

طراحی پایدارساز سیستم قدرت به روش تطبیقی به منظور نامعینی ضریب دریافت و بهره کنترل

حسن فاتحی مرج^۱، مجید عمادآبادی^۲

^۱ استادیار گروه مهندسی برق، دانشگاه ولی عصر (عج) رفسنجان

^۲ دانشجوی کارشناسی ارشد رشته برق گرایش کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد سیرجان

چکیده

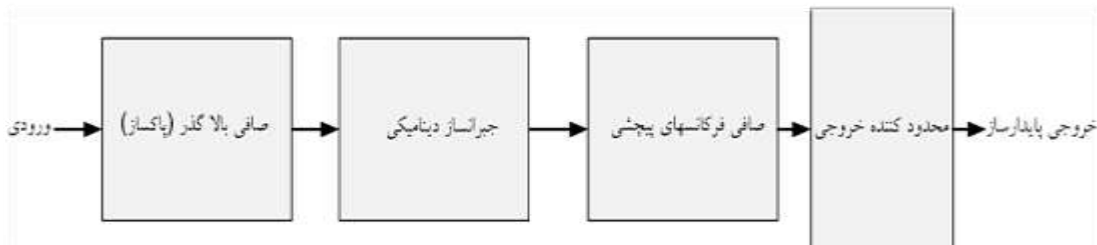
طراحی پایدارسازهای قدرت مرسوم براساس تئوری کنترل خطی و محاسبات مقادیر ویژه طراحی می شوند، که مشکلاتی از قبیل زمان بر بودن تنظیم و بهینه نبودن میرایی سیستم در نقطه کار را دارند. با استفاده از کنترل تطبیقی می توان PSS را طوری طراحی کرد که تحت اغتشاش‌های مختلف، نوسانات فرکانس پایین را کاهش داده و میرایی سیستم را به مقدار قابل توجهی افزایش دهد. در این مقاله از روش برمبنای لیاپانوف استفاده شده است که در آن پارامتر دریافت به صورت نامعین در نظر گرفته شده است و در انتها با تعریف یک تابع لیاپانوف همه منظوره، پایداری کنترل کننده برای این سیستم اثبات شده است. نتایج شبیه سازی بدست آمده، برای حالت های متناظر با وضعیت عادی کار، در حالت عدم قطعیت برای پارامتر دریافت و همچنین در حالت عدم قطعیت بهره کنترلی نشان از مناسب بودن قاعده کنترلی بدست آمده می باشد.

واژه‌های کلیدی: پایدار ساز قدرت، کنترل تطبیقی، تابع لیاپانوف.

بخش اول: مقدمه

افزایش روز افزون مصرف انرژی الکتریکی، توسعه سیستمهای قدرت را بدنبال داشته است، بطوری که امروزه سیستمهای قدرت در جغرافیایی به وسعت یک قاره گسترده شده اند. به موازات این توسعه که با مزایای متعددی همراه است، در شاخه دینامیک سیستمهای قدرت نیز مانند سایر شاخه ها مسائل جدیدی مطرح شده است. از جمله این مسائل می توان به پدیده نوسانات با فرکانس کم، تشدید زیر سنکرون و افت ولتاژ اشاره کرد. بروز اغتشاش های مختلف در شبکه، انحراف سیستم از نقطه تعادل پایدار را به دنبال دارد، در چنین وضعیتی به شرط اینکه سنکرونیزم شبکه از دست نرود، سیستم با نوسانات فرکانس کم به نقطه تعادل جدید نزدیک میشود. هنگامی که یک ژنراتور به تنهایی کار میکند، نوسانات با فرکانس کم به دلیل میرایی ذاتی به شکل نسبتاً قابل قبولی میرا می شوند. کاربرد برخی از المانها مانند تحریک کننده های سریع، با اثر دینامیک قسمتهای مختلف شبکه ممکن است باعث تزریق میرایی منفی به شبکه شود، به طوریکه نوسانات فرکانس کم شبکه به شکل مطلوبی میرا نشده و یا حتی از میرایی منفی برخوردار شوند. بدیهی است افزایش میرایی مودهای الکترومکانیکی سیستم در چنین وضعیتی میتواند به عنوان یک راه حل مورد استفاده قرار گیرد. بر این اساس پایدارکننده های سیستم قدرت (PSS) بر اساس مدل تک ماشین - شین بینهایت طراحی شده و در محدوده وسیعی به کار گرفته میشوند. از دید تئوری کنترل، پایدار کننده های فوق در واقع یک کنترل کننده کلاسیک با تقدم فاز می باشد که بر اساس مدل خطی سیستم در یک نقطه کار مشخص طراحی می شوند.

اساساً از PSS برای میرا کردن آن دسته از مودهای محلی استفاده می شود که در اثر استفاده از سیستم تحریک با بهره بالا و پاسخ سریع، در شرایط بارگذاری سنگین و خطوط انتقال طولانی شبکه، نامیرا می شوند. اگر تنظیم PSS به درستی صورت نگیرد ممکن است بر روی نوسانهای بین ناحیه ها تاثیر منفی گذاشته و باعث نامیرایی گرد (گراهام روتیز^۲، ۲۰۰۰). ایده اصلی PSS این است که PSS بتواند گشتاور الکتریکی متناسب با تغییرات سرعت در ژنراتور تولید کند. برای این منظور لازم است که بلوک جبران کننده فاز، مشخصه پیش فازی مناسب را برای جبران تاخیر فاز بین ورودی تحریک کننده و گشتاور الکتریکی ژنراتور ایجاد کند. در شکل زیر نمایی از PSS کلاسیک نمایش داده شده است.

**شکل ۱- بلوک دیاگرام PSS کلاسیک**

در کنترل کلاسیک طراحی بر اساس مدل مشخصی از سیستم صورت میگیرد. مدل سیستم تنها یک تقریب از دینامیک های واقعی سیستم است. حذف دینامیک های سریع به منظور ساده سازی، تغییر مقادیر پارامترهای مدل به دلایل مختلف از منابع ایجاد عدم قطعیت در مدل سیستم ها میباشد. بنابراین بدلیل وجود چنین عدم قطعیت هایی در مدل سازی، اهداف مورد نظر طراح ممکن است توسط کنترل کننده های طرح شده بر اساس مدل تحقق نیابند. به منظور رفع این مشکل در کنترل مقاوم سعی بر اینست که عدم قطعیت های حائز اهمیت موجود در مدل، در طراحی کنترل کننده لحاظ شوند. معمولاً مدل سازی عدم قطعیت در اکثر شاخه های کنترل مقاوم خانواده های از سیستم ها را بوجود می آورد، حال کنترل کننده مقاوم بایستی چنان طرح شود که برای هر یک از اعضاء این خانواده اهداف مورد نظر در طراحی برآورده شود. موضوع این مقاله طراحی پایدارکننده

1- Power system stabilizer

2 Graham Rogers

های تطبیقی و مقاوم برای سیستم های قدرت است، به قسمی که پایداری سیستم در محدوده وسیعی از تغییر پارامترها و تغییر شرایط نقطه کار تضمین شود.

بخش دوم: مراحل طراحی PSS

۲.۱. محاسبه فرکانس مود الکترومکانیکی

در معادله مشخصه مکانیکی با صرفنظر از میرائی طبیعی و با حل بقیه معادله، فرکانس طبیعی غیر میرا بدست می آید.

