

بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت چندماشینه توسط UPFC با استفاده از کنترل کننده غیرخطی به روش پسگام چند ورودی

سعید اباذری^۱، دانشیار؛ ذبیح اله فرامرزی^۲، دانشجوی دکتری

۱- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - abazari-s@eng.sku.ac.ir

۲- دانشکده فنی و مهندسی - دانشگاه شهرکرد - شهرکرد - ایران - faramarzi_z62@yahoo.com

چکیده: پایداری و میرایی نوسانات سیستم‌های قدرت به‌هنگام وقوع خطا، عامل مهمی است که توجه بسیاری از طراحان سیستم‌های قدرت را به خود جلب کرده است. در این مقاله بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت چند ماشین به‌همراه UPFC ارائه شده است. روش کنترلی به‌کار رفته برای بهبود میرایی نوسانات از نوع کنترل کننده غیرخطی پسگام چند ورودی می‌باشد. برای مدل سازی UPFC از مدل تزریقی استفاده شده است. استفاده از این مدل باعث تبدیل ۴ ورودی کنترل به دو ورودی کنترل و عملکرد بهتر کنترل کننده طراحی شده می‌شود. کارایی کنترل کننده پیشنهادی در مقایسه با یک کنترل کننده مرسوم، نشان از مقاوم بودن، عدم وابستگی به نقطه کار و به‌کارگیری تمام متغیرهای کنترلی UPFC می‌باشد. این روش کنترلی در سیستم قدرت تک ماشین متصل به شین بینهایت و سیستم قدرت چند ماشین (۹ باسه IEEE) پیاده‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی کارایی کنترل کننده پسگام چند ورودی نسبت به کنترل کننده‌های مرسوم را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: پایداری دینامیکی، کنترل کننده یکپارچه توان (UPFC)، کنترل کننده پسگام چند ورودی.

Damping Improvement of Multi Machine Power System Oscillations by using UPFC Controller based Multi-input Nonlinear Backstepping Controller

Saeed Abazari¹, Associate professor; zabihollah faramarzi², PhD student

1- Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran, Email: abazari-s@eng.sku.ac.ir

2- Faculty of Engineering, University of Shahrekord, Shahrekord, Iran, Email: faramarzi_z62 @yahoo.com

Abstract: Stability and damping oscillations during fault occurrence are two important challenges which have attracted the attention of the power systems designers. In this paper Improvement of the Damping of Multi Machine Power System Oscillations is considered by using UPFC. The applied control algorithm for the damping oscillations is the Multi-input Nonlinear Back-stepping Controller. The injection model of UPFC is used for modeling of UPFC, Using of this model decreases 4 input control of UPFC to two inputs and the performance of power system is improved by this control method. Performance of this control algorithm in comparison with classical method is shown, more robustness, more independent to the work point and using of whole control variables of UPFC. The proposed control method, is simulated for a single machine connected to infinite bus and a multi-machine (9 bus IEEE) power system. The results of simulation, is illustrated that the performance of designed multi-input Back-stepping controller rather is better than conventional controller.

Keywords: Dynamic Stability, Unified Power Flow Controller (UPFC), Multi input Back stepping Controller.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۷/۰۵/۱۶

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۷/۰۹/۱۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۷/۱۲/۰۵

نام نویسنده مسئول: سعید اباذری

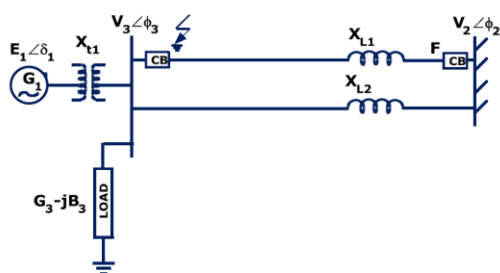
نشانی نویسنده مسئول: ایران - شهرکرد - بلوار رهبر - دانشگاه شهرکرد - دانشکده فنی و مهندسی

۱- مقدمه

پایداری از اصول اساسی در سیستم‌های قدرت می‌باشد. سیستم قدرتی مناسب است که در مقابل خطاها و عوامل ناخواسته مقاوم بوده و پایداری سیستم را تامین و تنظیم کند. انواع خطاها، اتصال کوتاه، رشد بار، کمبود تولید و عوامل متعدد دیگر از تهدید کننده‌های جدی امنیت سیستم و برهم‌زننده پایداری می‌باشند. یکی از این پدیده‌ها نوسانات با فرکانس کم می‌باشد که بیشتر در مقابل اغتشاش‌های کوچک و ناگهانی پدیدار می‌شود. در اصل ناپایداری دینامیکی به دلیل برهم خوردن تعادل بین توان مکانیکی ورودی و توان الکتریکی خروجی و کمبود گشتاور میراکننده حاصل می‌شود [۱].

سیستم‌های قدرت سیستم‌هایی به شدت غیرخطی، پیچیده و به هم-پیوسته هستند که به طور دائم برای پاسخ به تقاضای بیشتر مصرف تحت فشار هستند. هنگامی که بخشی از سیستم قدرت در مورد اختلالات بزرگ یا کوچک مورد بررسی قرار می‌گیرد در واقع قابلیت انتقال توان تمامی سیستم مورد بررسی قرار می‌گیرد. بررسی پایداری یک موضوع بسیار موثر در عملکرد پایداری، بهره‌وری و قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت می‌باشد [۱]. کنترل کننده‌های تحریک سیستم قدرت می‌توانند میرایی اضافی از طریق طراحی پایداری‌سازهای سیستم قدرت (PSS) برای بهبود پایداری سیستم‌های قدرت مهیا نمایند [۹-۲]. در این نوع میرا سازها از مدل خطی سیستم قدرت حول نقطه کار با روش‌های مختلف کنترل خطی استفاده می‌شود که کارایی لازم در مواقع بروز خطاهای شدید به دلیل تغییر نقطه کار و تغییر پارامترهای سیستم را ندارد. برای بهبود عملکرد سیستم قدرت در برخی مطالعات ترکیبی از کنترل کننده-های خطی و غیرخطی استفاده شده است که تا حدودی منجر به بهبود عملکرد می‌شود [۱۰]. استفاده از روش‌های کنترل غیرخطی برای بهبود پایداری سیستم‌های قدرت به طور گسترده‌ای استفاده شده است، روش-هایی چون کنترل پسگام، کنترل تطبیقی، کنترل پسگام تطبیقی، کنترل مود لغزشی و روش مستقیم لیاپانف برای پایداری سیستم‌های قدرت چند ماشینه استفاده شده است. اما این روش‌ها بر مبنای بهبود میرایی از طریق کنترل سیستم تحریک ژنراتورها استوارند [۱۵-۱۱]. در مرجع [۱۶] روش غیرخطی به کاررفته برای بهبود پایداری سیستم قدرت چند ماشینه کنترل از نوع کنترل سیستم تحریک نمی‌باشد و از یک عنصر اضافی به نام SFCL^۲ که به صورت سری در یک خط انتقال برای محدودکردن جریان قرار می‌گیرد، استفاده شده است این عنصر یک عنصر پسیو است که فقط برای شرایط کاری مشخصی کارایی دارد و اگر نوع خطا یا مدت آن تغییر کند کارایی آن به شدت تضعیف می‌شود. روش‌های بهبود پایداری بیان شده همگی بر مبنای کنترل تحریک سیستم قدرت استوار است که دارای انعطاف کم در کنترل پارامترهای سیستم قدرت می‌باشند.

برای تقویت کنترل پذیری و توسعه ظرفیت انتقال شبکه‌ها از سیستم‌های انتقال AC انعطاف پذیر که به ادوات FACTS^۳ معروف می-باشند و بر مبنای استفاده از کنترل کننده‌ها و ادوات الکترونیک قدرت استوار هستند، استفاده می‌شود. استفاده از ادوات FACTS در دو دهه اخیر به طور گسترده برای تقویت ساختار سیستم‌های قدرت مدرن مورد استفاده بوده است. از کاملترین این عناصر، کنترل کننده یکپارچه فلو توان است که به اختصار آن را UPFC^۴ می‌نامند. مطالعات زیادی در زمینه استفاده از ادوات FACTS برای بهبود پایداری سیستم‌های قدرت انجام شده است. در برخی مطالعات بهبود پایداری سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت و در برخی دیگر سیستم‌های چند ماشینه قدرت در حضور عناصر FACTS مانند UPFC و TCSC^۵ با استفاده از مدل خطی شده و روش‌های کنترلی خطی، فازی و غیره انجام شده است [۲۴-۱۷]. استفاده از مدل‌های خطی و روش‌های کنترل خطی در محدوده‌های کاری کوچک معتبر است که به دلیل پیچیدگی‌های زیاد و خاصیت غیرخطی شدید سیستم قدرت، راه بهتر استفاده از کنترل-کننده‌های غیرخطی است. در مطالعات دیگر مدل غیرخطی سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت برای پایداری سیستم در حضور عناصر FACTS و استفاده از کنترل کننده‌های غیرخطی مانند روش مستقیم لیاپانف و پسگام تطبیقی بررسی شده است [۲۶-۲۵]. که به دلیل بررسی نشدن سیستم‌های قدرت با گستردگی بیشتر دارای اعتبار نمی‌باشد. در مرجع [۲۷] سیستم قدرت چند ماشینه در حضور عنصر UPFC با در نظر گرفتن مدل غیرخطی و استفاده از روش تابع انرژی، بر اساس کنترل مدل پیشبین (MPC^۶) با هدف جلوگیری از اضافه بار در سیستم قدرت اجرا شده است، ولی در این مقاله با استفاده از کنترل-کننده پسگام مسئله بهبود دینامیکی سیستم قدرت چند ماشینه مورد توجه است. در مرجع [۲۸] یک کنترل کننده پسگام برای بهبود نوسانات استفاده شده است اما کنترل کننده پسگام طراحی شده برای بخش سری و موازی UPFC به طور جداگانه طراحی شده، همچنین هدف کنترلی، جریان شاخه‌های سری و موازی UPFC است و از خطای سرعت ژنراتور در طراحی کنترل کننده استفاده نشده است که این موضوع ضعف بزرگی برای آن محسوب می‌شود زیرا به طور غیرمستقیم سعی در بهبود نوسانات سرعت دارد. بیشتر مطالعات انجام شده برای طراحی کنترل کننده به روش پسگام تنها از یک ورودی کنترلی UPFC استفاده شده است (فقط از یک متغیر کنترلی UPFC معمولاً دامنه ولتاژ مبدل سری) و سایر ورودی‌ها یا ثابت در نظر گرفته شده و یا در طراحی کنترل پسگام وارد نمی‌شوند و یا آنکه روش پسگام استفاده شده برای یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت بکاررفته است. اما در این مقاله برای بهبود پایداری دینامیکی سیستم قدرت چند ماشینه با به کار بردن مدل تزریقی تعداد ورودی‌های کنترلی UPFC از ۴ به ۲ کاهش می‌یابد و با استفاده از کنترل کننده پسگام چند ورودی این دو ورودی تعیین می-شوند. این موضوع منجر به انعطاف بیشتر در کنترل پایداری، و حداقل-شدن تعداد ورودی‌های موجود برای کنترل می‌شود. همچنین استفاده



شکل ۱: سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت

معادلات دینامیکی سیستم تک ماشینه به صورت زیر داده شده است [۳۰]:

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = \omega - \omega_0 \\ \dot{\omega}_1 = \frac{1}{M} [P_m - B_{1,3} E_1 V_3 \sin(\delta_1 - \Phi_3)] \end{cases} \quad (1)$$

در این معادلات V_3 و Φ_3 به ترتیب دامنه ولتاژ و زاویه فاز باس ها می باشد. $B_{1,3}$ راکتانس ماتریس ادمیتانس سیستم بین باس ۱ و ۳ می باشد و E_1 ولتاژ داخلی ژنراتور می باشد.

