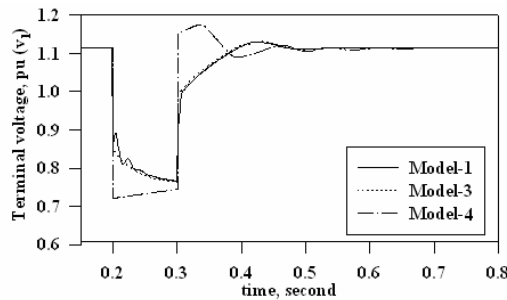
در این مطالعه یک شبکه چند ماشینه با چهار ماشین بدون اتصال به شین بینهایت مطابق شکل (۲) مورد



شکل ۸: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_4)$  برای Model-1 و Model-2 و Model-3.

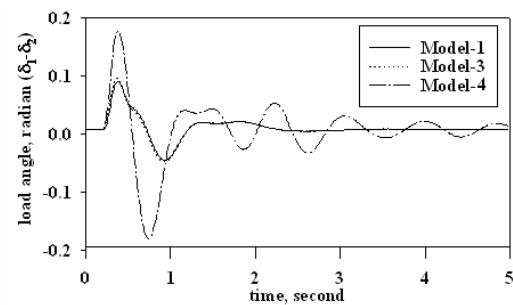


شکل ۵: مقایسه نتایج برای ولتاژ ترمینال در باس B-2 برای Model-1 و Model-2.

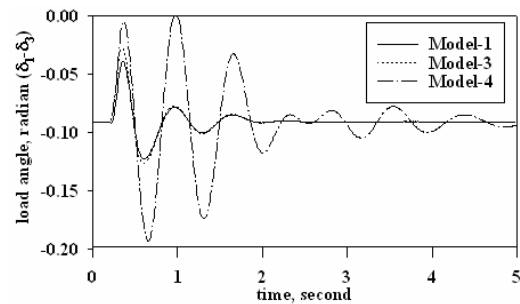


شکل ۹: مقایسه نتایج برای ولتاژ ترمینال در باس B-1 برای Model-1 و Model-2 و Model-3.

شکل های (۶) الی (۹) مقایسه نتایج حاصل از مدل های ۱، ۳ و ۴ ژنراتور را برای ولتاژ خروجی و زاویه بار با شرایط ذکر شده قبلی ارائه می دهند. نتایج بطور روشن نشان می دهند که مدل ۳ ژنراتور رفتاری مشابه مدل ۱ را نمایش میدهد اما مدل ۴ بدلیل حذف سیم پیچ های دمپر توانایی ارائه یک مدل دقیق و مناسب را ندارد. می توان نتیجه گرفت که مدل ۱ و مدل ۳ در مطالعه دینامیک سیستم های قدرت چند ماشینه می توانند مورد استفاده قرار گیرند. در اکثر مقالات از مدل ۳ در شبیه سازی شبکه های قدرت چند ماشینه استفاده شده است.



شکل ۶: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_2)$  برای Model-1 و Model-2 و Model-3.

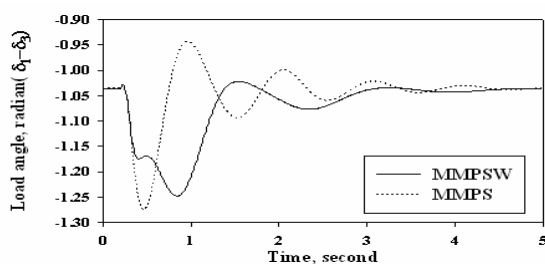


شکل ۷: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_3)$  برای Model-1 و Model-2 و Model-3.

### مطالعه شبکه متصل به شین بینهایت

در تعدادی از مطالعات دینامیکی در سیستم های قدرت یک شین بعنوان شین بینهایت در نظر گرفته شده است. هدف این قسمت مطالعه شبکه قدرت چند ماشینه با در نظر گرفتن شین بینهایت است که اصطلاحاً در این مقاله برای سادگی به MMPSW نامیده می شود. دلیل اصلی این مطالعه مقایسه نتایج حاصله با شبکه مشابه بدون شین بینهایت می باشد تا بتوان تاثیرات شین بینهایت را در مطالعات شبکه های چند ماشینه مورد توجه قرار دهیم. در این مطالعه شبکه ای با سه ژنراتور مطابق شکل (۱۰) داده شده است. شین B-4 توسط یک کلید می تواند به شین بینهایت تبدیل شود. کلیه پارامترهای ژنراتور، خطوط انتقال و کنترل کننده های گاورنر و میدان تحریک در ضمیمه ب داده شده است. این شبکه با فرض اتصال شین B-4 به شین بینهایت و با وقوع اتصال کوتاه سه فاز در این شین در لحظه 0.2s برای مدت زمان 0.1s آزمایش شده است تا رفتار مدل های ۱، ۳ و ۴ ژنراتورها را در شبکه متصل شده به شین بینهایت نشان دهد. شکل های (۱۱) و (۱۲) نتایج حاصل از زاویه بار را برای مدل های ذکر شده در تعدادی از شین ها مقایسه می نماید. نتایج مجدداً نشان