۲.۲. طراحی جبران کننده فاز

یک فرم متعارف برای جبران کننده فاز عبارتست از:

$$G_c(s) = \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right)^K \quad K=1 \text{ or } 2 \quad T_1 > T_2$$

که در آن K تعداد بلوک های مرتبه اول بوده و برای جبران زوایای بزرگ از دو بلوک استفاده میشود. برای T_2 معمولاً یک مقدار مشخص انتخاب میگردد. تنها پارامتر باقیمانده مدار جبران کننده T_1 است که به کمک تساوی زیر تعیین میشود:

$$\angle G_E(s) \Big|_{s=j\omega_n} + \angle G_c(s) \Big|_{s=j\omega_n} = 0$$

۳.۲. طراحی بهره

اگر بهره PSS را KC بنامیم این مقدار برابر است با:

$$D_E = K_2 K_C |G_C(s)| |G_E(s)|_{s=j\omega_n}$$

از طرفی با صرف نظر از D و با توجه به فرم استاندارد معادله مشخصه داریم:

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2 = 0$$

$$D_E = 2\xi\omega_n M$$

از حذف D_E بین معادلات (۴) و (۲) مقدار بهره PSS بر حسب ضریب میرایی بدست می آورید:

$$K_C = 2\xi\omega_n M / (K_2 |G_2(j\omega_n)| |G_E(j\omega_n)|) \quad (۶)$$

۴.۲. طراحی بلوک ریست

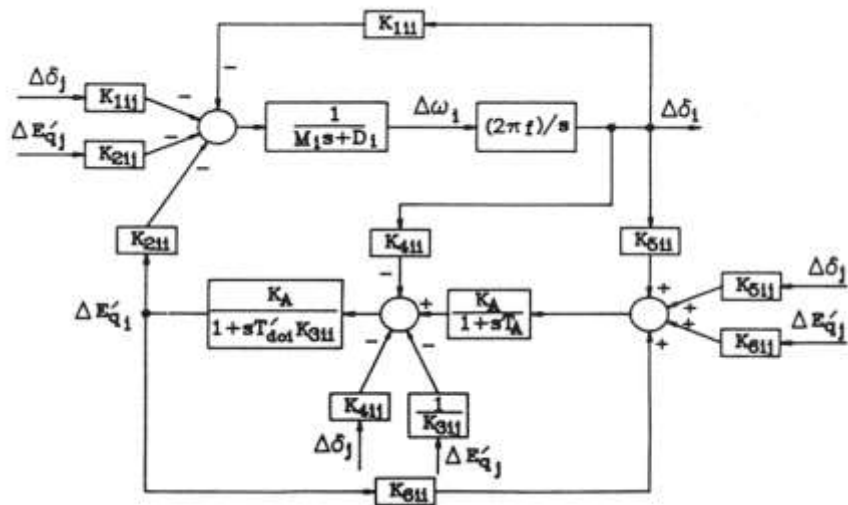
تحریک اضافی ایجاد شده توسط PSS بایستی به هنگام بروز پدیده نوسانات با فرکانس کم فعال شده و پس از میرا شدن نوسانات به طور خودکار قطع شود. به عبارت دیگر PSS از نوع کنترل کننده های اضافی سیستم قدرت بوده و بر عملکرد حالت دائمی بی تأثیر است. با طرح یک تابع انتقال مرتبه اول این امر تحقق می یابد.

$$G_{reset}(s) = \frac{sT}{1+sT} \quad (۷)$$

پارامترهای T چنان طراحی می شود که اندازه تابع انتقال در فرکانس طبیعی غیر میرا (ω_n) نزدیک به واحد باشد.

بخش سوم: رویکرد کنترلی برای سیستم چندماشینه

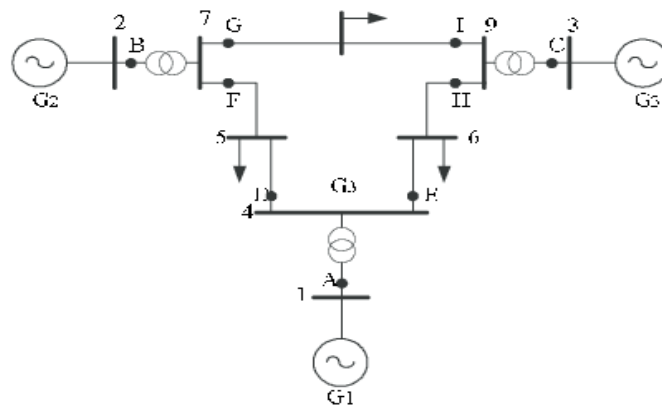
با تعمیم مطالب بخش پیشین به حالت چند ماشینه، ضرایب K1 تا K6 به ماتریس هایی با همین نام تبدیل می شوند. محاسبه آنها پس از آنالیز پخش بار شبکه، به صورت مشابه با محاسبات سیستم تک ماشینه انجام می شود. در سیستم چند ماشینه مشابه حالت تک ماشینه؛ بلوک دیاگرام زیر را می توان برای ماشین i ام در نظر گرفت.



شکل ۲- بلوک دیاگرام ماشین سنکرون در یک سیستم قدرت چند ماشینه (بوریس^۱، ۲۰۰۹)

۱-۳ سیستم چندماشینه در حضور پایدارساز

در این بخش سیستم چندماشینه متعلق به یک شبکه استاندارد IEEE در حضور پایدارساز مورد بررسی قرار می گیرد، شماتیک ارتباطی این سیستم به صورت شکل زیر می باشد که در آن سه ماشین با پایدارسازهای مرتبط در یک باس بصورت مشترک قرار گرفته اند، آنچه که در بحث مربوط به پایداری سیستم های چندماشینه در بررسی سیستم کنترل غیرخطی حائز اهمیت است، توانایی پایدارساز در تامین پایداری سیستم با مدل نامعین و پارامترهای مختلف سیستم می باشد، چرا که مشخصات ماشین های مختلف در حالت کلی یکسان نبوده و این باعث می شود تا مدل ماشین ها نیز متفاوت باشند، بنابراین کنترلر مشترک شده بین این سه ماشین می باید در مقابل نامعینی های پارامتری سیستم مقاوم باشد.



شکل ۳- شماتیک ارتباطی سیستم سه ماشینه

۳-۲ طراحی PSS در سیستم چند ماشینه

طراحی PSS کلاسیک بر اساس سیستم تک ماشین - شین بینهایت انجام میشود. بنابراین جهت طراحی PSS برای یک

¹ Boris

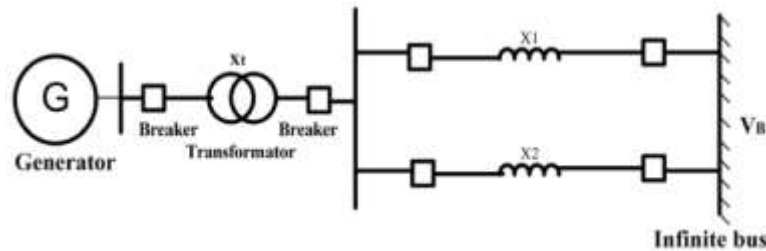
ماشین خاص نخست بایستی سیستم معادل تک ماشین شین بینهایت را برای آن ماشین بدست آورد. این امر بسادگی با قرار دادن راکتانس X_d به جای همه ماشین‌ها بجز ماشین مورد بحث میسر است. پس از بدست آوردن این سیستم معادل، مشابه بخش قبل برای ژنراتور سنکرون پایدار کننده مناسبی طراحی می‌شود.