۲-۱-۲- مدل سازی UPFC

UPFC شامل دو مبدل سری و موازی است که مبدل سری با یک امپدانس X_{SR} و مبدل موازی با یک امپدانس X_{SH} مدل شده است. این دو بخش به وسیله یک خازن کوپلاژ با ظرفیت C_{dc} و ولتاژ V_{dc} به یکدیگر متصل می شوند. مبدل سری وظیفه ی تزریق یک ولتاژ با اندازه و زاویه فاز قابل کنترل، انتقال توان اکتیو و راکتیو به خط انتقال را برعهده دارد در حالی که مبدل موازی، تامین توان اکتیو مورد نیاز شاخه سری و تلفات ناشی از سوئیچینگ و امپدانس های موجود به همراه جبران سازی توان را برعهده دارد. در شکل (۲) $\varphi_{SH}, m_{SH}, \varphi_{SR}$ و m_{SR} چهار سیگنال کنترلی UPFC می باشند.

۲-۱-۳- مدل تزریقی UPFC

در اینجا یک مدل کلی تزریق توان برای عنصر سری-موازی UPFC استفاده شده است. این مدل که به مدل تزریقی معروف است برای آنالیز پخش بار و پایداری زاویه ای دارای اعتبار است. UPFC با استفاده از مبدل سری یک ولتاژ سری به خط انتقال اعمال می کند و در نتیجه یک توان اکتیو به خط وارد می کند توان اکتیو مورد نیاز مبدل سری توسط مبدل موازی از باس متصل شده به آن جذب می شود. از آنجایی که در بررسی پایداری و پایداری سازی سیستم متصل به UPFC نقش اصلی را مبدل سری برعهده دارد لذا در این مدل با صفر در نظر گرفتن توان راکتیو مبدل موازی تمان ظرفیت توان راکتیو UPFC به مبدل سری اختصاص داده می شود. این موضوع منجر به توانایی بیشتر در پایداری و میرایی نوسانات می شود. در شکل (۲) مبدل UPFC نشان داده شده است، در این شکل X راکتانس موثر دیده شده از سمت خط انتقال و ترانسفورمر است. برای UPFC $X = X_{SR} + X_{SH}$ که راکتانس ترانسفورمر سری و X_{SR} راکتانس ترانسفورمر موازی را نشان می دهد [۲۷]. V_{SR} ولتاژ تولید شده توسط ترانسفورمر سری و I_{SH} جریان منبع شاخه موازی می باشد.

از کنترل کننده پسگام به علت خاصیت مقاوم بودن این نوع کنترل کننده، منجر به بهبود پاسخ سیستم در مواقع تغییر پارامترها می شود [۲۹].

بعد از مقدمه ابتدا یک کنترل کننده پسگام برای یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت ارائه شده است. در ادامه یک سیستم چند ماشینه معرفی، و دینامیک سیستم استخراج شده و تغییر مختصاتی در معادلات اولیه انجام شده تا معادلات به صورت استاندارد روش بازگشتی چند ورودی چند خروجی تبدیل شود. سپس از روش کنترل پسگام چند ورودی پیشنهاد شده استفاده می شود. در نهایت کارایی روش کنترلی به کاررفته از نظر بهبود نوسانات و مقاومت در برابر تغییر پارامترها در یک سیستم قدرت چند ماشینه در مقایسه با یک کنترل کننده خطی نشان داده شده است.

به صورت تیتروار نوآوری های این مقاله عبارتند از:

۱- استفاده از دو ورودی UPFC برای طراحی کنترل کننده غیرخطی به-روش پسگام چند ورودی
۲- استفاده از مدل تزریقی UPFC که منجر به کاهش تعداد ورودی های UPFC از ۴ به ۲ و در نتیجه توانایی بیشتر در میراسازی به علت افزایش قدرت مانور مبدل سری می شود.

۳- کنترل دقیق زاویه ی بار و سرعت زاویه ای یک سیستم ۹ باسه چند ماشینه با یک UPFC، به علت آنکه مقدار خطای متغیر حالت خروجی زاویه ژنراتور، نسبت به مقدار مرجع محاسبه شده برای آن در کنترل کننده طراحی شده باید برابر صفر باشد. لذا در اینجا علاوه بر آنکه سرعت زاویه ای در مقدار مرجع خود تثبیت می شود زاویه داخلی نیز در مقدار مرجع به صورت دقیق تنظیم می شود.

۲- دینامیک غیر خطی سیستم

برای تبیین بهتر کنترل کننده طراحی شده در این مقاله ابتدا یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت را بررسی کرده، سپس روش پیشنهادی برای سیستم چند ماشینه بسط داده می شود. ابتدا سیستم قدرت شکل شماره (۱) را در نظر بگیرید. معادلات دینامیکی مرتبه ۲ این سیستم بصورت (۱) می باشد.

۲-۱-۱- سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت

برای بررسی این بخش ابتدا مدل سیستم قدرت بدون اتصال به UPFC معرفی می شود و سپس با اضافه کردن UPFC مدل سیستم اصلاح می-شود.

۲-۱-۲- سیستم قدرت بدون حضور UPFC

سیستم قدرت مورد بررسی در شکل (۱) نشان داده شده است. ژنراتور با یک مدل کلاسیک، شامل یک ولتاژ داخلی ثابت در پشت راکتانس گذرا مدل شده است. این توصیف از سیستم تا زمانی مناسب است که فقط تغییرات سرعت اهمیت داشته باشد. در اینجا مقاومت اهمی خطوط صفر و توان مکانیکی ورودی و بارها ثابت در نظر گرفته شده است.

برای باس‌های ۳ و ۴ این سیستم معادلات جبری تعادل توان را به صورت (۳) می‌توان در نظر گرفت.

$$\begin{cases} P_{L3} + \sum_{j=1}^{N+n} V_{3j} V_j \sin(\Phi_3 - \Phi_j) = 0 \\ P_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_4 V_j \sin(\Phi_4 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L3} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{3j} V_3 V_j \cos(\Phi_3 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_4 V_j \cos(\Phi_4 - \Phi_j) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

در این روابط $V_j = E_j$ ، $\Phi_j = \delta_j$ برای $1 < j < n$ به علاوه N تعداد باس‌های بدون ژنراتور در سیستم قدرت است.

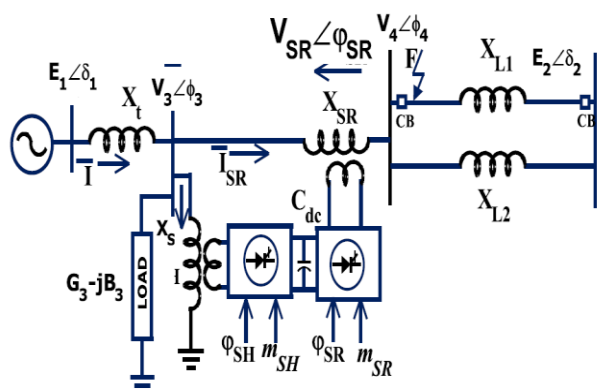
توان‌های تزریقی به باس‌های ۳ و ۴ طبق روابط (۲) به صورت (۴) به دست می‌آیند.

$$\begin{aligned} P_{3inj} &= B_{34} V_{SR} V_4 \sin((\Phi_3 - \Phi_{SR}) - \Phi_4) \\ P_{4inj} &= -B_{34} V_{SR} V_4 \sin((\Phi_3 + \Phi_{SR}) - \Phi_4) \\ Q_{3inj} &= B_{34} V_{SR} V_3 \cos(\Phi_{SR}) \\ Q_{4inj} &= -B_{34} V_{SR} V_4 \cos((\Phi_3 + \Phi_{SR}) - \Phi_4) \end{aligned} \quad (4)$$

روابط فوق را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

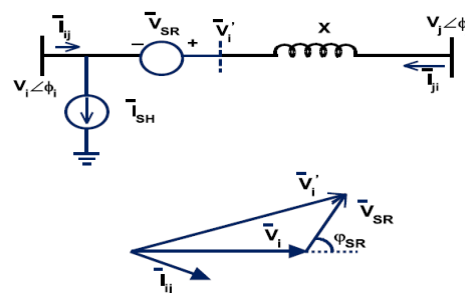
$$\begin{cases} P_{3inj} = B_{34} u_1 V_4 \sin(\Phi_3 - \Phi_4) + \\ \quad B_{34} u_2 V_4 \cos(\Phi_3 - \Phi_4) \\ P_{4inj} = -B_{34} u_1 V_4 \sin(\Phi_3 - \Phi_4) - \\ \quad B_{34} u_2 V_4 \cos(\Phi_3 - \Phi_4) \\ Q_{3inj} = B_{34} u_1 V_3 \\ P_{4inj} = -B_{34} u_1 V_4 \cos(\Phi_3 - \Phi_4) + \\ \quad B_{34} u_2 V_4 \sin(\Phi_3 - \Phi_4) \end{cases} \quad (5)$$

در این روابط $u_2 = V_{SR} \sin(\Phi_{SR})$ و $u_1 = V_{SR} \cos(\Phi_{SR})$ سیگنال‌های کنترل برای UPFC در طراحی کنترل کننده می‌باشند.



شکل ۴: سیستم قدرت تک ماشین متصل به UPFC [۱۹]

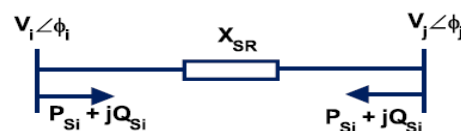
معادلات جبری تعادل توان در باس‌های ۳ و ۴ را می‌توان با اضافه کردن توان‌های تزریقی UPFC روابط به صورت (۶) اصلاح نمود [۳۳].



شکل ۲: مدار معادل و دیاگرام فازوری UPFC

در پایین شکل (۲) دیاگرام فازوری مدار معادل نیز نشان داده شده است. دامنه V_{SR} توسط UPFC قابل کنترل می‌باشد و همچنین Φ_{SR} قابل کنترل در محدوده 0 تا 2π می‌باشد. در [۳۲-۳۱] نشان داده شده که این مدار معادل را می‌توان به صورت دو بار مجزای تزریق شده به باس‌های i و j در نظر گرفت. مدل تزریقی ارائه شده به صورت کلی در شکل (۳) نشان داده شده است، روابط توان‌های تزریقی برای دو باس i و j به صورت (۲) به دست می‌آید [۳۲].

$$\begin{aligned} P_{si} &= B_{ij} V_{SR} V_j \sin((\Phi_i + \Phi_{SR}) - \Phi_j) \\ P_{sj} &= -B_{ij} V_{SR} V_j \sin((\Phi_i + \Phi_{SR}) - \Phi_j) \\ Q_{si} &= B_{ij} V_{SR} V_i \cos(\Phi_{SR}) \\ Q_{sj} &= -B_{ij} V_{SR} V_j \cos((\Phi_i + \Phi_{SR}) - \Phi_j) \end{aligned} \quad (2)$$



شکل ۳: مدل تزریقی UPFC

یکی از فرضیات در مدل تزریقی صفر در نظر گرفتن توان راکتیو مبدل موازی UPFC می‌باشد، وجود این شرط و شرط برابر بودن توان‌های اکتیو مبدل‌های سری و موازی باعث می‌شود که چهار ورودی کنترل در UPFC تبدیل به دو ورودی شود. در واقع مقدار این دو سیگنال کنترل مبدل موازی (Φ_{SH}, m_{SH}) وابسته به سیگنال‌های کنترل سری می‌باشد. مقدار این دو پارامتر بر حسب پارامترهای بخش سری در قسمت (۲-۳) نشان داده شده است. لذا در روابط استفاده شده برای تعیین کنترل کننده فقط دو ورودی Φ_{SR} و m_{SR} استفاده شده است.