(۱۳) و (۱۴) برای اختلاف زاویه بار در شینه‌های ۱، ۲ و ۳، مشاهده نمود. این نتایج نشان می‌دهد که شین بینهایت اثر قابل ملاحظه‌ای را بر روی ژنراتور متصل شده به شین B-3 که نزدیک به شین بینهایت می‌باشد می‌گذارد. اما برای ژنراتورهائی که دور از شین بینهایت هستند این تاثیرات بسیار کمتر خواهد بود. در این مطالعه با توجه به مقدار پارامترهای خطوط انتقال می‌توان فرض نمود که ژنراتور ۳ نزدیک به شین بینهایت و ژنراتورهای ۱ و ۲ از شین بینهایت دور هستند.

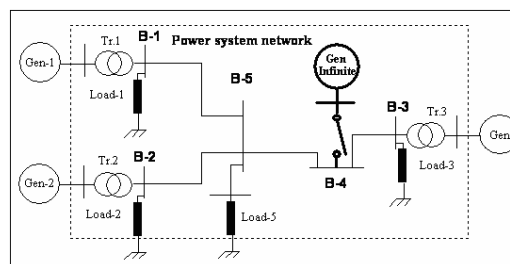


شکل ۱۴: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_3)$  با مدل MMPSW و MMPS

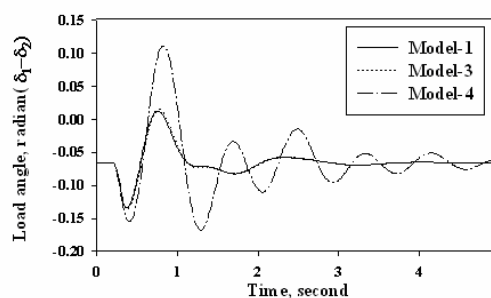
## طراحی پایدار ساز قدرت در شبکه‌های چند ماشینه

طراحی پایدارسازهای قدرت سنتی (CPSSs) بر اساس مدل خطی سیستم‌های قدرت در نقاط مشخص کاری ثابت صورت می‌گیرد تا بتواند نوسانات فرکانسی کم را در خطوط انتقال حذف نماید. مطالعات در خصوص طراحی PSS جهت افزایش و کیفیت بهره‌برداری سیستم‌های قدرت بطور پیوسته ادامه دارد. انواع مختلف PSS نظیر PSS های مبتنی بر کنترل تطبیقی طراحی شده است [۲-۵]. این کنترل کننده‌ها بدلیل محاسبه پارامترهای کنترل کننده و همزمان با شرایط کاری ژنراتورها قادر خواهند بود تا عملکرد مناسبی را ارائه دهند. اشکال این کنترل کننده‌ها حجم زیاد محاسبات و پردازش آن‌ها در زمان کوتاه می‌باشد. در تحقیقات جدید روی PSS ها که هنوز ادامه دارد از کنترل کننده‌های فازی (FLC) و شبکه‌های عصبی مصنوعی (ANNs) استفاده شده است [۶-۹]. مزیت این PSS نسبت به نسل قبلی، سرعت بالای عملکرد آنها می‌باشد و عملاً حجم پردازش اطلاعات بطور چشم‌گیری کاهش نموده است. آنچه که در طراحی این PSS ها مهم است مدل کردن دقیق شبکه

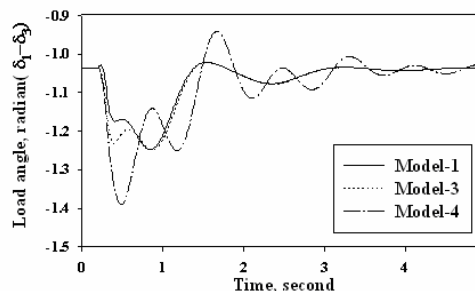
می‌دهند که مدل ۳ از نظر دقت به مدل ۱ نزدیک می‌باشد و مدل ۴ دقت مناسبی را ارائه نمی‌دهد.