بخش چهارم: کنترل تطبیقی بازگشت به عقب

روش بازگشت به عقب، روش بازگشتی است که با انتخاب قانون کنترل مناسب برای یک سیستم اسکالر (معادله یکی از مدهای سیستم) که مشتق تابع لیاپانوف را منفی کند آن مد را پایدار نموده و این کار برای پایدارسازی مدهای دیگر سیستم تکرار میشود تا در نهایت سیگنال ورودی طوری انتخاب میشود که کل سیستم پایدار شود. روش بازگشت به عقب در غیاب نامعینی، همانند روش خطی‌سازی فیدبک، سیستم غیرخطی را مجبور به داشتن رفتاری مشابه رفتار یک سیستم خطی میکند؛ اما در این روش به علت وجود انتخابهای زیاد برای قانون کنترل، برخلاف خطی‌سازی فیدبک میتوان المانهای غیرخطی مفید برای پایدارسازی و ردیابی را حذف نکرد و همچنین دامنه سیگنال کنترلی را محدودتر نگاه داشت. همچنین این روش محدودیت کمتری نسبت به خطی‌سازی فیدبک داشته و میتوان در بعضی شرایط مانند عدم موفقیت روش خطی، از آن استفاده نمود.

ایده اصلی در روش گام به عقب این است که به حالت‌های مشخصی اجازه میدهد به عنوان کنترل‌های مجازی بقیه عمل کنند. روش گام به عقب، روشی سیستماتیک در طراحی کنترل غیرخطی است که قابلیت اعمال در طیف وسیعی از سیستمها را دارد. در ابتدا فقط یک زیرسیستم کوچک در نظر گرفته میشود که برای آن یک قانون کنترل مجازی ساخته میشود. سپس طراحی در چندین گام گسترش مییابد تا یک قانون کنترل برای کل سیستم ساخته شود.

در دهه گذشته، روش گام به عقب به عنوان یک روش قدرتمند در کنترل سیستم‌های غیرخطی استفاده شده است. این روش بر اساس روش‌های طراحی منظم و بازگشتی مبتنی بر کنترل فیدبک غیرخطی است. در شرایطی که مدل سیستم، شامل پارامترهای نامعین با دامنه تغییرات وسیع باشد، استفاده از گام به عقب تطبیقی بسیار مناسب است (سلوتین^۱، ۱۹۹۵). شکل (۳)، یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت رانشان می‌دهد که از آن به عنوان سیستم مورد مطالعه استفاده شده است. این مدل شامل یک ژنراتور سنکرون است که با استفاده از دو خط انتقال به شبکه قدرت خیلی بزرگ که با شین بی‌نهایت متصل شده است.



شکل ۴- سیستم تک ماشینه متصل به شین بی‌نهایت

مدل نهایی بدست آمده (گراهام رویترز، ۲۰۰۰). برای سیستم عبارتست از:

$$\dot{x}_1 = \alpha_1 x_2 \quad (۸)$$

$$\dot{x}_2 = -\theta x_2 - \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0) - \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) + \alpha_7 - \alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) x_3 \quad (۹)$$

$$\dot{x}_3 = -\alpha_5 x_3 - \alpha_5 E'_{q0} + \alpha_6 \cos(x_1 + \delta_0) + a u_{f0}$$

پارامترهای مدل فوق عبارتند از:

^۱ Slotine

$$\alpha_1 = \omega_0, \alpha_2 = \theta = \frac{D}{M}, \alpha_3 = \frac{V_B}{M(X'_d + X_e)}, \alpha_4 = \frac{V_B}{2M} \left(\frac{1}{X'_q + X_e} - \frac{1}{X'_d + X_e} \right)$$

$$a = \frac{K_E}{T'_{d0}}, \alpha_7 = \frac{P_m}{M}, \alpha_6 = \frac{V_B}{T'_{d0}} \left(\frac{X_d - X'_d}{X_d - X_e} \right), \alpha_5 = \frac{1}{T'_{d0}} \left(1 + \frac{X_d - X'_d}{X_d - X_e} \right)$$

که در آن ω_0 سرعت زاویه‌ای سنکرون، D ضریب میرایی، M ثابت اینرسی، V_B ولتاژ شین بی نهایت، X'_d راکتانس گذرای غیراشباع محور d ، X_e راکتانس معادل ترانسفورماتور و خطوط انتقال، X'_q راکتانس گذرای غیراشباع محور q ، T'_{d0} ثابت زمانی گذرای مدار باز محور d ، X_d راکتانس سنکرون غیراشباع محور d ، P_m توان مکانیکی ورودی به ژنراتور، K_E بهره تقویت کننده، می‌باشند.

۱-۴- مراحل طراحی کنترل کننده

گام اول:

متغیر $e_1 = x_1$ را انتخاب میکنیم:

$$\dot{e}_1 = \dot{x}_1 = \alpha_1 x_2 \quad (10)$$

حال x_2 را به عنوان متغیر کنترل مجازی برای سیستم در نظر می‌گیریم.

$$e_2 = x_2 - x_2^* \quad (11)$$

گام دوم:

$$\dot{e}_2 = \dot{x}_2 - \dot{x}_2^* \xrightarrow{\dot{x}_2^*=0} \dot{e}_2 = \dot{x}_2$$

$$\dot{e}_2 = -\theta x_2 - \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0) - \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) + \alpha_7 - \alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) x_3 \quad (12)$$

برای معادله (۱۲)، x_3 را به عنوان متغیر کنترل مجازی انتخاب میکنیم، متغیر خطای e_3 به صورت زیر انتخاب میکنیم:

$$e_3 = x_3 - x_3^* \quad (13)$$

در نتیجه میتوان مقادیر معلوم را با استفاده از متغیر کنترل مجازی حذف نمود و ترم نامعلوم θ را نیز با استفاده از مقدار تخمین $\hat{\theta} = \theta - \tilde{\theta}$ از این متغیر به مقدار خطای تخمین تقلیل داد، مشخصا به این توابع بدست آمده در رویکرد بازگشت به عقب توابع پیچشی گفته می‌شود، در نتیجه طبق معادلات فوق داریم:

$$\dot{e}_2 = -\theta x_2 - \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0) - \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) + \alpha_7 - \alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) (e_3 + x_3^*) \quad (14)$$

حال به طراحی x_3^* به نحو زیر می‌پردازیم:

$$x_3^* = \frac{-1}{\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0)} \left\{ \hat{\theta} x_2 + \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0) + \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) - \alpha_7 \right\} \quad (15)$$

در نتیجه داریم:

$$\dot{e}_2 = -\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) e_3 - \tilde{\theta} x_2 \quad (16)$$

گام سوم:

در این مرحله سعی داریم تا قانون کنترل واقعی سیستم را بدست آوریم.

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= \dot{x}_3 - \dot{x}_3^* \\ &= -\alpha_5 x_3 - \alpha_5 E'_{q_0} + \alpha_6 \cos(x_1 + \delta_0) + a u - \dot{x}_3^* \quad (17) \end{aligned}$$

$$\dot{x}_3^* = \frac{\dot{x}_1 \alpha_3 \cos(x_1 + \delta_0)}{\alpha_3^2 \sin^2(x_1 + \delta_0)}$$

$$\begin{aligned} & \left\{ \hat{\theta} x_2 + \alpha_3 E'_{q_0} \sin(x_1 + \delta_0) + \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) - \alpha_7 \right\} \\ & - \frac{1}{\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0)} \\ & \left\{ \hat{\theta} x_2 + \hat{\theta} \dot{x}_2 + \alpha_3 \dot{x}_1 E'_{q_0} \cos(x_1 + \delta_0) + 2\alpha_4 \dot{x}_1 \cos 2(x_1 + \delta_0) \right\} \quad (18) \end{aligned}$$