۲-۱-۳- سیستم قدرت تک ماشین با حضور UPFC

بر اساس مدل تزریقی دینامیک UPFC در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه معادلات دیفرانسیل سیستم قدرت به همان صورت روابط (۱) می‌باشد. در شکل (۴) مدل سیستم قدرت شامل UPFC نشان داده شده است. در این شکل شاخه‌ی موازی UPFC به باس شماره ۳ و شاخه سری آن بین باس‌های شماره ۳ و ۴ قرار گرفته است.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_1 = \omega_1 - \omega_0 \\ \dot{\omega}_1 = \frac{1}{M_1} [P_{m1} - B_{1,3} E_1 V_3 \sin(\delta_1 - \Phi_3)] \\ \dot{V}_3 = C_{11}(\omega_1 - \omega_0) + K_{11} r_1 + K_{11} r_2 \\ \dot{\Phi}_3 = C_{31}(\omega_1 - \omega_0) + K_{31} r_1 + K_{31} r_2 \\ \dot{u}_1 = r_1 \\ \dot{u}_2 = r_2 \end{cases} \quad (10)$$

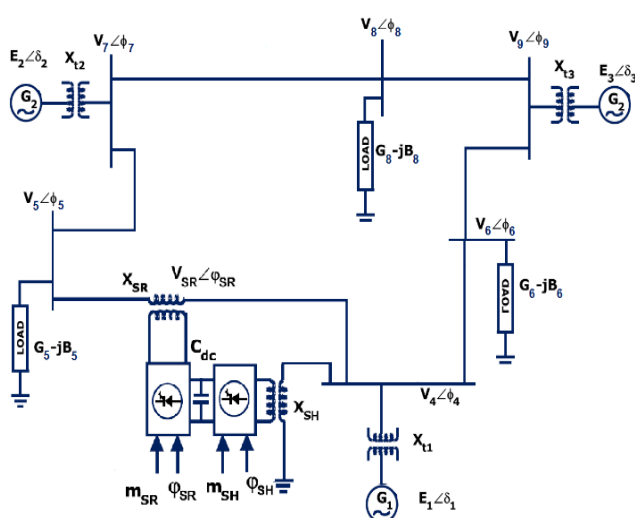
که در این معادلات C_{ij} و K_{ij} به ترتیب درایه‌های ماتریس‌های C و K می‌باشند.

۲-۲- سیستم قدرت چند ماشینه

برای به‌دست‌آوردن مدل سیستم قدرت در این حالت یک سیستم سه ماشینه به‌همراه UPFC به‌صورت شکل (۵) در نظر گرفته می‌شود. معادلات دینامیکی یک سیستم قدرت چند ماشینه بدون حضور UPFC به‌صورت (۱۱) می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{\delta}_i = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - B_{i,i+n} E_i V_{i+n} \sin(\delta_i - \Phi_{i+n})] \end{cases} \quad (11)$$

مشخصات ژنراتور در جدول (۳) در پیوست آمده است. فرضیات استفاده شده برای سیستم قدرت در این بخش نیز برقرار است.



شکل ۵: سیستم قدرت ۹ با سه IEEE در حضور کنترل کننده UPFC

توان اکتیو و راکتیو هر یک از باس‌های شبکه به‌صورت روابط (۱۲) به‌دست می‌آید. در شبکه ۹ با سه فرض آن است که UPFC بین باس شماره ۴ و ۵ قرار بگیرد.

برای به‌دست‌آوردن دینامیک این سیستم روند اجرا شده در بخش قبل شامل روابط شماره‌ی ۱ تا ۷ در اینجا برقرار است. رابطه شماره ۸ با توجه به اینکه به جای شین بینهایت در بخش قبل یک ژنراتور قرار گرفته به‌صورت رابطه شماره (۱۳) اصلاح می‌شود.

$$\begin{cases} P_{L3} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{3j} V_3 V_j \sin(\Phi_3 - \Phi_j) + \\ V_4 B_{34} \{u_1 \sin(\Phi_3 - \Phi_4) + u_2 \cos(\Phi_3 - \Phi_4)\} = 0 \\ P_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_4 V_j \sin(\Phi_4 - \Phi_j) - \\ V_4 B_{34} \{u_1 \sin(\Phi_3 - \Phi_4) + u_2 \cos(\Phi_3 - \Phi_4)\} = 0 \\ -Q_{L3} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{3j} V_3 V_j \cos(\Phi_3 - \Phi_j) - V_3 B_{34} u_1 = 0 \\ -Q_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_4 V_j \cos(\Phi_4 - \Phi_j) + \\ V_4 B_{34} \{u_1 \cos(\Phi_3 - \Phi_4) - u_2 \sin(\Phi_3 - \Phi_4)\} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

۴-۱-۲ معادلات دینامیکی سیستم قدرت تک ماشینه در

حضور UPFC

با استفاده از معادلات تعادل توان و مشتق‌گیری مدل دینامیکی سیستم قدرت به‌دست می‌آید. برای رسیدن به این هدف از عبارات (۶) مشتق‌گیری می‌شود که در نتیجه روابط (۷) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial P_i}{\partial V_3} \dot{V}_3 + \frac{\partial P_i}{\partial V_4} \dot{V}_4 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_3} \dot{\Phi}_3 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_4} \dot{\Phi}_4 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_1} \dot{\delta}_1 \\ + \frac{\partial P_i}{\partial u_1} \dot{u}_1 + \frac{\partial P_i}{\partial u_2} \dot{u}_2 = 0 \\ \frac{\partial Q_i}{\partial t} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_3} \dot{V}_3 + \frac{\partial Q_i}{\partial V_4} \dot{V}_4 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_3} \dot{\Phi}_3 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_4} \dot{\Phi}_4 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_1} \dot{\delta}_1 \\ + \frac{\partial Q_i}{\partial u_1} \dot{u}_1 + \frac{\partial Q_i}{\partial u_2} \dot{u}_2 = 0 \end{cases} \quad (7)$$

پس از مشتق‌گیری و جداسازی متغیرها معادلات به‌صورت (۸) به‌دست می‌آید. در این روابط $i = 3, 4$ می‌باشد.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_3 \\ \dot{V}_4 \\ \dot{\Phi}_3 \\ \dot{\Phi}_4 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \\ b_{41} \end{bmatrix} \dot{\delta}_1 - \begin{bmatrix} g_{11} & g_{12} \\ g_{21} & g_{22} \\ g_{31} & g_{32} \\ g_{41} & g_{42} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

تعریف پارامترهای a_{11} تا a_{44} و b_{11} تا b_{42} و g_{11} تا g_{42} در پیوست ۲ آمده است. در روابط (۸) $\dot{u}_1$ و $\dot{u}_2$ ورودی‌های کنترلی سیستم هستند. هدف بعدی به‌دست آوردن ورودی‌های کنترلی با استفاده از روش غیرخطی پسگام می‌باشد. معادله ماتریسی (۸) را می‌توان به‌صورت خلاصه (۹) نوشت.

$$[A][\dot{x}] = -[B][\dot{\delta}] - [G][\dot{u}] \quad (9)$$

با حل معادله ماتریسی (۹) ماتریس‌های C و K با تعریف $-[A]^{-1}[B] = [C]$ و $-[A]^{-1}[G] = [K]$ به‌دست‌آید. در نهایت معادلات دینامیکی جدید سیستم قدرت تک ماشینه در حضور UPFC به‌صورت روابط (۱۰) به‌دست می‌آید.