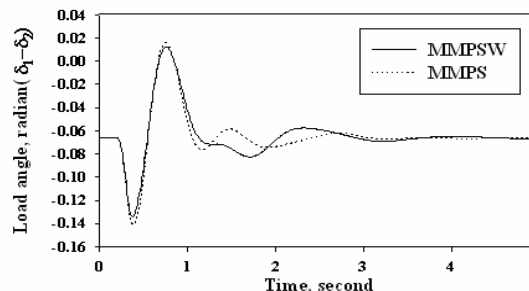
شکل ۱۰: سیستم قدرت با سه ژنراتور.



شکل ۱۱: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_2)$  برای Model-1 و Model-3 و Model-4.



شکل ۱۲: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_3)$  برای Model-1 و Model-3 و Model-4.



شکل ۱۳: مقایسه نتایج برای زاویه بار  $(\delta_1 - \delta_2)$  با مدل MMPSW و MMPS.

مقایسه نتایج حاصل فوق با حالتی که شین بینهایت حذف می‌شود را می‌توان برای مدل ۱ ژنراتور در شکل‌های

پارامترها بر اساس GA برای یک سری از ورودی های خاص بدست می آیند. این ورودی ها و خروجی های متناظر آنها در پروسه آموزش ANN شرکت نموده و شبکه توسط آنها آموزش داده می شود. شبکه آموزش دیده قادر خواهد بود تا به ازای هر ورودی متفاوت از آنچه که در پروسه آموزش وجود داشته بهترین پارامترهای خروجی را ارائه نماید. نتایج نشان می دهد که ANN-PSS در MMPS عملکرد مناسبی را نشان می دهد. ANN استفاده شده در این مقاله شامل دو ورودی، سه خروجی و ۱۰ نرون در لایه مخفی با تابع سیگموئید در لایه مخفی و تابع خطی در آخرین لایه می باشد.

### استفاده از GA در طراحی PSS

از GA جهت بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PID [۱۰-۱۳] استفاده شده است. پارامترهای کنترل کننده با توجه به شبکه شکل (۱۰) در شرایط کاری مختلف بدست آمده است. GA استفاده شده از نوع جدید الگوریتم ژنتیک ساده می باشد (NSGA) که به تفصیل در مرجع [۱۳] آورده شده است. خصوصیت NSGA نسبت به الگوریتم ژنتیک ساده (SGA) گیر نکردن در نقاط بهینه محلی و پیدا کردن پارامترهای بهینه می باشد.

### پایدار ساز قدرت سنتی (CPSS)

در این مطالعه CPSS استفاده شده داری تابع تبدیل زیر می باشد:

$$V(s) = -\frac{KQ}{KA} \cdot \frac{TQ^s}{1+TQ^s} \cdot \frac{1+T1^s}{1+T2^s}$$

که در ژنراتور سوم استفاده شده است. پارامترهای این پایدار ساز عبارتند از:

$$KA = 200, TA = 0.01, KQ = 3.0, TQ = 1.5,$$

$$T1 = 0.30, T2 = 0.06$$

### شبیه سازی و تست

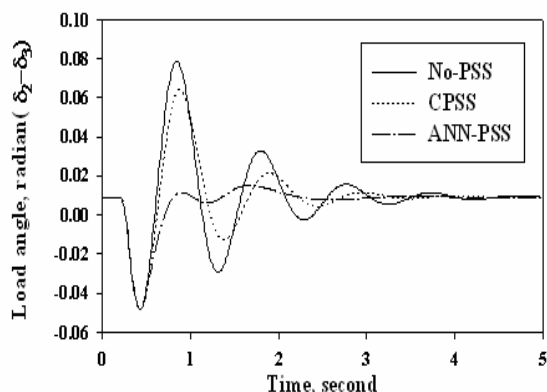
در شبیه سازی MMPS از مدل ۳ ژنراتور استفاده شده است و ANN-PSS به گونه ای طراحی شده است تا پاسخ مناسبی را در شرایط اتصال کوتاه سه فاز و شرایط نرمال بدهد. اتصال کوتاه سه فاز به MMPS با سه ژنراتور ارائه شده در شکل (۱۰) در حالت بدون اتصال به شبکه بینهایت به شین B-4 در لحظه 0.2 s بمدت 0.1 s برای