در نتیجه داریم:

$$\begin{aligned} \dot{e}_3 &= -\alpha_5 x_3 - \alpha_5 E'_{q_0} + \alpha_6 \cos(x_1 + \delta_0) + a u - \frac{\alpha_1 x_2 \cos(x_1 + \delta_0)}{\alpha_3 \sin^2(x_1 + \delta_0)} \\ & \left\{ \hat{\theta} x_2 + \alpha_3 E'_{q_0} \sin(x_1 + \delta_0) + \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) - \alpha_7 \right\} \\ & + \frac{1}{\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0)} \\ & \left\{ \begin{aligned} & \hat{\theta} x_2 + \hat{\theta} (-\theta x_2 - \alpha_3 E'_{q_0} \sin(x_1 + \delta_0)) \\ & - \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) + \alpha_7 - \alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) x_3 \\ & + \alpha_1 \alpha_3 x_2 E'_{q_0} \cos(x_1 + \delta_0) + 2\alpha_1 \alpha_4 x_2 \cos 2(x_1 + \delta_0) \end{aligned} \right\} \quad (19) \end{aligned}$$

گام چهارم، طراحی u (قانون کنترلی)

در این مرحله ترم های ثابت حذف شده و نیز برای مقاوم بودن کنترل کننده بر اساس قانون پایداری هرویتز که بایستی تمامی

قطبها سمت چپ محور موهومی باشند، ترم $\frac{1}{a} ke$ اضافه شده است تا حاشیه پایداری مناسب حاصل گردد.

$$\begin{aligned}
 u = & \frac{1}{a} \left\{ \alpha_5 x_3 + \alpha_5 E'_{q0} - \alpha_6 \cos(x_1 + \delta_0) \right\} \\
 & + \frac{\alpha_1 x_2 \cos(x_1 + \delta_0)}{\alpha_3 \sin^2(x_1 + \delta_0)} \left\{ \hat{\theta} x_2 + \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0) + \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) - \alpha_7 \right\} \\
 & - \frac{1}{\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0)} \left\{ \begin{array}{l} \hat{\theta} x_2 \\ + \hat{\theta} (-\hat{\theta} x_2 - \alpha_3 E'_{q0} \sin(x_1 + \delta_0)) \\ - \alpha_4 \sin 2(x_1 + \delta_0) + \alpha_7 - \alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) x_3 \\ + \alpha_1 \alpha_3 x_2 E'_{q0} \cos(x_1 + \delta_0) + 2\alpha_1 \alpha_4 x_2 \cos(2(x_1 + \delta_0)) \end{array} \right\} \\
 & + \frac{1}{a} k e
 \end{aligned} \tag{۲۰}$$

که در آن $e = [e_1 \ e_2 \ e_3]$ و $k = [-k_1 \ -k_2 \ -k_3]$ ، k_1 ، k_2 و k_3 ثابت های مثبت میباشند با جایگذاری قانون بدست آمده در عبارت \dot{e}_3 حاصل خواهد شد:

$$\dot{e}_3 = -k_1 e_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3 - \hat{\theta} \tilde{\theta} x_2 \tag{۲۱}$$

که در نهایت به معادلات دینامیک حلقه بسته حاصل خواهد شد:

$$\dot{e}_1 = \alpha_1 e_2$$

$$\dot{e}_2 = -\alpha_3 \sin(x_1 + \delta_0) e_3 - \tilde{\theta} x_2$$

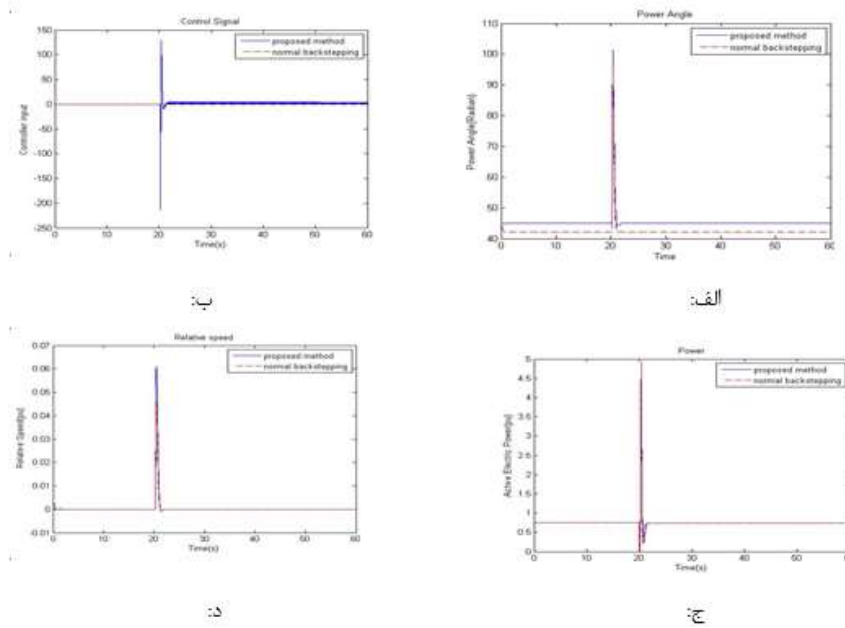
$$\dot{e}_3 = -k_1 e_1 - k_2 e_2 - k_3 e_3 - \hat{\theta} \tilde{\theta} x_2 \tag{۲۲}$$

مقادیر ویژه سیستم از رابطه $|SI - A| = 0$ بدست خواهد آمد بنابراین سیستم پایداری نسبی است اگر و تنها اگر $K_1 > 0$ ، $K_2 > 0$ ، $K_3 > 0$ باشند.

بخش پنجم: نتایج شبیه سازی

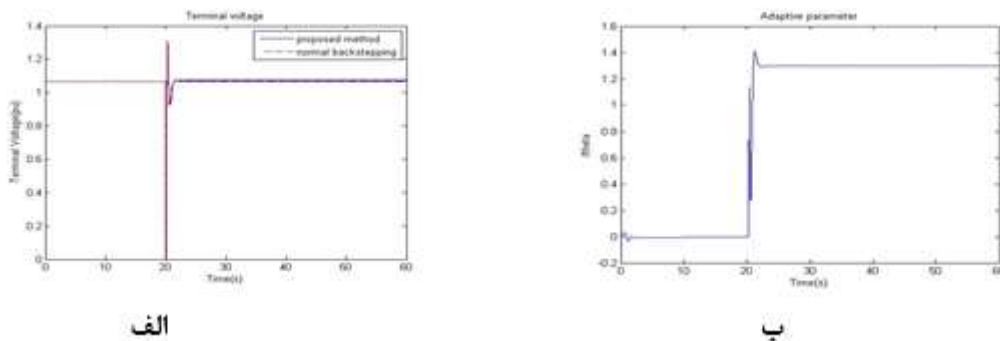
۵.۱ نتایج شبیه سازی بدون ضریب بهره کنترل

در این حالت پارامتری که مربوط به بخش تطبیق سیستم می باشد در مقدار واقعی (برابر صفر) برای سیستم بدون تطبیق در نظر گرفته شده است.



شکل ۵- الف: سیگنال خروجی کنترل کننده ب: زاویه روتوج: تغییرات سرعت د: تغییرات توان الکتریکی

در شکل (۵- الف) سیگنال کنترل در لحظه متناسب با ۲۰ ثانیه با اعمال خطا به سیستم تحریک شده و اقدام به پایدارسازی سیستم می‌نماید. در شکل (۵- ب) مشخصاً زاویه روتور مطلوب مقدار متناسب با ۴۵ درجه می‌باشد که با وقوع خطا تا اندازه ۱۰۰ درجه افزایش پیدا کرده و سیستم قدرت مورد نظر در آستانه ناپایداری قرار می‌گیرد. بلافاصله پس از ورود سیستم پایدارسازی، این زاویه کاهش پیدا کرده و در مدت محدود (در حد چند دهم ثانیه) در مقدار مطلوب ۴۵ درجه تثبیت می‌شود. شکل (۵- ج) سرعت روتور ماشین سنکرون به منظور سنکرون سازی با فرکانس شبکه قدرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد و در هنگام وقوع خطا تا مقدار ۰.۰۴ تا ۰.۰۶ پریونیت دچار تغییرات از نوع بالازدگی می‌شود. این مقدار بایستی سریعاً توسط پایدارسازی به مقدار صفر برگردانده شود تا فرکانس شبکه در مقدار مطلوب تثبیت گردد. در شکل (۵- د) نمایش توان الکتریکی متناسب با دو ماشین که با پایدارسازهای مربوطه کنترل شده اند، نشان داده شده است. مشخصاً با وقوع خطا در شبکه این توان به یک مقدار ماکزیمم رسیده و با اعمال پایدارساز به مقدار مطلوب در ۰.۸ پریونیت همگرا می‌شود