$$\begin{aligned}
 & \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 & 0 & 0 & 0 & a_4 & a_5 & a_6 & 0 & 0 & 0 \\ a_7 & a_8 & 0 & a_9 & 0 & 0 & a_{10} & a_{11} & 0 & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{13} & 0 & a_{14} & 0 & 0 & a_{15} & a_{16} & 0 & a_{17} & 0 & 0 & a_{18} \\ 0 & a_{19} & 0 & a_{20} & a_{21} & 0 & 0 & a_{22} & 0 & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{25} & a_{26} & a_{27} & 0 & 0 & 0 & a_{28} & a_{29} & a_{30} \\ 0 & 0 & a_{31} & 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & a_{34} & 0 & a_{35} & a_{36} \\ a_{37} & a_{38} & a_{39} & 0 & 0 & 0 & a_{40} & a_{41} & a_{42} & 0 & 0 & 0 \\ a_{43} & a_{44} & 0 & a_{45} & 0 & 0 & a_{46} & a_{47} & 0 & a_{48} & 0 & 0 \\ a_{49} & 0 & a_{50} & 0 & 0 & a_{51} & a_{52} & 0 & a_{53} & 0 & 0 & a_{54} \\ 0 & a_{55} & 0 & a_{56} & a_{57} & 0 & 0 & a_{58} & 0 & a_{59} & a_{60} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & a_{61} & a_{62} & a_{63} & 0 & 0 & 0 & a_{64} & a_{65} & a_{66} \\ 0 & 0 & a_{67} & 0 & a_{68} & a_{69} & 0 & 0 & a_{70} & 0 & a_{71} & a_{72} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_4 \\ \dot{V}_5 \\ \dot{V}_6 \\ \dot{V}_7 \\ \dot{V}_8 \\ \dot{V}_9 \\ \dot{\Phi}_4 \\ \dot{\Phi}_5 \\ \dot{\Phi}_6 \\ \dot{\Phi}_7 \\ \dot{\Phi}_8 \\ \dot{\Phi}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \sin(\Phi_4 - \Phi_j) + \\ V_5 B_{45} \{u_1 \sin(\Phi_4 - \Phi_5) + u_2 \cos(\Phi_4 - \Phi_5)\} = 0 \\ P_{L5} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{5j} V_j \sin(\Phi_5 - \Phi_j) - \\ V_5 B_{45} \{u_1 \sin(\Phi_5 - \Phi_4) + u_2 \cos(\Phi_5 - \Phi_4)\} = 0 \\ P_{L6} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{6j} V_j \sin(\Phi_6 - \Phi_j) = 0 \\ P_{L7} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \sin(\Phi_7 - \Phi_j) = 0 \\ P_{L8} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{8j} V_j \sin(\Phi_8 - \Phi_j) = 0 \\ P_{L9} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \sin(\Phi_9 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L4} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \cos(\Phi_4 - \Phi_j) - V_4 B_{35} u_1 = 0 \\ -Q_{L5} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{5j} V_j \cos(\Phi_4 - \Phi_j) + \\ V_5 B_{45} \{u_1 \cos(\Phi_4 - \Phi_5) - u_2 \sin(\Phi_4 - \Phi_5)\} = 0 \\ -Q_{L6} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{6j} V_j \cos(\Phi_6 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L7} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \cos(\Phi_7 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L8} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{8j} V_j \cos(\Phi_8 - \Phi_j) = 0 \\ -Q_{L9} + \sum_{j=1}^{N+n} B_{4j} V_j \cos(\Phi_9 - \Phi_j) = 0 \end{bmatrix} \quad (12) \\
 & - \begin{bmatrix} b_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ b_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & b_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & b_4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} g_1 & g_5 \\ g_2 & b_6 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ g_3 & 0 \\ g_4 & b_7 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{bmatrix} \quad (14) \\
 & \text{تعریف پارامترهای } a_{11} \text{ تا } a_{72} \text{ و } b_1 \text{ تا } b_4 \text{ و } g_1 \text{ و } g_7 \text{ در پیوست ۱} \\
 & \text{آمده است. با توجه به آنکه فرض شده زاویه ژنراتور ۱ ثابت است در نتیجه} \\
 & \text{ضرایب } b_5 \text{ و } b_6 \text{ صفر می‌شوند. پس از ساده‌سازی و جایگزینی معادلات} \\
 & \text{دینامیکی برای سیستم قدرت ۹ باسه استاندارد به صورت (۱۵) به‌دست-} \\
 & \text{می‌آید.} \\
 & \begin{cases} \delta_i = \omega_i - \omega_0 \\ \omega_i = \frac{1}{M_i} [P_{mi} - B_{i,i+n} E_i V_{i+n} \sin(\delta_i - \Phi_{i+n})] \\ \dot{V}_4 = C_1(\omega_2 - \omega_0) + C_2(\omega_3 - \omega_0) + K_1 r_1 + K_2 r_2 \\ \dot{V}_5 = C_3(\omega_2 - \omega_0) + C_4(\omega_3 - \omega_0) + K_3 r_1 + K_4 r_2 \\ \dot{V}_6 = C_5(\omega_2 - \omega_0) + C_6(\omega_3 - \omega_0) + K_5 r_1 + K_6 r_2 \\ \dot{V}_7 = C_7(\omega_2 - \omega_0) + C_8(\omega_3 - \omega_0) + K_7 r_1 + K_8 r_2 \\ \dot{V}_8 = C_9(\omega_2 - \omega_0) + C_{10}(\omega_3 - \omega_0) + K_9 r_1 + K_{10} r_2 \\ \dot{V}_9 = C_{11}(\omega_2 - \omega_0) + C_{12}(\omega_3 - \omega_0) + K_{11} r_1 + K_{12} r_2 \\ \dot{\Phi}_4 = C_{13}(\omega_2 - \omega_0) + C_{14}(\omega_3 - \omega_0) + K_{13} r_1 + K_{14} r_2 \\ \dot{\Phi}_5 = C_{15}(\omega_2 - \omega_0) + C_{16}(\omega_3 - \omega_0) + K_{15} r_1 + K_{16} r_2 \\ \dot{\Phi}_6 = C_{17}(\omega_2 - \omega_0) + C_{18}(\omega_3 - \omega_0) + K_{17} r_1 + K_{18} r_2 \\ \dot{\Phi}_7 = C_{19}(\omega_2 - \omega_0) + C_{20}(\omega_3 - \omega_0) + K_{19} r_1 + K_{20} r_2 \\ \dot{\Phi}_8 = C_{21}(\omega_2 - \omega_0) + C_{22}(\omega_3 - \omega_0) + K_{21} r_1 + K_{22} r_2 \\ \dot{\Phi}_9 = C_{23}(\omega_2 - \omega_0) + C_{24}(\omega_3 - \omega_0) + K_{23} r_1 + K_{24} r_2 \\ \dot{u}_1 = r_1 \\ \dot{u}_2 = r_2 \end{cases} \quad (15) \\
 & \begin{cases} \frac{\partial P_i}{\partial t} = \frac{\partial P_i}{\partial V_3} \dot{V}_4 + \frac{\partial P_i}{\partial V_4} \dot{V}_5 + \frac{\partial P_i}{\partial V_3} \dot{V}_6 + \frac{\partial P_i}{\partial V_4} \dot{V}_7 + \frac{\partial P_i}{\partial V_3} \dot{V}_8 \\ + \frac{\partial P_i}{\partial V_4} \dot{V}_9 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_4} \dot{\Phi}_4 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_5} \dot{\Phi}_5 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_6} \dot{\Phi}_6 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_7} \dot{\Phi}_7 \\ + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_8} \dot{\Phi}_8 + \frac{\partial P_i}{\partial \Phi_9} \dot{\Phi}_9 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_1} \dot{\delta}_1 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_2} \dot{\delta}_2 + \frac{\partial P_i}{\partial \delta_3} \dot{\delta}_3 \\ + \frac{\partial P_i}{\partial u_1} \dot{u}_1 + \frac{\partial P_i}{\partial u_2} \dot{u}_2 = 0 \\ \frac{\partial Q_i}{\partial t} = \frac{\partial Q_i}{\partial V_4} \dot{V}_4 + \frac{\partial Q_i}{\partial V_5} \dot{V}_5 + \frac{\partial Q_i}{\partial V_6} \dot{V}_6 + \frac{\partial Q_i}{\partial V_7} \dot{V}_7 + \frac{\partial Q_i}{\partial V_8} \dot{V}_8 \\ + \frac{\partial Q_i}{\partial V_9} \dot{V}_9 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_4} \dot{\Phi}_4 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_5} \dot{\Phi}_5 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_6} \dot{\Phi}_6 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_7} \dot{\Phi}_7 \\ + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_8} \dot{\Phi}_8 + \frac{\partial Q_i}{\partial \Phi_9} \dot{\Phi}_9 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_1} \dot{\delta}_1 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_2} \dot{\delta}_2 + \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_3} \dot{\delta}_3 \\ + \frac{\partial Q_i}{\partial u_1} \dot{u}_1 + \frac{\partial Q_i}{\partial u_2} \dot{u}_2 = 0 \end{cases} \quad (13)
 \end{aligned}$$

۳- معرفی کنترل‌کننده غیرخطی به روش بازگشت به

عقب (پسگام) چند ورودی

روش کنترل پسگام یکی از روش‌های پرکاربرد در طراحی کنترل‌کننده-های غیرخطی برپایه روش لیاپانف می‌باشد [۳۴]. در تئوری کنترل، روش پسگام تکنیکی است که در طی سالهای ۱۹۹۰ توسط پیتز

پس از مشتق‌گیری و جداسازی متغیرها معادلات به صورت (۱۴) به-

دست می‌آید، در این روابط ۴، ۵، ۶، ۷، ۸، ۹، و ولتاژ داخلی ژنراتورها ثابت

فرض شده است.

$$\dot{z}_2 = f_2(x, z_1) + g_2(x, z_1)z_3$$

$$\dot{z}_{k-1} = f_1(x, z_1, \dots, z_{k-1}) + g_1(x, z_1, \dots, z_{k-1})z_k$$

$$\dot{z}_k = f_k(x, z_1, \dots, z_k) + g_k(x, z_1, \dots, z_k) \quad (۲۰)$$

که در آن $x \in R^n$ و z_1 تا z_k کمیت‌های اسکالر یا برداری باشند، و f_0 تا f_k به مقدار صفر میل می‌کنند، فرض می‌شود که:

$$g_i(x, z_1, \dots, z_i) \neq 0 \quad 0 < i < k$$

جزئیات طراحی کنترل‌پسگام برای این ساختار در مرجع [۳۱] آمده است.

۳-۱- طراحی کنترل‌کننده غیرخطی به روش بازگشت به عقب (پسگام) چند ورودی برای سیستم تک ماشین متصل به شین

بینهایت

با توجه به روش پسگام توضیح داده‌شده برای طراحی کنترل‌کننده پسگام، برای رسیدن به فرم اکیدافیدبکی در روش پسگام تغییر متغیرهای (۲۱) انجام می‌شود.

$$\begin{cases} x_1 = \delta_2 - \delta_{01} \\ x_2 = \omega_1 - \omega_{11} \\ x_3 = V_3 \sin(\delta_1 - \Phi_3) \end{cases} \quad (۲۱)$$

در نتیجه معادلات دینامیکی در مختصات جدید به صورت (۲۲) می‌باشد که فرم مناسب برای استفاده از روش بازگشتی چند ورودی می‌باشد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1.3}E_1}{M_1}x_3 \\ \dot{x}_3 = f_{T1} + g_{T1}r_1 + g_{T2}r_2 \end{cases} \quad (۲۲)$$

تعاریف مربوط به g_{T2}, g_{T1}, f_{T1} در پیوست ۲ مقاله آمده است.

مقادیر r_1 و r_2 ورودی‌های کنترل سیستم می‌باشند. هدف تعیین سیگنال‌های r_1 و r_2 برای بهبود پایداری سیستم تک ماشین می‌باشد. در اینجا از فرض کنترل با فاز ثابت ۹۰ درجه برای تزریق بیشترین توان استفاده شده است، این فرض باعث می‌شود ورودی r_1 حذف، و معادلات سیستم به صورت (۲۳) به دست آید.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1.3}E_1}{M_1}x_3 \\ \dot{x}_3 = f_{T1} + g_{T2}r_2 \end{cases} \quad (۲۳)$$

در این معادلات باید g_{T2} محدود و در حوالی صفر باشند.

۳-۱-۱- کنترل غیرخطی بازگشتی

کلیات استفاده از این روش در مرجع [۲۶] آورده شده است. در اینجا هدف کنترلی شامل همگرایی زوایه روتور ژنراتور و در نتیجه همگرایی سرعت زاویه‌ای به مقدار مرجع به گونه‌ای که نوسانات بعد از رفع خطا دارای دامنه کم و میرایی سریع باشند. با طراحی یک کنترل‌کننده به روش بازگشتی طبق مرجع استفاده شده برای سیستم قدرت تک ماشین ورودی کنترل به دست می‌آید.

$$r_2 = \frac{1}{g_{T2}} \left(-f_{T1} + \dot{x}_{3s} + \frac{B_{1.3}E_1}{M_1}z_1 - K_{s1}z_2 \right) \quad (۲۴-۱)$$

کوکتوویچ و همکارانش برای طراحی کنترلرهای پایدارکننده جهت کلاس خاصی از سیستم‌های پویای غیرخطی توسعه یافته است [۳۵]. این سیستم‌ها از زیرسیستم‌هایی ساخته شده‌اند که از یک زیرسیستم غیرقابل تقلیل که می‌تواند با استفاده از روش‌های دیگر پایدار شود، ایجاد می‌شوند. به دلیل وجود این ساختار بازگشتی، طراح می‌تواند فرایند طراحی را از سیستمی که می‌داند پایدار است شروع کند و بعد به کنترل‌کننده‌های جدیدی که هر زیرسیستم بیرونی را پایدار می‌کنند بپردازد (بازگشت به عقب). این فرایند زمانی که به کنترل نهایی برسد، پایان می‌یابد. بنابراین، این فرایند را با نام پسگام نامگذاری می‌کنند [۳۴].