مورد مطالعه می باشد. زیرا پارامترهای این کنترل کننده ها تحت تاثیر مدل شبکه و ژنراتور خواهد بود [۱۳]. از آنجائیکه شکل شبکه با گسترده تر شدن آن بعلت افزایش تقاضای بیشتر مصرف انرژی بصورت پریودیک در حال تغییر است لزوم دارد تا پارامترهای این کنترل کننده ها با ایجاد تغییرات حادث شده به شبکه تنظیم شوند. خوشبختانه تغییرات در شبکه آنقدر کند صورت می گیرد که هیچ نگرانی را در خصوص تنظیم پارامترهای PSS ایجاد نمی کند. آنچه که امروزه در طراحی PSS های مبتنی بر FLC و ANN باید مورد توجه قرار گیرد، استفاده از مدل سازی های دقیق از شبکه و طراحی PSS در داخل شبکه مورد نظر می باشد. بدست آوردن پارامترهای بهینه مشکل اصلی این کنترل کننده ها می باشد، که خوشبختانه با کاربردی تر شدن الگوریتم ژنتیک (GA) طراحی این کنترل کننده ها مناسب تر انجام می گیرد. در این مقاله بدلیل تغییر ساختار جدید PSS ها که شدیداً وابسته به شبکه های قدرت و مدل ژنراتور می باشد، تلاش شده است تا الگوریتم مناسب طراحی PSS های جدید که مبتنی بر ANN و بهینه سازی پارامترهای آنها بر اساس GA صورت می گیرد معرفی گردد.

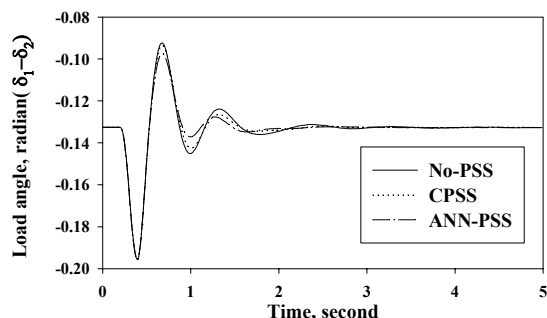
### طراحی PSS در شبکه های چند ماشینه بر اساس ANN

در این طراحی شبکه سه ماشینه شکل (۱۰) بدون اتصال به شین بینهایت یعنی MMPS مورد استفاده قرار گرفته است.

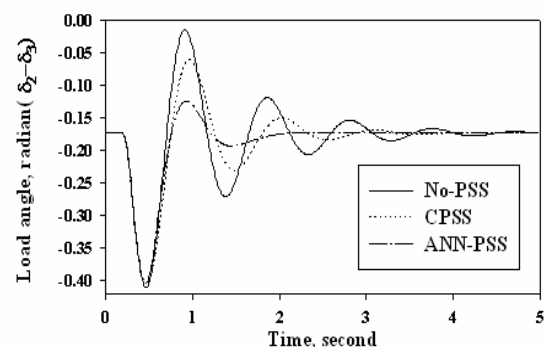
پارامترهای خطوط انتقال این شبکه طوری انتخاب شده اند تا دو ناحیه دور از هم را مدل نماید. ناحیه اول شامل ژنراتور های ۱ و ۲ و ناحیه دوم شامل ژنراتور ۳ می باشد. بنابراین این مدل قادر خواهد بود اثرات نوسانات داخلی درون ناحیه ای و نوسانات بین نواحی را مدل نماید. در این مطالعه ناحیه دوم یا ژنراتور سوم ابتدا با یک CPSS مجهز می شود و سپس با یک ANN-PSS مجهز می شود تا برتری این نوع از PSS را در شرایط کاری مختلف نمایش دهد. شبکه عصبی استفاده شده در این PSS از نوع شبکه تغذیه رو به جلو<sup>۱</sup> با آموزش انتشار به عقب<sup>۲</sup> می باشد. ورودی های ANN عبارتند از توان اکتیو و توان راکتیو و خروجی های آن عبارتند از پارامترهای کنترل کننده که از نوع کنترل کننده PID می باشند، یعنی  $K_p, K_i, K_d$ . این



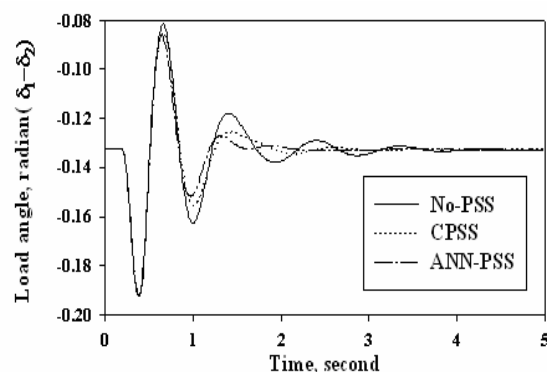
شکل ۱۵: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=0$  و  $q=4$  در حالت بین ناحیه.