شکل ۶- الف) تغییرات ولتاژ ترمینال ب) تغییرات پارامتر تطبیقی

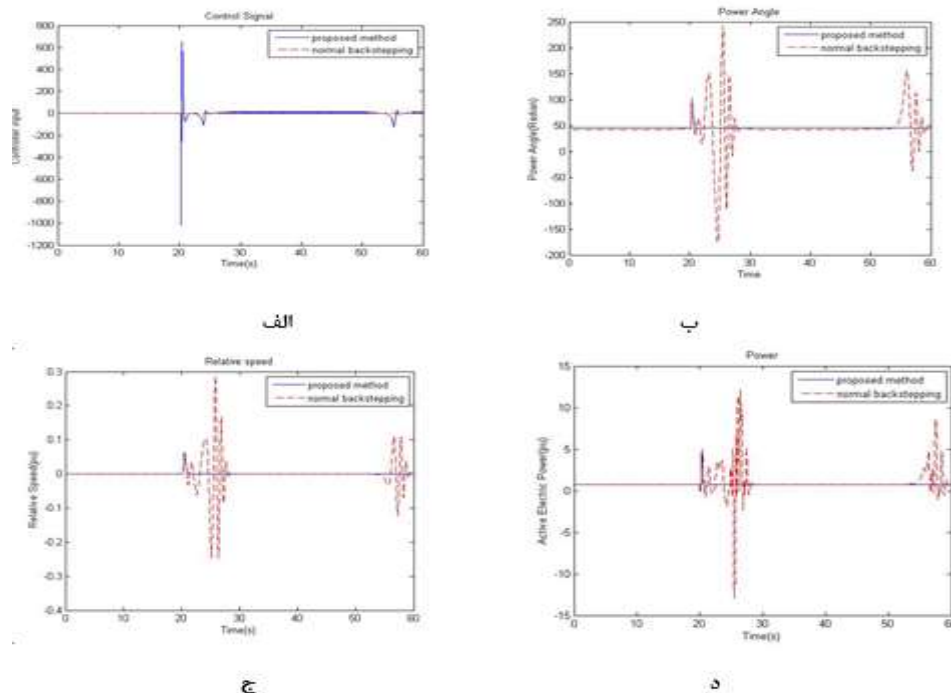
ولتاژ خط متغیری از شبکه می‌باشد که با وقوع خطای سه فاز با صفر شدن خود، بیشترین تغییرات را به خود می‌بیند. این مسئله در شکل ۶- الف نشان داده شده است. مشخصاً این ولتاژ با اعمال پایدارساز و برگشت سیستم در مقدار ۱.۱ پریونیت

تثبیت می شود.

در شکل ۶-ب این پارامتر به هنگام وقوع خطا در مقدار ۱.۳ تثبیت شده است که مشخصا در حالت عدم استفاده از سیستم کنترلی مورد نظر در همان مقدار صفر در پایدارساز مورد استفاده قرار می گرفت. با یک مقایسه کلی در این سناریو می توان بیان کرد، هنگامی که خطا در فاصله بین زمان های $t=20$ تا $t=20.18$ ثانیه اتفاق می افتد، ولتاژ ترمینال و توان اکتیو به صورت هم زمان صفر می شوند. در همین زمان، زاویه روتور و سرعت متناسب با آن شروع به افزایش می کنند. در این شرایط، ولتاژ تحریک برای افزایش ولتاژ ترمینال و توان اکتیو به حداکثر مقدار خود می رسد. وقتی که خطا رفع می شود سرعت روتور کاهش می یابد و توان اکتیو به حداکثر مقدار خود می رسد. در این شرایط برای جلوگیری از نوسان بازگشتی ۱ و کاهش دامنه نوسان اول، سیستم کنترلی یک ولتاژ منفی مناسب را به تحریک اعمال می کند. در نتیجه، توان الکتریکی و زاویه روتور کاهش می یابد. این امر باعث می شود که ولتاژ ترمینال کاهش یابد. پس از این مرحله سیستم کنترلی ولتاژ صفر را به تحریک اعمال می کند؛ بنابراین توان الکتریکی، ولتاژ ترمینال، زاویه روتور و سرعت محور همگی به مقدار حالت ماندگار قبل از خطا می رسند. زاویه روتور و سرعت محور بدون هیچ نوسان بازگشتی در کمتر از ۱ ثانیه به مقدار حالت ماندگار قبل از خطا می رسند.

۵.۲ بررسی نتایج با تغییر ضریب بهره کنترلی

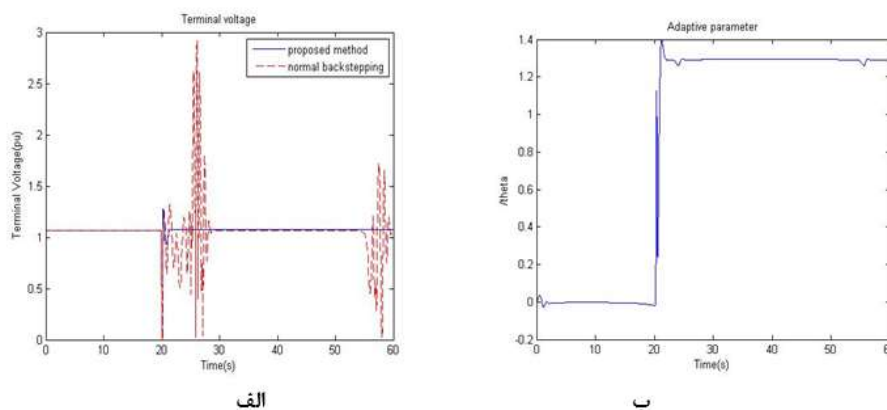
در این حالت بهره کنترل کننده با یک ضریب سینوسی جمع شده است، نتیجه اینکه کنترل کننده بازگشتی-تطبیقی قادر به پایدار کردن سیستم می باشد، ولی کنترل کننده متداول دارای نوسانات شدید به هنگام خطا و حتی در زمان های که خطا به سیستم اعمال نمی شود و سیستم دارای تغییرات کوچک اطراف نقطه کار است، می باشد.



شکل ۷- الف) سیگنال خروجی کنترل کننده (ب) زاویه روتور (ج) تغییرات سرعت (د) تغییرات توان الکتریکی

شکل ۷- الف) مشخصا رفتار کنترلی سیستم تطبیقی در حالت تغییرات بهره به صورت سینوسی متفاوت از سیستم متداول می باشد و همین مسئله باعث پایداری بیشتر شبکه قدرت متناسب با سیستم تطبیقی نیز خواهد بود. توجه می شود که تغییرات دوره ای پیش آمده در سیگنال کنترل مرتبط با سیستم تطبیقی به دلیل صفر شدن دوره ای بهره می باشد که به منظور جبران

آن کنترل کننده بهره تقویتی خود را افزایش داده و تغییرات سیگنال کنترل را باعث می شود. شکل (۷-ب) به صورت واضح برتری کنترل کننده با رویکرد تطبیقی-مقاوم را نشان می دهد. به طور مشخص افزایش زاویه روتور از مقدار ۱۰۰ نشانه ناپایداری شبکه می باشد که این مسئله در سناریوی متناسب با تغییرات بهره و در شکل (۷-الف) برای پایدارساز متداول نشان داده شده است. حال آنکه کنترلر تطبیقی-مقاوم توانسته است این تغییرات را پایدار نموده و پایداری سیستم را در نقطه کار زاویه روتور (۴۵ درجه) تثبیت نماید. مشخصا تغییرات دوره ای پایدارساز متداول نیز به دلیل عدم واکنش کنترل کننده به تغییرات دوره ای بهره می باشد که این مسئله با واکنش به هنگام کنترلر تطبیقی در سیستم متناسب با آن دفع شده است. در شکل (۷-د) نمودار تغییرات متناسب با توان الکتریکی نشان داده شده است. مطلوب این متغیر مقدار ۰.۸ پرونیوت می باشد که این هدف در حالت بکارگیری پایدارساز تطبیقی حاصل شده است، حال آنکه پایدارساز متداول قادر به تثبیت این مقدار نبوده و ناپایداری در آن به چشم می خورد.