روش پسگام یک روش بازگشتی برای پایدارسازی مبدا یک سیستم در قالب بازخوردی صریح ارائه می‌کند. در مرجع [۳۴] روش طراحی کنترل‌کننده غیرخطی پسگام برای سیستم تک ورودی بیان شده است. در اینجا روش طراحی کنترل‌کننده پسگام برای سیستم چند ورودی بیان می‌شود [۳۶]، سیستمی را در قالب زیر در نظر بگیرید:

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= f_1(X_1) + G_1(X_1)X_2 \\ \dot{X}_2 &= f_2(X_1, X_2) + G_2(X_1, X_2)U \end{aligned} \quad (۱۶)$$

که در آن $X_1 \in R^n$ ، $X_2 \in R^m$ و $U \in R^m$ که m بزرگتر از یک می‌باشد. فرض کنید که f_1, f_2, G_1, G_2 توابع هموار و معین در ناحیه جذب می‌باشند و f_1 و f_2 به مقدار صفر میل می‌کنند و ماتریس G_2 با ابعاد $m \times m$ یک ماتریس غیرویژه باشد، فرض کنید که رابطه (۱۶) با یک کنترل‌کننده فیدبک حالت به صورت $X_2 = \Phi(X_1)$ که در آن شرط $\Phi(0) = 0$ برقرار است پایدار شود و با دانستن اینکه $V(X_1)$ یک تابع هموار مثبت معین است با شرط:

$$\frac{dV}{dX_1} [f_1(X_1) + G_1(X_1)\Phi(X_1)] \leq -W(X_1) \quad (۱۷)$$

که در رابطه (۱۷) $W(X_1)$ یک ماتریس مثبت معین می‌باشد. با تعریف یک متغیر میانی به صورت $Z_1 = X_2 - \Phi(X_1)$ اگر یک کاندیدای لیاپانف برای کل سیستم به صورت:

$$V_a = V(X_1) + \frac{1}{2}[Z_1]^T[Z_1]$$

در نظر گرفته شود با مشتق‌گیری از آن به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{V}_a &= \frac{dV}{d\eta} [f_1 + G_1\Phi] + \frac{dV}{dX_1} G_1(Z_1) \\ &\quad + [Z_1]^T \left[f_2 + G_2 - \frac{d\Phi}{dX_1} (f_1 + G_1X_2) \right] \end{aligned} \quad (۱۸)$$

و در نهایت ورودی کنترلی به صورت رابطه (۱۹) به دست می‌آید.

$$u = G_2^{-1} \left[\frac{d\Phi}{dX_1} (f_1 + G_1X_2) - \left(\frac{dV}{dX_1} G_1 \right)^T - f_2 - kZ_1 \right] \cdot k \quad (۱۹)$$

$$> 0$$

با بسط دادن روش فوق برای سیستم‌های اکیدافیدبکی به فرم زیر:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f_0(x) + g_0(x)z_1 \\ \dot{z}_1 &= f_1(x, z_1) + g_1(x, z_1)z_2 \end{aligned}$$

در این رابطه k_d ، k_T و K_{s1} مقادیر مثبت می‌باشد و تعریف z_1 ، z_2 و

$\dot{x}_{3s}$ به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{cases} z_1 = x_2 - k_d x_1 \\ z_2 = x_3 - x_{3s} \\ \dot{x}_{3s} = \frac{M_1}{B_{1,3}E_1} [x_2(1 + k_T k_d) + (\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1,3}E_1}{M_1} x_3)(k_T + k_d)] \end{cases} \quad (24-2)$$

۳-۲- طراحی کنترل کننده پسگام چند ورودی برای چند

ماشینه

برای طراحی کنترل کننده پسگام دو ورودی در سیستم چند ماشینه با استفاده معادلات دینامیکی (۱۵)، ابتدا تغییر متغیرهای رابطه (۲۵) انجام می‌شود. در سیستم ۹ با سه شکل (۵)، فرض شده که زاویهی ژنراتور ۱ تغییرات نداشته باشد و زاویه ولتاژ داخلی این ژنراتور به عنوان مرجع در نظر گرفته شود، در نتیجه زاویه داخلی سایر ژنراتورها نسبت به این ژنراتور در نظر گرفته می‌شود.

$$\begin{cases} x_1 = \delta_2 - \delta_{02} \\ x_2 = \delta_3 - \delta_{03} \\ x_3 = \omega_2 - \omega_{01} \\ x_4 = \omega_3 - \omega_{02} \\ x_5 = V_7 \sin(\delta_2 - \Phi_7) \\ x_6 = V_9 \sin(\delta_3 - \Phi_9) \end{cases} \quad (25)$$

معادلات دینامیکی در مختصات جدید به صورت (۲۶) می‌باشد که فرم مناسب برای استفاده از روش بازگشتی چند ورودی است.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 \\ \dot{x}_2 = x_4 \\ \dot{x}_3 = \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1,3}E_1}{M_1} x_5 \\ \dot{x}_4 = \frac{P_{m2}}{M_2} - \frac{B_{2,4}E_2}{M_2} x_6 \\ \dot{x}_5 = f_{T1} + g_{T1}r_1 + g_{T2}r_2 \\ \dot{x}_6 = f_{T2} + g_{T3}r_1 + g_{T4}r_2 \end{cases} \quad (26)$$

تعاریف مربوط به f_{T1} ، f_{T2} ، g_{T1} ، g_{T2} ، g_{T3} ، g_{T4} در پیوست ۲ مقاله آمده است. مقادیر r_1 و r_2 ورودی‌های کنترل سیستم می‌باشند، هدف تعیین سیگنال‌های r_1 و r_2 برای بهبود پایداری سیستم چند ماشینه می‌باشد. در این معادلات باید g_{T1} ، g_{T2} ، g_{T3} ، g_{T4} محدود و در حوالی صفر باشند. در اینجا هدف کنترلی شامل همگرایی زوایای روتور ژنراتورهای ۲ و ۳ و سرعت زاویه‌ای آنها به مقادیر مرجع به گونه‌ای که نوسانات بعد از رفع خطا سریع و با دامنه کم میرا شوند.

برای طراحی کنترل کننده پسگام چند ورودی ابتدا معادلات حالت به فرم استاندارد بیان شده در رابطه (۲۶) تبدیل می‌شود. ماتریس‌های زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{cases} X_1 = [x_1 \ x_2]^T \\ X_2 = [x_3 \ x_4]^T \\ X_3 = [x_5 \ x_6]^T \\ U = [r_1 \ r_2]^T \end{cases} \quad (27)$$

بعد از تعاریف (۲۷) فرم معادلات به صورت به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1) + G_1(X_1)X_2 \\ \dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + G_2(X_1, X_2)X_3 \\ \dot{X}_3 = f_3(X_1, X_2, X_3) + G_3(X_1, X_2, X_3)U \end{cases} \quad (28)$$

و در روابط (۲۸):

$$f_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot f_2 = \begin{bmatrix} \frac{P_{m1}}{M_1} \\ \frac{P_{m2}}{M_2} \end{bmatrix} \cdot f_3 = \begin{bmatrix} f_{T1} \\ f_{T2} \end{bmatrix}$$

$$G_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot G_2 = \begin{bmatrix} -\frac{B_{1,3}E_1}{M_1} & 0 \\ 0 & -\frac{B_{2,4}E_2}{M_2} \end{bmatrix} \cdot G_3 = \begin{bmatrix} g_{T1} & g_{T2} \\ g_{T3} & g_{T4} \end{bmatrix}$$

با تعریف ماتریس مثبت معین K_D تعریف می‌شود:

$$\begin{cases} Z_1 = X_2 - K_D X_1 \\ Z_2 = X_3 - X_{3s} \end{cases} \quad (29)$$

که در آن $Z_2 = [z_3 \ z_4]^T$ ، $Z_1 = [z_1 \ z_2]^T$ و $K_D = \begin{bmatrix} K_{d1} & 0 \\ 0 & K_{d2} \end{bmatrix}$ ، از بسط دادن روابط (۲۹):

$$\begin{cases} z_1 = x_3 + K_{d1}x_1 \\ z_2 = x_4 + K_{d2}x_2 \\ z_3 = x_5 - x_{5s} \\ z_4 = x_6 - x_{6s} \end{cases} \quad (30)$$

با انتخاب متغیرهای (۳۰) برای طراحی کنترل کننده مشتق‌زمانی این متغیرها به صورت (۳۱) به دست می‌آید.

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1,3}E_1}{M_1} x_5 + K_{d1}x_1 \\ \dot{z}_2 = \frac{P_{m2}}{M_2} - \frac{B_{2,4}E_2}{M_2} x_6 + K_{d2}x_2 \\ \dot{z}_3 = f_{T1} + g_{T1}r_1 + g_{T2}r_2 - \dot{x}_{5s} \\ \dot{z}_4 = f_{T2} + g_{T3}r_1 + g_{T4}r_2 - \dot{x}_{6s} \end{cases} \quad (31)$$

در ادامه یک تابع لیاپانف مثبت معین به صورت رابطه (۳۲) تعریف می‌شود.

$$V = \frac{1}{2}X_1X_1^T + \frac{1}{2}Z_1Z_1^T + \frac{1}{2}Z_2Z_2^T \quad (32)$$

فرم گسترده آن به صورت (۳۳) به دست می‌آید.

$$V = \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}z_1^2 + \frac{1}{2}z_2^2 + \frac{1}{2}z_3^2 + \frac{1}{2}z_4^2 \quad (33)$$

از تابع لیاپانف پیشنهادی مشتق‌گیری می‌شود و پس از ساده‌سازی به- دست می‌آید:

$$\begin{aligned} \dot{V} = & -K_{d1}x_1^2 - K_{d2}x_2^2 \\ & + z_1 \left(x_1 + \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1,3}E_1}{M_1} x_{5s} \right. \\ & \left. + K_{d1}x_3 \right) \\ & + z_2 \left(x_2 + \frac{P_{m2}}{M_2} - \frac{B_{2,4}E_2}{M_2} x_{6s} \right. \\ & \left. + K_{d2}x_4 \right) + z_3 \left(\dot{z}_3 - \frac{B_{1,3}E_1}{M_1} z_1 \right) \\ & + z_4 \left(\dot{z}_4 - \frac{B_{2,4}E_2}{M_2} z_2 \right) \end{aligned} \quad (34)$$

برای آنکه شرط همگرایی مجانبی تحقق پیدا کند باید مشتق تابع لیاپانف فوق منفی معین باشد برای این امر باید قیود زیر را در نظر گرفت:

تعیین ورودی‌های کنترل Φ_{SR} و V_{SR}

پس از تعیین مقادیر کنترلی r_1 و r_2 می‌توان u_1 و u_2 را با انتگرال-گیری تعیین نمود و با توجه به تعاریف u_1 و u_2 در بخش (۲-۳) می‌توان مقادیر m_{SR} و Φ_{SR} را تعیین نمود.

$$V_{SR} = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} \quad (42)$$

$$\Phi_{SR} = \tan^{-1} \left(\frac{u_2}{u_1} \right) \quad (43)$$

با به‌دست آمدن مقادیر V_{SR} و Φ_{SR} می‌توان مقادیر V_{sh} و Φ_{sh} برای مبدل موازی UPFC به‌دست آورد. با برابر قرار دادن توان اکتیو جذب‌شده توسط مبدل موازی UPFC و توان اکتیو تزریق‌شده توسط مبدل سری UPFC و همچنین صفر بودن توان راکتیو مبدل موازی می‌توان نوشت:

$$Q_{sh} = \frac{V_3^2}{X_{SH}} - \frac{V_3 V_{sh}}{X_{SH}} \cos(\Phi_3 - \Phi_{sh}) = 0$$

$$P_{sh} = \frac{P_{SR}}{X_{SH}} \sin(\Phi_3 - \Phi_{sh})$$

$$\Phi_{sh} = \Phi_3 - \tan^{-1} \left(\frac{X_{SH} P_{SR}}{V_3^2} \right) \quad (44)$$

$$V_{sh} = \sqrt{V_3^2 + \left(\frac{X_{SH} P_{SR}}{V_3} \right)^2} \quad (45)$$

در قسمت شبیه‌سازی دیاگرام کنترلی سیستم به‌طور خلاصه آورده شده است.