شکل ۱۶: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=0$  و  $q=4$  در حالت داخل ناحیه.



شکل ۱۷: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=0$  و  $q=6$  در حالت بین ناحیه.



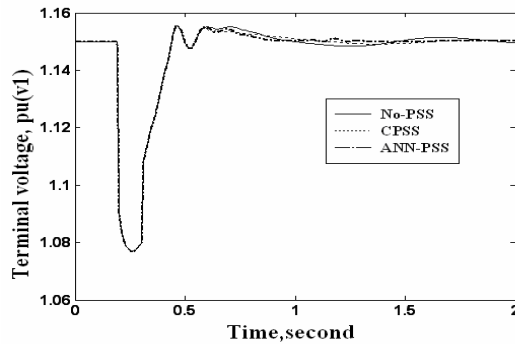
شکل ۱۸: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=0$  و  $q=6$  در حالت داخل ناحیه.

شرایط کاری متفاوت اعمال شده است. فرض بر این است که توان اکتیو از 0 تا 1 پریونیت و توان راکتیو از 0.2 تا 0.2 بتواند تغییر نماید. پارامترهای کنترل کننده باید به گونه ای تنظیم شوند تا مجموع مربع خطاها (ISE) برای تغییر زاویه بار و ولتاژ ترمینال ژنراتوری که به PSS مجهز شده است، کمترین مقدار شود. با در نظر گرفتن LISE-LA برای کمترین مقدار مجموع مربعات خطای زاویه بار و LISE-V برای کمترین مقدار مجموع مربعات خطای ولتاژ ترمینال ژنراتور و در نظر گرفتن  $W_2, W_1$  بترتیب وزن های لازم برای LISE-LA و LISE-V مقدار کل مجموع خطای حداقل برای هر زوج P,Q از توان اکتیو و راکتیو بصورت زیر بدست می آید:

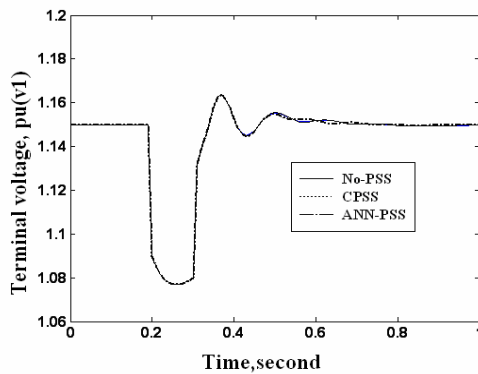
$$LISE = W_1 * (LISE-LA) + W_2 * (LISE-V)$$

یکی از روش های سنتی جهت بدست آوردن ضرایب مناسب کنترل کننده PID که می تواند جواب قابل قبول را نیز ارائه دهد، تغییر ضرایب کنترل کننده در بازه تعریف شده جهت بدست آوردن LISE می باشد. لذا اگر تعداد تغییرات هر ضریب کنترل کننده را ۱۰۰ در نظر بگیریم نیاز به ۱۰۰۰۰۰۰ تست خواهیم داشت تا بتوانیم بهترین ضرایب را برای KP-KI-KD بدست آوریم. از روش GA با یک جمعیت اولیه حداکثر ۴۰ و تعداد نسل ۳۰ می توانیم به ضرایب مناسب دست یابیم. یعنی از روش GA فقط نیاز به ۱۲۰۰ بار تست جهت رسیدن به پاسخ مطلوب خواهیم داشت و اگر سرعت برنامه را نیز نصف حالت قبل در نظر بگیریم عملاً سرعت بدست آوردن ضرایب مطلوب از طریق GA می تواند حداقل ۴۱۶ برابر روش سنتی باشد. برای طراحی PSS که بتواند به ازای هر بارگیری مورد انتظار در بازه تعریف شده ژنراتور پاسخ مطلوب را بدهد، نیاز هست تا به ازای تغییرات خاص P و Q ضرایب مطلوب کنترل کننده را از روش GA بدست آوریم. سپس از طریق آموزش شبکه با توجه به ازای هر بارگیری خاص و استخراج ضرایب کنترل کننده، شبکه عصبی توانائی پاسخ به هر بار اتفاقی را جهت ارائه بهترین ضرایب کنترل کننده خواهد داشت. شکل های (۱۵-۲۴) مقایسه نتایج را برای ژنراتور مجهز به ANN-PSS و بدون PSS را نشان می دهند. این نتایج نشان می دهد که ANN-PSS قادر است نوسانات بوجود آمده زاویه بار را در داخل ناحیه و بین نواحی کاهش دهد بدون آنکه تاثیر مخربی بر نوسانات ولتاژ وارد نماید.