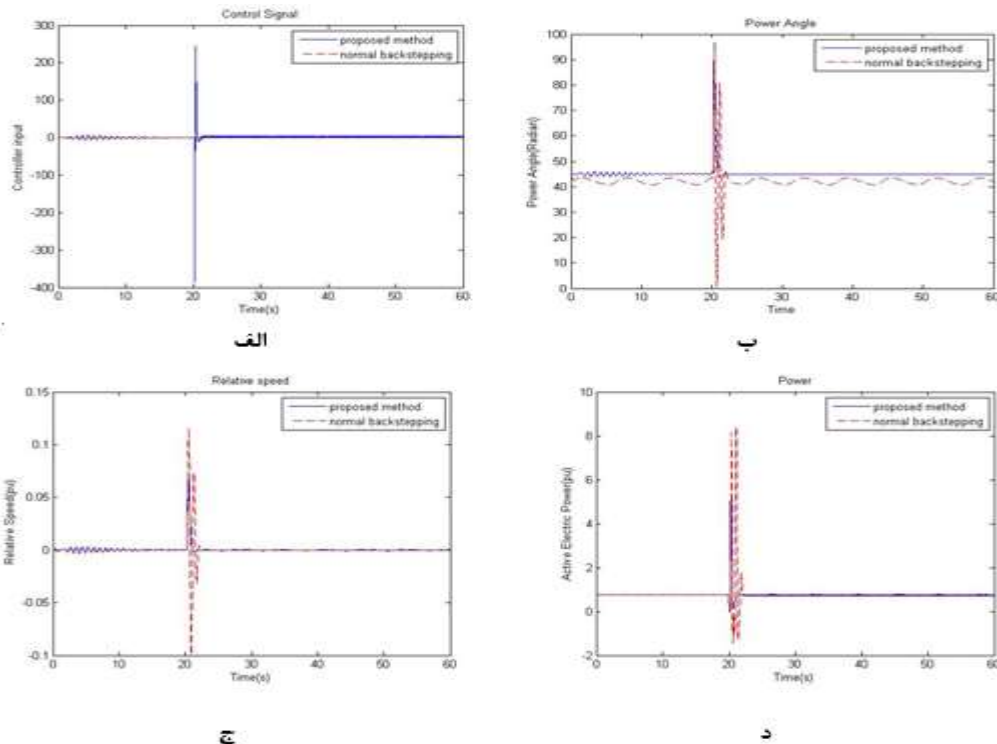
شکل ۸- الف) تغییرات ولتاژ ترمینال ب) تغییرات پارامتر تطبیقی

شکل (۸-الف) مهمترین و مشخص ترین متغیر شبکه، ولتاژ خط در این حالت برای پایدارساز متداول تا محدوده نزدیک به ۳ پرونیوت جهش داشته است که مشخصا خارج شدن شبکه از طریق سیستم امنیت شبکه قدرت را منجر می شود حال آنکه این ولتاژ در حضور پایدارساز تطبیقی تا محدوده ۱.۳ پرونیوت جهش داشته که سریعاً در مقدار ۱.۱ تثبیت شده است. در شکل (۸-ب) تغییرات پارامتر تطبیق متناسب با پایدارساز تطبیقی نشان داده شده است. در یک بررسی کلی در این سناریو می توان گفت، با اعمال تغییرات بهره، هنگامی که خطا در فاصله بین زمان های $t=20$ تا $t=20.18$ ثانیه اتفاق می افتد، ولتاژ ترمینال و توان اکتیو به صورت هم زمان صفر می شوند. در همین زمان، زاویه روتور و سرعت متناسب با آن شروع به افزایش می کنند. در این شرایط، ولتاژ تحریک برای افزایش ولتاژ ترمینال و توان اکتیو به حداکثر مقدار خود می رسد. وقتی که خطا رفع می شود سرعت روتور کاهش می یابد و توان اکتیو به حداکثر مقدار خود می رسد. در این شرایط سیستم کنترلی یک ولتاژ منفی مناسب را به تحریک اعمال می کند. در نتیجه، توان الکتریکی و زاویه روتور کاهش می یابد. این امر باعث می شود که ولتاژ ترمینال کاهش یابد. پس از این مرحله سیستم کنترلی ولتاژ صفر را به تحریک اعمال می کند. بنابراین توان الکتریکی، ولتاژ ترمینال، زاویه روتور و سرعت محور همگی به مقدار حالت ماندگار قبل از خطا می رسند.

۵.۳. بررسی نتایج با وجود تغییر پارامتر تطبیق

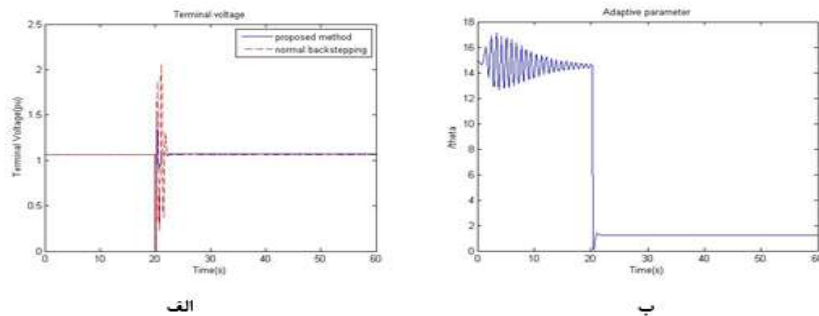
منظور از تغییر پارامتر، در واقع تغییر مقدار واقعی پارامتر تطبیق در کنترل کننده و تغییر مقدار اولیه در سیستم تطبیقی می باشد که با انجام این کار آنچه مشهود است این است که سیستم فاقد دینامیک تطبیق قادر به تغییر این مقدار نبوده و در

نتیجه با مقدار قبلی کار خواهد کرد. از طرفی سیستم با دینامیک تطبیق قادر به تطبیق دادن این مقدار در راستای بهبود عملکرد کنترل کننده است.



شکل ۹- الف) س یگنال خروجی کنترل کننده (ب) زاویه روتور (ج) تغییرات سرعت (د) تغییرات توان الکتریکی

در شکل (۹-الف) سیگنال خروجی کنترل کننده متناسب با دو سیستم پایدارساز متداول و پایدارساز با رویکرد تطبیقی نشان داده شده است. تغییرات نوسانی در سیگنال کنترلی پایدارساز تطبیقی متناسب با دینامیک تغییرات مشاهده می شود. در شکل (۹-ب) نمایش زاویه روتور سیستم نشان داده شده است، مشخصاً زاویه روتور برای سیستم پایدارساز بکار گرفته شده با رویکرد تطبیقی بهتر در مقدار متناظر با نقطه کار خود تثبیت شده است. حال آنکه سیستم متناسب با کنترلر متداول دارای نوسانات با برد ۵ درجه بر روی مقدار خود در حالت دائم می باشد و در حالت گذرا نیز دارای تغییرات شدید بر روی زاویه می باشد. در شکل (۹-ج) نمودار تغییرات سرعت نشان داده شده است که در یک دید دقیقتر در حالت دائم همچون شکل زاویه روتور تغییرات بر روی آن به صورت دوره ای قابل مشاهده است که این مسئله در حالت گذرا به صورت شدیدتر بر روی پایدارساز متداول قابل مشاهده است. در شکل (۹-د) تغییرات توان برای دو سیستم نمایش داده شده است که برای سیستم متداول شدیدتر می باشد و در حالت گذرا ادوات امنیتی شبکه را وارد مدار می کند.