۴- شبیه‌سازی و نتایج

در این قسمت کنترل‌کننده پیشنهادشده ابتدا برای یک سیستم قدرت تک ماشینه متصل به شین بینهایت، و سپس برای سیستم قدرت ۹ باسه استاندارد، با استفاده از نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی می‌شود. نتایج به‌دست آمده با یک کنترل‌کننده خطی طراحی‌شده براساس مرجع شماره ۳۷ مقایسه می‌شود.

۴-۱- مراحل اجرای روش بکاررفته در شبیه‌سازی برای کنترل-

کننده پسگام دو ورودی

۱- انجام پخش بار با حضور UPFC و استخراج مقادیر کار سیستم

۲- به‌دست آوردن ماتریس‌های C و K از معادله‌ی ماتریسی (۸)

۳- تشکیل معادلات حالت سیستم طبق روابط (۱۵)

۴- انجام تغییر متغیرهای روابط (۱۷)

۵- تشکیل روابط $f_{T1}, f_{T2}, g_{T1}, g_{T2}, g_{T3}, g_{T4}$

۶- به‌دست آوردن $\dot{x}_{5s}$ و $\dot{x}_{6s}$ از حل روابط (۴۱)

۷- به‌دست آوردن z_1, z_2, z_3, z_4 از حل معادلات (۳۱)

۸- به‌دست آوردن و بروزرسانی ورودی‌های کنترل با استفاده از روابط

(۳۹) و (۴۰)

$$\begin{cases} x_1 + \frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} x_{5s} + K_{d1}x_3 = -K_{T1}z_1 \\ x_2 + \frac{P_{m2}}{M_2} - \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} x_{6s} + K_{d2}x_4 = -K_{T2}z_2 \\ \dot{z}_3 - \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} z_1 = -K_{s1}z_3 \\ \dot{z}_4 - \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} z_2 = -K_{s2}z_4 \end{cases} \quad (35)$$

با در نظرگرفتن قیود (۳۵) تابع لیاپانف سیستم به‌صورت (۳۶) به‌دست می‌آید، در اینجا چون پارامترهای در نظر گرفته‌شده $K_{d1}, K_{d2}, K_{T1}, K_{T2}, K_{s1}, K_{s2}$ مقادیر مثبت هستند و متغیرهای $x_1, x_2, x_3, x_4, z_1, z_2, z_3, z_4$ در مشتق تابع لیاپانف با توان ۲ وجود دارند و توابعی همواره مثبت هستند لذا تابع $\dot{V}$ یک تابع منفی معین است و با این شرایط پایداری مجانبی تضمین می‌شود [۲۹].

$$\dot{V} = -K_{d1}x_1^2 - K_{d2}x_2^2 - K_{T1}z_1^2 - K_{T2}z_2^2 - K_{s1}z_3^2 - K_{s2}z_4^2 \quad (36)$$

از روابط (۳۵) روابط (۳۷) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} x_{5s} = \frac{M_1}{B_{1.3}E_1} \left(K_{T1}z_1 + K_{d1}x_3 + x_1 + \frac{P_{m1}}{M_1} \right) \\ x_{6s} = \frac{M_2}{B_{2.4}E_2} \left(K_{T2}z_2 + K_{d2}x_4 + x_2 + \frac{P_{m2}}{M_2} \right) \\ \dot{z}_3 = \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} z_1 - K_{s1}z_3 \\ \dot{z}_4 = \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} z_2 - K_{s2}z_4 \end{cases} \quad (37)$$

برای به‌دست آوردن ورودی کنترل روابط سوم و چهارم (۳۱) را با روابط سوم و چهارم (۳۷) برابر قرار داده و به‌دست می‌آید:

$$\begin{cases} \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} z_1 - K_{s1}z_3 = f_{T1} + g_{T1}r_1 + g_{T2}r_2 - \dot{x}_{5s} \\ \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} z_2 - K_{s2}z_4 = f_{T2} + g_{T3}r_1 + g_{T4}r_2 - \dot{x}_{6s} \end{cases} \quad (38)$$

در نتیجه ورودی‌های کنترل به‌صورت روابط (۳۹) به‌دست می‌آید.

$$\begin{cases} r_1 = \frac{1}{G_T} (A_1 g_{T4} - A_2 g_{T2}) \\ r_2 = \frac{1}{G_T} (A_2 g_{T1} - A_1 g_{T3}) \end{cases} \quad (39)$$

در روابط (۳۹) تعریف می‌شود:

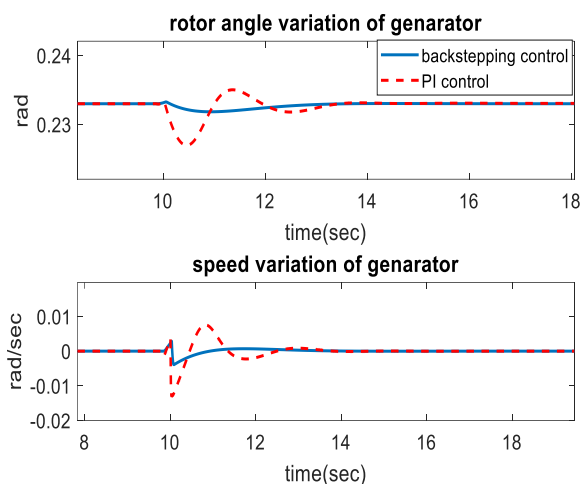
$$\begin{cases} G_T = g_{T1}g_{T4} - g_{T2}g_{T3} \\ A_1 = \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} z_1 - K_{s1}z_3 - f_{T1} + \dot{x}_{5s} \\ A_2 = \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} z_2 - K_{s2}z_4 - f_{T2} + \dot{x}_{6s} \end{cases} \quad (40)$$

با مشتق‌گیری از روابط اول و دوم (۳۷) و ساده‌سازی برای $\dot{x}_{5s}$ و $\dot{x}_{6s}$:

$$\begin{aligned} \dot{x}_{5s} &= \frac{M_1}{B_{1.3}E_1} [x_3(1 + K_{T1}K_{d1}) + \left(\frac{P_{m1}}{M_1} - \frac{B_{1.3}E_1}{M_1} x_5 \right) (K_{T1} + K_{d1})] \\ \dot{x}_{6s} &= \frac{M_2}{B_{2.4}E_2} [x_4(1 + K_{T2}K_{d2}) + \left(\frac{P_{m2}}{M_2} - \frac{B_{2.4}E_2}{M_2} x_6 \right) (K_{T2} + K_{d2})] \end{aligned} \quad (41)$$

۴-۴- شبیه‌سازی سیستم قدرت ۹ باسه استاندارد

هدف کنترل‌کننده، میرا کردن نوسانات ژنراتور ۲ و ۳ بعد از رفع خطای اتصال کوتاه می‌باشد. مشخصات سیستم قدرت شبیه‌سازی شده و UPFC در جدول (۱)، (۲)، (۳) و (۴) در پیوست ۲ آورده شده است. مدل استفاده‌شده برای ژنراتورهای قدرت مدل مرتبه ۲ با متغیرهای حالت δ و ω می‌باشد. بار به صورت امپدانس ثابت مدل شده است.



شکل ۸: سرعت زاویه ای و زاویه روتور ژنراتور بعد از رفع خطای اتصال کوتاه در باس ۳

۴-۵- مقایسه عملکرد کنترل‌کننده پسگام چند ورودی و کنترل‌کننده خطی

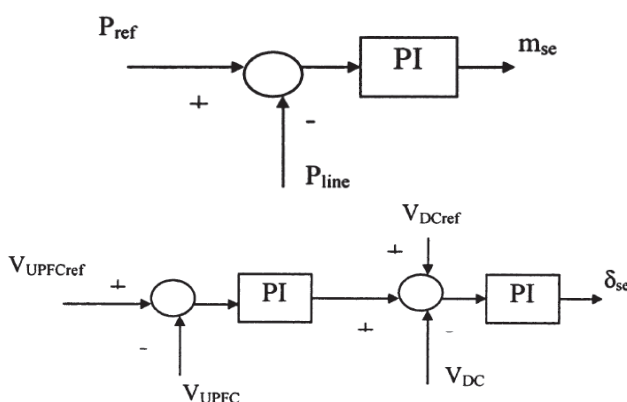
در شکل (۷) دیاگرام کلی کنترل‌کننده پسگام نشان داده شده است. این بلوک دیاگرام از دو بخش تشکیل شده است که شامل سیستم قدرت ۹ باسه استاندارد به همراه UPFC و باس‌های متصل‌شده به آن، و قسمت دوم کنترل‌کننده غیرخطی پسگام چند ورودی می‌باشد. کنترل‌کننده براساس مراحل بیان‌شده در بخش (۴-۱) عمل کرده و ورودی‌های مورد نیاز برای UPFC را تامین می‌کند.

برای انجام شبیه‌سازی فرض شده است که سیستم برای حدود ۴ ثانیه در آرامش باشد، سپس یک خطای سه فاز اتصال کوتاه به زمین در باس شماره ۷ نزدیک به ژنراتور شماره ۲ رخ می‌دهد. فرض می‌شود خطا بعد از ۰/۱۵ ثانیه برطرف شده و توپولوژی سیستم تغییری نمی‌کند. از آنجایی که در یک سیستم چند ماشینه یکی از معیارهای پایداری، همگرایی اختلاف زاویه ژنراتورها نسبت به یکدیگر دارای اهمیت است، و در اینجا ژنراتور شماره ۱ به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است، پس معیار پایداری، پایداری زاویه داخلی سایر ژنراتورها نسبت به ژنراتور شماره ۱ می‌باشد. در شکل (۹) تغییرات زاویه رتور ژنراتور ۲ در حضور کنترل‌کننده غیرخطی پسگام و کنترل‌کننده خطی نشان داده شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که دامنه نوسانات، در کنترل‌کننده غیرخطی بسیار کمتر و همچنین مدت زمان رسیدن به نقطه تعادل با کنترل‌کننده طراحی‌شده نسبت به کنترل‌کننده خطی

۹- حل معادلات دیفرانسیل سیستم با استفاده از روابط (۱۵)، با در نظر گرفتن ورودی‌های تعیین‌شده و بروزرسانی حالت‌های سیستم.

۴-۲- اجرای شبیه‌سازی کنترل‌کننده خطی

برای نشان دادن عملکرد کنترل‌کننده طراحی شده ابتدا سیستم قدرت تحت بررسی، با کنترل‌کننده خطی شبیه‌سازی، و نتایج با کنترل‌کننده پسگام طراحی‌شده در این مقاله مقایسه می‌گردد. کنترل خطی طراحی شده برای ورودی‌های UPFC از نوع انتگرالی تناسبی (PI) می‌باشد [۳۷]. در شکل‌های (۶) دیاگرام کنترل مبدل سری UPFC نشان داده شده است.