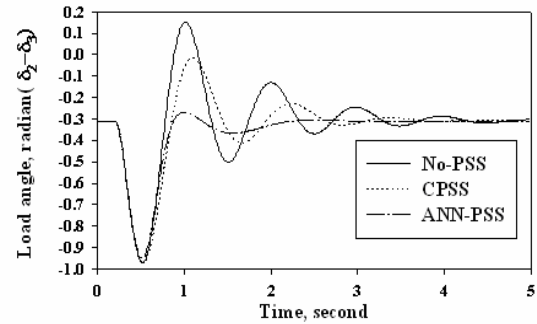
شکل ۲۳: پاسخ ولتاژ ترمینال باس-۱ به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=1$  و  $q=0$ .



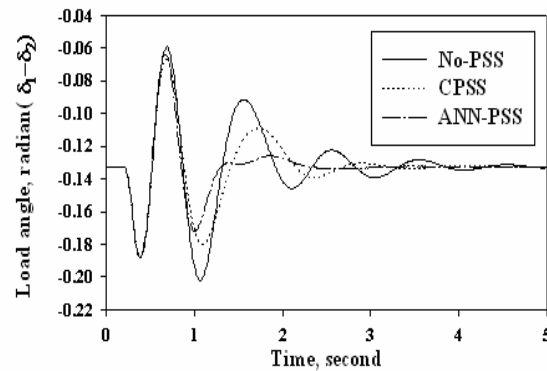
شکل ۲۴: پاسخ ولتاژ ترمینال باس-۱ به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=0.4$  و  $q=0$ .

### نتیجه گیری

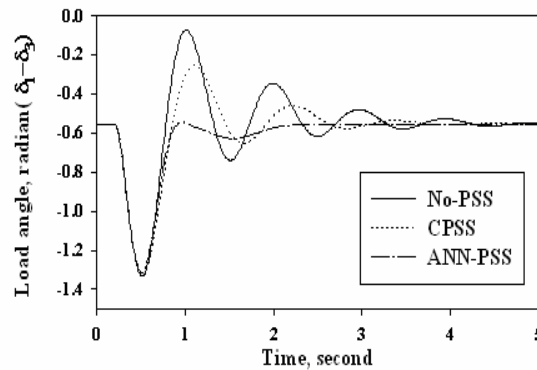
چند مدل ژنراتور که بطور وسیع در مطالعه دینامیک سیستمهای قدرت مورد استفاده قرار می گیرند، شبیه سازی و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه شدند. مدل ارائه شده برای ژنراتور مدل دقیق معرفی شد. از نتایج بدست آمده کاملاً روشن شد که مدل ۳ نتایج مشابهی نسبت به مدل ۱ دارد. در این مقاله مدل ۳ جهت طراحی PSS به دلیل دقت خوب و کم بودن زمان اجرای برنامه انتخاب گردید. دو شبکه چند ماشینه مشابه هم، یکی متصل به شین بینهایت و دیگری بدون اتصال به شبکه بینهایت شبیه سازی شدند. نتایج این دو شبکه با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج بدست آمده اثر قابل ملاحظه شین بینهایت را نشان می دهد. این نتایج نشان می دهد که عملکرد طراحی پایدارسازها تحت تاثیر شدید مدل ژنراتور و شبکه می باشد. با درک این تاثیر پذیری، پایدارساز طراحی شده در یک شبکه بدون اتصال به شین بینهایت طراحی شد. PSS طراحی شده با کنترل کننده PID و شبکه های عصبی ANN طراحی شد، که به نام ANN-



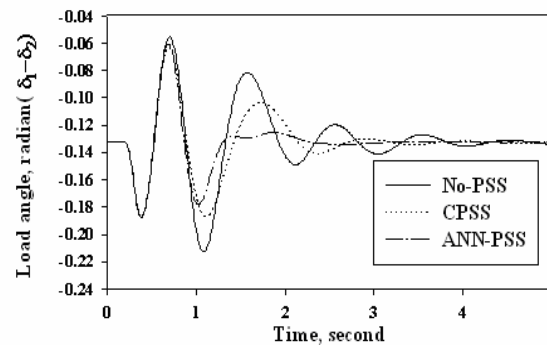
شکل ۱۹: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=1$  و  $q=0.2$  در حالت بین ناحیه.