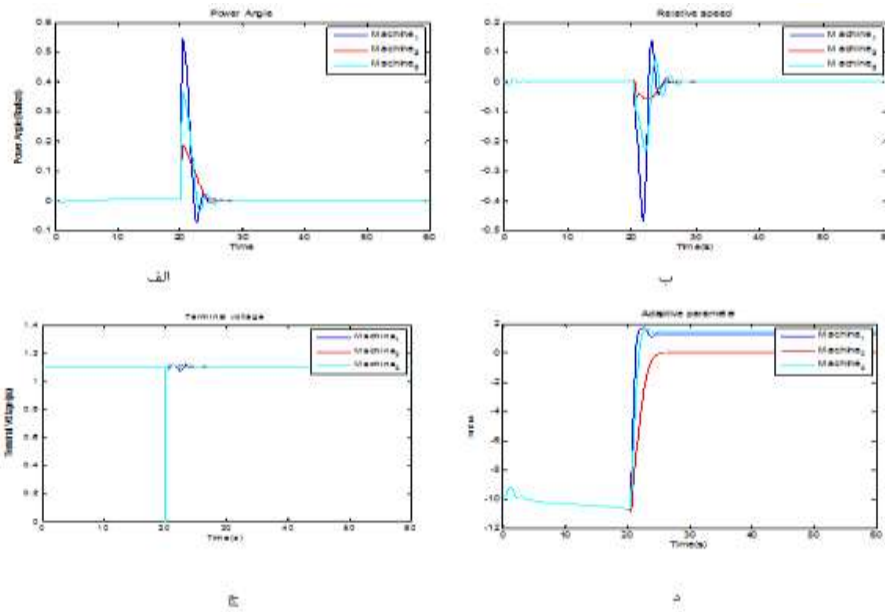
شکل ۱۰- الف) تغییرات ولتاژ ترمینال (ب) تغییرات پارامتر تطبیقی

شکل (۱۰-الف) تغییرات بر روی ولتاژ خط شبکه را نشان می دهد. این تغییرات برای پایدارساز متداول شدید بوده و آن را

ناپایدار کرده است. شکل (۱۰-ب) تغییرات متناسب با پارامتر تطبیق را برای سیستم پایدارساز با رویکرد تطبیقی نشان می دهد.

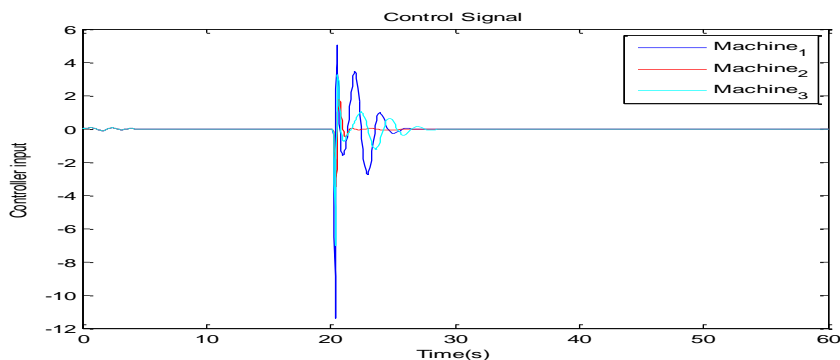
۵.۴ نتایج شبیه سازی برای سیستم سه ماشینه

شکل (۱۱-الف)، نمودار مربوط به زوایای توان را برای هر سه ماشین مشخص می کند. در این حالت در نظر گرفته شده که خطای اتصال کوتاه در باس نزدیک به ماشین یک روی داده است در نتیجه میزان ناپایداری بوجود آمده در آن نسبت به دو ماشین دیگر بیشتر می باشد. شکل (۱۱-ب)، نمودار مربوط به تغییرات سرعت برای سه ماشین را نمایش می دهد. شکل (۱۱-ج)، نمودار مربوط به ولتاژ باس سه ماشین را نمایش می دهد. شکل (۱۱-د)، نمودار مربوط به پارامتر تطبیق سه پایدارساز سیستم قدرت را نمایش می دهد.



شکل ۱۱- الف) نمودار مربوط به زوایای توان ب) نمودار مربوط به تغییرات سرعت ج) نمودار مربوط به ولتاژ باس سه ماشین د) نمودار مربوط به پارامتر تطبیق سه پایدارساز سیستم قدرت

و در نهایت در شکل (۱۲)، نمودار مربوط به سیگنال کنترلی متناظر با هر کدام از پایدارسازها نشان داده شده است.



شکل ۱۲- نمودار سیگنال کنترلی مربوط به پایدارسازها

نتیجه گیری:

در این مقاله سعی بر سعی در بهبود رفتار دینامیکی و پایداری، پایدارساز سیستم قدرت بر مبنای کنترل کننده غیرخطی داشتیم. در بررسی کنترل کننده‌های مرسوم به این نتیجه رسیدیم که در این کنترل کننده‌ها، برخی پارامترهای سیستم که عملاً در حال تغییر میباشند، ثابت در نظر گرفته شده‌اند که از آن جمله میتوان به ضریب میرایی (D) و بهره کنترل کننده اشاره کرد که با شبیه سازی‌های بعمل آمده به این نتیجه رسیدیم که رفتار سیستم و کنترل کننده‌های طراحی شده نسبت به تغییر این پارامترها، حساسیت بالایی از خود نشان می‌دهند. یکی از معایب عمده ی پایدارسازی سیستم قدرت حساسیت آنها به تغییر توان مکانیکی و تغییرات لحظه ای همچون تغییر آنی ولتاژ میباشد و این در مورد پایدارسازهای که ورودی توان بعنوان سیگنال کنترل ورودی استفاده میکنند اهمیت بیشتری دارد که این امر موجب تغییرات نامطلوب در توان راکتیو خواهد شد که در کنترل کننده طراحی شده که عملکرد آن منطبق بر کنترلر تطبیقی به کار گرفته شده با توابع پیش‌بینی می باشد سعی شده است پارامترهای ثابت مذکور به عنوان پارامترهای نامعین در نظر گرفته شده و پایداری سیستم نسبت به تغییرات بهره کنترل کننده مقاوم شده است و اعمال نامعینی به ضریب (D) و همچنین تغییرات در بهره کنترل کننده و سپس مشاهده نتایج شبیه سازی گویای ماهیت تطبیقی و مقاوم بودن، سیستم است. در ادامه بررسی این مسئله به صورت فراگیر و در یک شبکه سه ماشینه IEEE صورت گرفت که نتایج پایدار برای این شبکه مقاوم بودن پایدارساز طراحی شده نسبت به تغییرات پارامترهای شبکه را نشان داد.