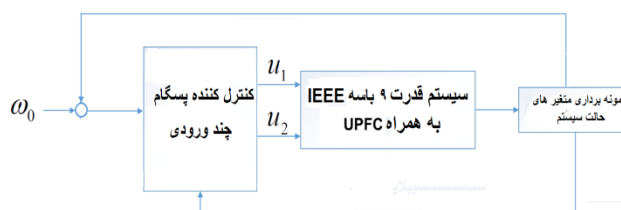


شکل ۶: دیاگرام کنترل UPFC با استفاده از کنترل‌کننده PI [۳۷]

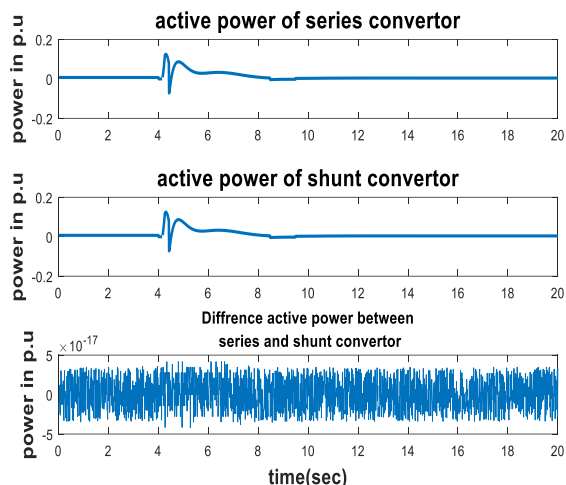
۴-۳- شبیه‌سازی سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت

کنترل‌کننده پسگام ارائه‌شده در قسمت (۳-۱-۳) برای سیستم قدرت شکل (۴) شبیه‌سازی شده است. نتایج شبیه‌سازی مربوط به این کنترل‌کننده با کنترل‌کننده خطی مرجع ۳۷ مقایسه شده است. مشخصات مربوط به سیستم قدرت تک ماشینه و UPFC در پیوست ۱ آورده شده است. فرض می‌شود سیستم ۱۰ ثانیه در حالت آرامش است و در ثانیه ۱۰ یک خطای اتصال کوتاه به مدت ۱۵۰ میلی‌ثانیه بر روی باس شماره ۳ اتفاق می‌افتد. در شکل (۸) نتایج مربوط به تغییرات زاویه داخلی ژنراتور، و همچنین تغییرات سرعت زاویه‌ای ژنراتور با کنترل‌کننده پسگام و خطی در برابر خطای اتصال کوتاه نشان داده شده است.

در این دو شکل ملاحظه می‌شود که کنترل‌کننده غیرخطی با سرعت بیشتری همگرا شده و دامنه نوسانات آن نسبت به کنترل‌کننده خطی خیلی کمتر است. برای شبیه‌سازی سیستم قدرت تک ماشینه به همین دو شکل اکتفا می‌شود و شکل‌های بیشتر در بخش کنترل‌کننده چند ماشینه آورده شده است.



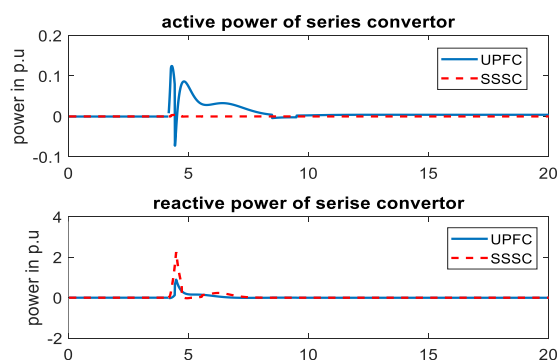
شکل ۷: بلوک دیاگرام کلی سیستم با کنترل‌کننده



شکل ۱۱: توان اکتیو مبدل های سری و موازی UPFC و اختلاف بین این دو توان

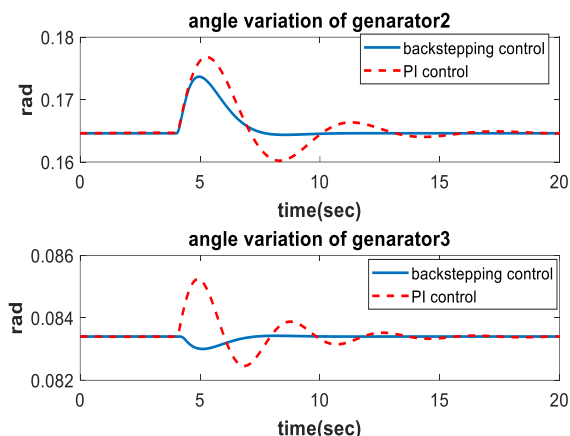
۴-۶- مقایسه عملکرد کنترل کننده UPFC در این مطالعه با SSSC

چون در این مطالعه طراحی کنترل کننده غیرخطی به روش بازگشتی با در نظر گرفتن مدل تزریقی UPFC بر روی ورودی های کنترل مبدل سری انجام شده ممکن است، این سوال پیش آید که چرا در اینجا از SSSC استفاده نشده است، به همین منظور خطای اتصال کوتاه رخ داده در بخش قبل با همان کنترل کننده غیرخطی پسگام یکبار در حضور UPFC و یکبار در حضور SSSC^۷ بررسی شده است. نتایج این مقایسه در شکل های (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده است. شکل (۱۳) توان راکتیو مبدل سری را نشان می دهد. در این شکل ملاحظه می شود که با وجود خطای اتصال کوتاه در باس ۷ حداکثر توان راکتیو UPFC از 0.8 pu تجاوز نمی کند اما در SSSC چون توان اکتیو همواره صفر است، در نتیجه کارایی آن در میراسازی نوسانات نسبت به UPFC بسیار کمتر می شود. همان طور که در شکل (۱۲) دیده می شود توان راکتیو SSSC برای میرایی نوسانات باید تا 2.4 pu بالا رود که عملاً غیرممکن است. باوجود این تغییرات در توان راکتیو (در صورت امکان) با توجه به شکل (۱۳) ملاحظه می شود که باز هم این عنصر توانایی ضعیف تری نسبت به UPFC برای میرایی نوسانات در این سیستم قدرت دارد.

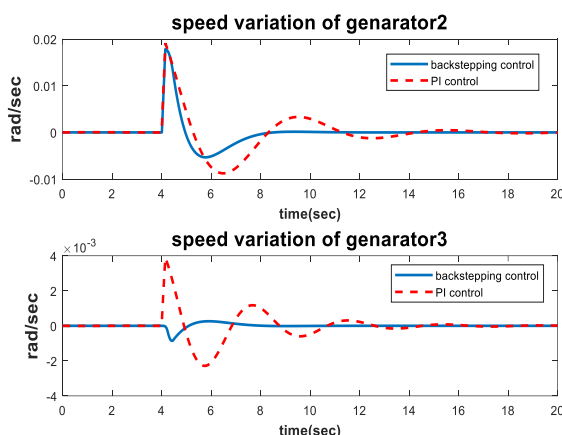


شکل ۱۲: تغییرات توان اکتیو کنترل کننده های UPFC و SSSC بعد از خطای اتصال کوتاه

بسیار کمتر است. مثلاً دامنه تغییرات زاویه ژنراتور ۲ برای کنترل کننده پسگام کمتر از 0.1° رادیان است در حالی که این میزان تغییرات برای کنترل کننده خطی بین -0.16° و 0.178° رادیان می باشد، همچنین مدت زمان رسیدن به حالت تعادل با کنترل کننده پسگام حدود ۴ ثانیه است در حالی که این زمان با کنترل کننده خطی حدود ۱۰ ثانیه می باشد.



شکل ۹: زاویه بین ژنراتورهای ۲ و ۳ با کنترل کننده پسگام چند ورودی و با کنترل کننده خطی



شکل ۱۰: سرعت زاویه ای ژنراتور ۲ و ۳ با استفاده از کنترل کننده پسگام چند ورودی و کنترل کننده خطی

در شکل های (۱۰) تغییرات سرعت زاویه ای ژنراتورهای ۲ و ۳ مشاهده می شود، ملاحظه می شود حداکثر دامنه تغییرات سرعت زاویه ای، تعداد نوسانات و زمان رسیدن به تعادل در ژنراتورهای ۲ و ۳ در کنترل پسگام کمتر از کنترل کننده خطی است. در شکل (۱۱) توان های اکتیو مربوط به مبدل های سری و موازی UPFC و اختلاف این دو توان نشان داده شده است، در این شکل ها ملاحظه می شود که توان جذب شده توسط مبدل موازی از باس شماره ۴ برابر با توان تزریق شده به باس شماره ۵ توسط مبدل سری می باشد. (با فرض صفر در نظر گرفتن تلفات UPFC).

ملاحظه شد با توجه به نتایج شبیه‌سازی انجام‌شده با کنترل‌کننده طراحی‌شده و مقایسه با کنترل‌کننده خطی نشان داده شد که:

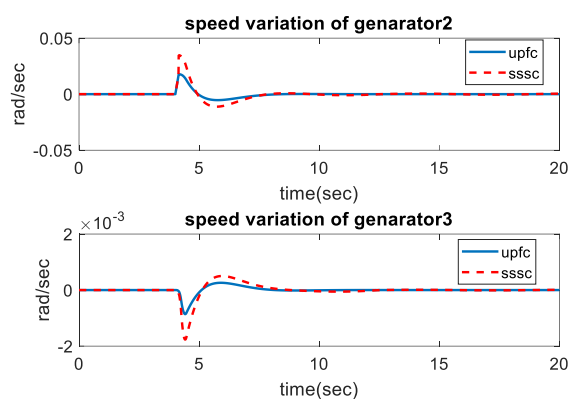
۱- عملکرد کنترل‌کننده غیرخطی پیشنهادشده در دامنه نوسانات و سرعت میرا کردن نوسانات بعد از رفع خطا به‌طور محسوس برتری دارد.

۲- برای نشان‌دادن آنکه با تبدیل ۴ ورودی UPFC به دو ورودی شاید به‌نظر برسد که این سیستم همان SSSC است، مقایسه‌ای بین عملکرد UPFC و SSSC انجام شد که در نتیجه مزیت استفاده از UPFC به‌خاطر توانایی جابجایی توان اکتیو بین شاخه سری و موازی (علیرغم کنترل دو ورودی) نشان داده شد.

۳- به‌علت مقاوم‌بودن کنترل‌کننده پسگام، نشان داده شد که با تغییر راکتانس خط انتقال عملکرد کنترل‌کننده پسگام برای سرعت ژنراتور نسبت به کنترل‌کننده خطی بسیار بهتر است. در کنترل‌کننده پسگام پس از تغییر راکتانس، سرعت ژنراتور بعد از مدت زمان تقریباً ۲ ثانیه پایدار می‌شود اما در سیستم تحت کنترل‌کننده خطی دامنه و زمان نوسانات تا رسیدن به حالت پایدار بیش از ۲ برابر است.