شکل ۲۰: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=1$  و  $q=0.2$  در حالت داخل ناحیه.



شکل ۲۱: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=1$  و  $q=0$  در حالت بین ناحیه.



شکل ۲۲: پاسخ زاویه بار به اتصال کوتاه سه فاز برای  $p=1$  و  $q=0$  در حالت داخل ناحیه.

تطبیقی در سادگی و سرعت عمل آنها می باشد. عیب آنها تنظیم پارامترهای ANN مطابق با شکل شبکه قدرت می باشد و بدلیل اینکه این تغییرات از قبل معلوم است و در پروسه های زمانی از قبل تعیین شده صورت می گیرند، لذا فرصت کافی برای تنظیم پارامترها همیشه وجود خواهد داشت.

PSS معرفی شد. پارامترهای این کنترل کننده بر اساس NSGA بدست آمده اند. نتایج گرفته شده در تست اتصال کوتاه سه فاز در شرایط کاری متفاوت با ANN-PSS و CPSS نشان می دهد که ANN-PSS طراحی شده قادر است نوسانات ایجاد شده را در داخل ناحیه و بین نواحی کاهش دهد. بدون آنکه تاثیر مخربی بر نوسانات ولتاژ داشته باشد. مزیت این PSS ها نسبت به PSS های

## مراجع

- 1 - Adkins, B. and Harley, R. G. (1975). *The general theory of alternating current machines*. First published, Chapman and Hall Ltd.
- 2 - Chandra, A., Malik, O. P. and Hope, G. S. (1988). "A self-tuning controller for the control of multimachine power systems." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 3, No. 3, PP. 1065-1071.
- 3 - Cheng, Shi-jie, Chow, Y. S., Malik, O. P. and Hope, G. S. (1986). "An adaptive synchronous stabilizer." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. PWRS-1, No. 3, PP. 101-107.
- 4 - Cheng, Shi-jie, Malik, O. P. and Hope, G. S. (1986). "Self-tuning stabiliser for a multimachine power system." *IEE Proceedings*, Vol. 133, Pt. C, No. 4, PP. 176-185.
- 5 - Ghosh, A., Ledwich, G., Malik, O. P. and Hope, G. S. (1984). "Power system stabiliser based on adaptive control techniques." *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. PAS-103, No. 8, PP. 1983-1989.
- 6 - Hsu, Y.Y. and Chen, C. R. (1991). "Tuning of power system stabilisers using an artificial neural network." *IEEE Transaction on Energy Conversion*, PP. 612-619.
- 7 - Zhang, Y., Malik, O. P., Hope, G. S. and Chen, G. P. (1994). "Application of an inverse input/output mapped ANN as a power system stabilizer." *IEEE Transaction on Energy Conversion*, PP. 433-439.
- 8 - Zhang, Y., Malik, O. P., Hope, G. S. and Chen, G. P. (1993). "An artificial neural network based adaptive power system stabilizer." *IEEE Transaction on Energy Conversion*, PP. 71-77.
- 9 - Abdelazim, T. M. and Malik, O. P. (2003a). "Fuzzy logic based identifier and pole-shifting controller for PSS application." *Proceeding of the IEEE Power Engineering Society 2003 General Meeting*. July 13-17, Toronto, Canada.
- 10 - Davis, L. (1991). *Handbook of Genetic Algorithms*, Van Nostrand Reinhold, New York.
- 11 - Salami, M. and Cain, C. (1995). "Adaptive PID controller based on GA processor." *Proc. First IEE/IEEE International Conference on GAs in Engineering Systems*, PP. 88-93.
- 12 - Finch, J. W. and Besmi, M. R. (1995). "Genetic algorithms applied to a power system stabilizer." *First IEE/IEEE International Conference on GAs in Engineering Systems*, PP. 100-105.
- 13 - Besmi, M. R. (1996). *Generator power system modelling and stabiliser design using genetic and neural methods*. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne.

## واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- 1 - Feed forward
- 2 - Back propagation

## ضمیمه-الف

Bus (fig.10)	PG+jQG	PL+QL	Terminal voltage
1	0.5+j0.3	0.65+j0.05	0.7311 - j1.0045
2	0.5+j0.3	0.65+j0.05	0.7362 - j 0.9599
3	0.5+j0.3	0.65+j0.05	1.0319 - j 0.0287
4	0.0+j0.0	0.0+j0.0	1.0000 + j 0.0000
5	0.0+j0.0	0.2+j0.0	0.7396 - j0.8624

## B.3 Generators parameters (fig.2 &amp; 10)

Parameters	Gen-1	Gen-2	Gen-3	Gen-4
Ra	0.0043	0.0047	0.001	0.005
Rfd	0.0014	0.0016	0.0013	0.0015
Rkd	0.0242	0.0134	0.0215	0.0078
Rkq	0.0250	0.012	0.024	0.0084
Xad	1.52	1.62	1.65	1.86
Xaq	1.45	1.61	1.58	1.77
Xfd	1.6	1.79	1.745	1.97
Xd	1.67	1.78	1.79	2.0
Xq	1.6	1.77	1.715	1.91
Xkd	1.72	1.664	1.865	1.94
Xkq	1.507	1.662	1.7	1.96
H	2.155	5.433	2.93	3.25
D	0.025	0.025	0.025	0.025

## B.4 AVR and Governor parameters(fig.2 &amp; 10)

	Tv	Ts	Te	Ta	Ge	Ga	Gg
Gen-1	0.1	0.3	0.01	0.01	5.56	0.1	-0.0796
Gen-2	0.1	0.3	0.01	0.01	5.56	0.1	-0.0796
Gen-3	0.1	0.3	0.01	0.01	5.56	0.1	-0.0796
Gen-4	0.1	0.3	0.01	0.01	5.56	0.1	-0.0796

## Direct-axis flux voltages:

$$V_d = \frac{1}{\omega_o} \dot{\Psi}_d - R_a I_d - \frac{\omega}{\omega_o} \Psi_q \quad (A-1)$$

$$V_{fd} = \frac{1}{\omega_o} \dot{\Psi}_{fd} + R_{fd} I_{fd} \quad (A-2)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_o} \dot{\Psi}_{kd} + R_{kd} I_{kd} \quad (A-3)$$

## Quadrature-axis flux voltages:

$$V_q = \frac{1}{\omega_o} \dot{\Psi}_q - R_a I_q + \frac{\omega}{\omega_o} \Psi_d \quad (A-4)$$

$$0 = \frac{1}{\omega_o} \dot{\Psi}_{kq} + R_{kq} I_{kq} \quad (A-5)$$

## Mechanical equations:

$$M_e = \frac{\omega_o}{2} (\Psi_d I_q - \Psi_q I_d) \quad (A-6)$$

$$M_t = J \dot{\delta} + D \delta + M_e \quad (A-7)$$

## Turbine and governor system

$$\dot{A}_p = -\frac{1}{T_v} A_p + \frac{1}{T_v} (P_{ref} - G_g \delta) \quad (A-8)$$

$$\dot{M}_t = -\frac{1}{T_s} M_t + \frac{1}{T_s} A_p \quad (A-9)$$

## Exciter system

$$\dot{V}_f = \frac{G_a}{T_a} V_e - \frac{1}{T_a} V_f \quad (A-10)$$

$$\dot{V}_e = \frac{G_e}{T_e} (V_{ref} - V_{te rm}) - \frac{1}{T_e} V_e \quad (A-11)$$

## ضمیمه - ب

## B.1 Transmission line parameters in p.u.

Node Number(fig.2)	Impedance
1-2	0.04+j0.4
1-3	0.05+j0.5
1-5	0.05+j0.5
2-5	0.02+j0.3
3-4	0.06+j0.6
4-5	0.04+j0.4

Node Number (fig.2)	Impedance
1-5	0.09+j0.6
3-4	0.025+j0.15
4-5	0.225+j1.5
2-5	0.06+j0.4

## B.2 Operating conditions in p.u.

Bus (fig.2)	PG+jQG	PL+QL	Terminal voltage
1	0.8+j0.3	0.3+j0.05	1.0791 + j 0.2757
2	0.8+j0.3	0.3+j0.05	1.0626 + j 0.2019
3	0.8+j0.3	0.3+j0.05	1.1010 + j 0.4037
4	0.8+j0.2	0.3+j0.0	1.0669 + j 0.2763
5	0.0+j0.0	0.0+j0.0	1.0000 - j 0.0000