منابع:

1. Ali M. Yousef, Ahmed M. Kassem, 'Optimal pole shifting controller for interconnected power system', Energy Conversion and Management Journal, 2011, Vol.52, Issue 5, pp.227-2234.
2. Babaei, E., et al.: 'Design of a non-linear power system stabilizer using the concept of the feedback linearization based on the back-stepping technique', 2012, - IET generation, transmission & distribution
3. Boris Mirkin, Per-Olof Gutman and Yuri Shtessel, "Continuous Model Reference Adaptive Control with Sliding Mode for a Class of Nonlinear Plants with Unknown State Delay", IEEE 2009.
4. Chen, G.P., Malik, O.P., Qin, Y.H., Xu, G.Y.: 'Optimization technique for the design of a linear optimal power system stabilizer', IEEE Trans. Energy Convers., 1992, 7, (3), pp. 453-459
5. Chi-hi Wu, Yuan-Yh Hsu.: 'Design of self-tuning PID power system stabilizer for multi machine power systems', IEEE Transactions on Power Systems. Vol.3, No.3, August 1988.
6. Demello, F.P., Concordia, C.: 'Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control', IEEE Trans. Power Appar. Syst., 1969, PAS-88, (4), pp. 316-329
7. E. Babaei, S.A.K.H.M. Niapour, M. Tabarraie, 'Design of a non-linear power system stabiliser using the concept of the feedback linearisation based on the back-stepping technique' published in IET Generation, Transmission & Distribution, February 2011
8. G. Kenne, R. Goma, 'An improved direct feedback linearization technique for transient stability enhancement and voltage regulation of power generators', Electrical Power and Energy Systems, 2010, Vol. 32, pp.809-
9. Ghandakly, Idowu 'Design of a model reference adaptive stabilizer for the exciter and governor loops of power generators', IEEE Transactions On Power Systems, Vol.5, No. 3, August 1990.

10. Gibbard, M.J.: 'Robust design of fixed-parameter power system stabilisers over a wide range of operating conditions', IEEE Trans. Power Syst., 1991, 6, (2), pp. 794–800.
11. Giuseppe Fusco, Mario Russo, 'Nonlinear control design for excitation controller and power system stabilizer', Control Engineering Practice, 2011, Vol. 19, pp. 243–251
12. Graham Rogers; Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers,
13. H. P. Wang and Y. T. Liu, "Integrated design of speed-sensor less and adaptive speed controller for a brushless dc motor," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 2, pp. 518–523, Mar. 2006.
14. H. Wang, S. Pekarek, and B. Fahimi, "Multilayer control of an induction motor drive: A strategic step for automotive applications," IEEE Trans. Power Electron., vol. 21, no. 3, pp. 676–686, May 2006.
15. H.M. Kojabadi, L. Chang, and R. Dora swami, "AMRAS-based adaptive pseudo reduced-order flux observer for sensor less induction motor drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 4, pp. 930–938, Jul. 2005.
16. I. Kanellakopoulos, M. Krstic and P. Kokotovic, "Nonlinear and adaptive control design," John Wiley and sons. Inc. 1995 Unknown Bounds", EPG-IQ-2010.
17. Ibrahim Fahad Jasim, Najah Fahad Jasim, "Adaptive Sliding Mode Control Design for a Class of Nonlinear Systems with Unknown Dead Zone of
18. J.J.E Slotine and W.Li, "Applied Nonlinear Control", Prentice-Hall, 1995
19. Jabr, R.A., Pal, B.C., Martins, N., Ferraz, J.C.R.: 'Robust and coordinated tuning of power system stabiliser gains using sequential linear programming', IET Gener. Transm. Distrib., 2010, 4, (8), pp. 893–904
20. Jabr, R.A., Pal, B.C., Martins, N.: 'A sequential conic programming approach for the coordinated and robust Design of power system stabilizers', IEEE Trans. Power Syst., 2010, 25, (3), pp. 1627–1637
21. Johnc. Doyle and Keith Glover.: "Robust and optimal control", Prentice- Hall 1998.
22. K. Wang, H. Xin, D. Gan, 'Non-linear robust adaptive excitation controller design in power systems based on a new back-stepping method', Published in IET Control Theory and Applications, March 2010
23. K. Zhou and Johnc. Doyle.: "Essentials of robust control", Prentice- Hall, 1998.
24. K. Sobel, Direct Adaptive Control Algorithms, New York: Springer-Verlag, 1997, 2nd ed.
25. Khalil, H.K., "Nonlinear systems", Prentice- Hall, 2002, 3rd ed.
26. Klein, M., Le, L.X., Roger, G.J., Farrokhpay, S., Balu, N.J.: 'Damping controller design in large power systems', IEEE Trans. Power Syst., 1995, 10, (1), pp. 158–166
27. Kundur, P., Klein, M., Rogres, G.J., Zywno, M.S.: 'Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability', IEEE Trans. Power Syst., 1989, 4, (2), pp. 614–626
28. L. Yacoubi, K. A. Haddad, L. A. Dessaint, and F. Fnaiech, "A DSP based implementation of a nonlinear model reference adaptive control for a three-phase three-level NPC boost rectifier prototype," IEEE Trans. Power Electron., vol. 20, no. 5, pp. 1084–1092, Sep. 2005.
29. M. Kemal Ciliz, "Combined direct and indirect adaptive control for a class of nonlinear systems", IET 2009.
30. Majumber, R., Chaudhuri, B., Pal, B.C., Zhong, Q.C.: 'A unified Smith predictor approach for power system damping control design using remote signals'
31. Pal, B., Chaudhuri, B.: 'Robust control in power systems' Springer, New York, 2005

32. Panda, S., Padhy, N.P., Patel, R.N.: 'Robust coordinated design of PSS and TCSC using PSO technique for power system stability enhancement', J. Electr. Syst., 2007, 3, (2), pp. 109-123
33. Plastan, F. et al.: 'New methodologies for adaptive sliding mode control', 2011, International Journal of Control
34. Prabha. S. Kundur; Power system Stability and Control, Mc GrawHill, 1996.
35. R. V. Monopoll, "Model reference adaptive control with an augmented error signal," IEEE Trans. Autom. Control, vol. 19, no. 5, pp. 474-484, Oct. 1974.
36. Shaltout, A.A., Abu Al-Feilat, K.A.: 'Damping and synchronizing torque computation in multi machine power systems', IEEE Trans. Power Syst., 1992, 7, (1), pp. 280-286
37. Shaoru Zhang and Fang Lin Luo.: 'An improved simple adaptive control applied to power system stabilizer', IEEE Transactions On Power Electronics, Vol.24, No.2, February 2009.
38. T. Hussein, M.S. Saad, 'Damping inter-area modes of oscillation using an adaptive fuzzy power system stabilizer', Electrical Power Systems Research, 2010, Vol.80, pp.1428-1436
39. Y. D. Landau, "Adaptive Control," New York, Marcel Dekker, 1979.
40. Zhu, C., Zhou, R., Wang, Y.: 'A new nonlinear voltage controller for power systems', Electr. Power Energy Syst., 1997, 19, (1), pp. 19-27

Power System Stabilizer Design by Comparative Method for the Indeterminate Drift Coefficient and Control Gain

Hassan Fatehi Marj¹, Majid Emadabadi²

1. Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan

2 Master's degree in electrical engineering, discipline of control, Islamic Azad University, Sirjan Branch

Abstract

The conventional power system stabilizers are designed based on linear control theory and special value calculations, which have problems such as being time-consuming, not being set and optimal, and the system's damping at the point of operation. Using a comparative control, the PSS can be designed to reduce the frequency fluctuations under various disturbances and increase the system's damping considerably. This paper has used a Lyapunov-based approach in which the drift parameter is considered indeterminate, and finally the controller stability for this system is proved with the definition of a general-purpose Lyapunov function. The simulation results indicate the suitability of the control rule obtained for the modes corresponding to the normal state of work, in the uncertainty mode for the drift parameter, and also in the uncertainty mode for the control gain.

Keywords: power stabilizer, comparative control, Lyapunov function.