مراجع

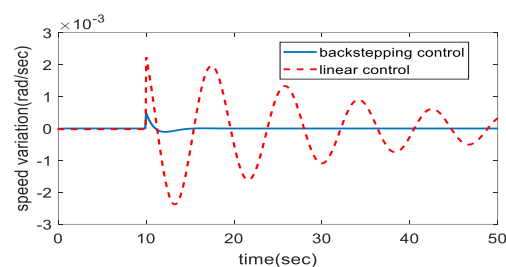
- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control," New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [2] A. Karimi and A. Feliachi, "Decentralized adaptive backstepping control of electric power systems," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 78, no. 3, pp. 484-493, Mar. 2008.
- [3] C. A. King, J. W. Chapman, and M. D. Ilic, "Feedback linearizing excitation control on a full-scale power system model," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 9, no. 2, pp. 1102-1109, May 1994.
- [4] M. A. Mahmud, H. R. Pota, M. Aldeen, and M. J. Hossain, "Partial feedback linearizing excitation controller for multimachine power systems to improve transient stability," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 29, no. 2, pp. 561-571, Mar. 2014.
- [5] M. A. Mahmud, "An alternative LQR-based excitation controller design for power systems to enhance small-signal stability," *Int. J. Elect. Power Energy Syst.*, vol. 63, pp. 1-7, Dec. 2014.
- [6] C. Mao, O. P. Malik, G. S. Hope, and J. Fan, "An adaptive generator excitation controller based on linear optimal control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 5, no. 4, pp. 673-678, Dec. 1990.
- [7] S. Jain, F. Khorrami, and B. Fardanesh, "Adaptive nonlinear excitation control of power systems with unknown interconnections," *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 2, no. 4, pp. 436-446, Dec. 1994.
- [8] J. Hossain, A. Mahmud, N. K. Roy, and H. R. Pota, "Enhancement of transient stability limit and voltage regulation with dynamic loads using robust excitation control," *Int. J. Emerg. Power Syst.*, vol. 14, no. 6, pp. 561-570, 2013.
- [9] Wenjuan Du¹, Xiao Chen¹, Haifeng Wang¹, "Parameter tuning of the PLL to consider the effect on power system small-signal angular stability," *IET Renew. Power Gener.*, Vol. 12 Iss. 1, pp. 1-8, 2018.
- [10] Y. Liu, Q. H. Wu, H. Kang, X. Zhou, "Switching Power System Stabilizer and Its Coordination for Enhancement of Multi-machine Power System Stability," *CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS*, VOL. 2, NO. 2, JUNE 2016.
- [11] T. Kanti Roy, M.A. Mahmud, W. Shen, Amanullah M.T, "Non-linear adaptive coordinated controller design for multimachine power systems to improve transient stability," *IET Gener. Transm. Distrib.*, Vol. 10, Iss. 13, pp. 3353-3363, 2016.
- [12] Z. Ni, Y. Tang, X. Sui, H. He, J. Wen, "An adaptive neuro-control approach for multi-machine power systems," *Electrical Power and Energy Systems* 75, pp.108-116, 2016



شکل ۱۳: تغییرات سرعت ژنراتورهای ۲ و ۳ بعد از خطای اتصال کوتاه با SSSC و UPFC

۴-۷- بررسی مقاوم بودن کنترل‌کننده بازگشتی چند ورودی نسبت به کنترل‌کننده خطی

در این قسمت برای نشان‌دادن مقاوم‌بودن کنترل‌کننده غیرخطی طراحی‌شده نسبت به تغییر پارامترها فرض می‌شود راکتانس خط انتقال بین باس‌های شماره ۷ و ۵ در حدود ۱۵ درصد از مقدار نامی خود تغییرات داشته باشد (این تغییرات می‌تواند ناشی از اضافه و کم شدن خطوط انتقال موازی و یا در طولانی مدت ناشی از اثرات محیطی باشد). با وجود این تغییرات عملکرد کنترل‌کننده برای میرایی نوسانات سرعت ژنراتور ۲ در شکل (۱۴) با کنترل‌کننده پسگام و کنترل‌کننده خطی، نشان داده شده است. در اینجا ملاحظه می‌شود که با تغییر راکتانس، تغییرات سرعت ژنراتور با کمی نوسان در حضور کنترل‌کننده پسگام، به مقدار صفر می‌رسد اما در حالت کنترل‌کننده خطی سیستم نوسانی و مدت زمان رسیدن به نقطه تعادل بسیار زیاد می‌شود و عملاً کنترل‌کننده خطی در مواجهه با این تغییر پارامتر ناتوان می‌باشد.



شکل ۱۴: تغییرات سرعت ژنراتور ۲ بر اثر تغییر راکتانس سری در حضور کنترل‌کننده بازگشتی چند ورودی و کنترل‌کننده خطی

۵- نتیجه‌گیری

در این مطالعه یک کنترل‌کننده غیرخطی پسگام چند ورودی برای بهبود میراسازی نوسانات سیستم قدرت چند ماشینه در حضور کنترل‌کننده UPFC طراحی شد. با استفاده از مدل تزریقی UPFC تعداد ورودی‌ها از ۴ ورودی به ۲ ورودی یعنی دامنه ولتاژ مبدل سری و فاز مبدل سری کاهش یافت. روش به‌کاررفته برای طراحی کنترل‌کننده پسگام از نوع چندورودی برای یک سیستم چند ماشینه اجرا شد. همان‌طور که

- [32] Mehraeen, S., Jagannathan, S., Crow, M. L., "Novel dynamic representation and control of power systems with FACTS devices," IEEE Transactions on Power Systems, vol.25, no.3, pp.1542-1554, 2010.
- [33] Jose. P. Therattil, P.C.Panda, "Modeling and Control of a Multi-Machine Power System with FACTS Controller", 978-1-4577-1510-5/11©2011 IEEE.
- [34] Z. Ding, "Nonlinear and Adaptive Control Systems", Published by The Institution of Engineering and Technology, London, United Kingdom, First published 2013.
- [35] M.ristic, I.Kanellakopoulos, P.V.Kokotovic, "Nonlinear and Adaptive Control Design", Published by Wiley-interscience, First published June 14, 1995.
- [36] H. K. Khalil, "Nonlinear systems", Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [37] K. Sreenivasachar, S. Jayaram, M.M.A. Salama, "Dynamic stability improvement of multi-machine power system with UPFC", Electric Power Systems Research 55 (2000) 27-35.
- [13] T. Kanti Roy, M. A. Mahmud, W. Shen, and Amanullah M. T, "Nonlinear Adaptive Excitation Controller Design for Multimachine Power Systems With Unknown Stability sensitive Parameters", IEEE TRANSACTIONS ON CONTROL SYSTEMS TECHNOLOGY, 2016.
- [14] X.Liu, Y. Han, "Decentralized multi-machine power system excitation control using continuous higher-order sliding mode technique." Electrical Power and Energy Systems 82, pp.76-86, 2016.
- [15] S. ABAZARI, M. HEIDARI, N.R. ABJADI, "ADAPTIVE CONTROL DESIGN FOR A SYNCHRONOUS GENERATOR," Rev. Roum. Sci. Techn. - Électrotechn. et Énerg., 59, 4, p. 411-421, Bucharest, 2014.
- [16] G. T. Son, H. J. Lee, S.Y. Lee, J. W. Park, "A Study on the Direct Stability Analysis of Multi-Machine Power System With Resistive SFCL," IEEE TRANSACTIONS ON APPLIED SUPERCONDUCTIVITY, VOL. 22, NO. 3, JUNE 2012.
- [17] M.R. Banaei, S.J. S. Shenava, P. Farahbakhsh, "Dynamic stability enhancement of power system based on a typical unified power flow controllers using imperialist competitive algorithm," Ain Shams Engineering Journal 5, pp. 691-702, 2014.
- [18] W. Du1, J. Bi1, C. Lv, T. Littler, "Damping torque analysis of power systems with DFIGs for wind power generation", IET Renewable Power Generation, 2016.

پیوست ۱:

جدول ۱: مشخصات و شرایط اولیه سیستم ۹ با سه استاندارد

$P_3 = 0.85pu$	$P_2 = 1.63pu$	$P_1 = .71pu$
$P_{L8} = 1pu$	$P_{L6} = 0.9pu$	$P_{L5} = 1.25pu$
$Q_{L8} = 0.35pu$	$Q_{L6} = 0.3pu$	$Q_{L5} = 0.5pu$
$V_2 = 1.02$	$\delta_1 = 0$	$V_1 = 1.04$
$\delta_3 = 0.834rad$	$V_3 = 1.02$	$\delta_2 = 0.164rad$
$V_5 = 0.096$	$\varphi_4 = -0.037rad$	$V_4 = .99$
$\varphi_6 = -0.069rad$	$V_6 = 0.97$	$\varphi_5 = -0.105rad$
$V_8 = 0.98$	$\varphi_7 = 0.058$	$V_7 = 0.965$
$\varphi_9 = 0.032rad$	$V_9 = .985$	$\varphi_8 = 0.002rad$
	$f = 60Hz$	$D = 0.0$

جدول ۲: مشخصات ژنراتورهای سیستم ۹ با سه استاندارد

شماره ژنراتور	X_d	X'_d	X_q	H
۱	۰/۱۴۶	۰/۰۶۰۸	۰/۰۶۹۶	۲۳/۶۴
۲	۰/۸۹۵	۰/۱۱۹	۰/۸۶۴	۶/۴
۳	۱/۳۱	۰/۱۸۱۳	۱/۲۵	۳/۱

جدول ۳: مشخصات و شرایط اولیه سیستم ۹ با سه استاندارد

Half admittance	Series reactance	Series resistance	End bus	Start bus
۰	۰/۰۶۲۵	۰	۷	۱
۰/۱۵۳	۰/۱۶۱	۰/۰۳۲	۵	۷
۰/۰۸۸	۰/۰۸۵	۰/۰۱	۴	۵
۰/۰۷۹	۰/۰۹۲	۰/۰۱۷	۶	۴
۰/۱۷۹	۰/۱۷	۰/۰۳۹	۹	۶
۰/۱۰۴	۰/۱۰۸۸	۰/۰۱۱۹	۹	۸
۰/۰۷۴۵	۰/۰۷۲	۰/۰۰۸۵	۷	۸
۰	۰/۰۵۸۶	۰	۹	۳
۰	۰/۰۵۸۶	۰	۴	۱

جدول ۴: مشخصات UPFC

$V_{dc} = 10.0pu$	$X_{SR} = 0.1pu$	$X_{SH} = 0.1pu$
$C_{dc} = 2pu$	$Q_{upfcm} = 3pu$	$P_{upfcm} = .5pu$

[۱۹] سعید ابادری، امید مرادی، بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با کارگری UPFC و تنظیم پارامترهای کنترل کننده بر اساس یک الگوریتم جدید PSO، "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۶، شماره ۱، بهار ۱۳۹۵.

- [20] K. Sreenivasachar, S. Jayaram, M.M.A. Salama, "Dynamic stability improvement of multi-machine power system with UPFC," Electric Power Systems Research 55, pp. 27-37, 2000.
- [21] M. Firouzi, G.B. Gharehpetian, Y. Salami, "Active and reactive power control of wind farm for enhancement transient stability of multi-machine power system using UIPC," IET Renewable Power Generation, June 2017.
- [22] C. Li, J. Deng, X.P. Zhang, "Coordinated Design and Application of Robust Damping Controllers for Shunt FACTS Devices to Enhance Small-signal Stability of Large-scale Power Systems," CSEE JOURNAL OF POWER AND ENERGY SYSTEMS, VOL. 3, NO. 4, DECEMBER 2017.
- [23] A. Khodabakhshian, M. R. Esmaili, M. Bornapour, "Optimal coordinated design of UPFC and PSS for improving power system performance by using multi-objective water cycle algorithm," Electrical Power and Energy Systems 83, pp. 124-133, 2016.
- [۲۴] سعید ابادری، صادق قائدی، بهبود پایداری دینامیکی به روش کنترل فازی در سیستم های قدرت چند ماشینه با حضور TCSC، "مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد 54، شماره ۲، ۱۳۹۳.

- [25] A. Ajami, A.M. Shotorbani, M.P. Aagababa, "Application of the direct Lyapunov method for robust finite-time power flow control with a unified power flow controller," IET Generation, Transmission & Distribution, May 2012.
- [26] Q. Su, W. Quan, W. Quan, G. Cai, J. Li, "Improved robust adaptive backstepping control approach on STATCOM for non-linear power systems," IET Generation, Transmission & Distribution, August 2017.
- [27] J. Sun, H. Zheng, C. L. DeMarco, Y. Chai, "Energy Function Based Model Predictive Control with UPFCs for Relieving Power System Dynamic Current Violation", Transactions on Smart Grid, 2016.
- [28] G. Saravana Ilango, D. Aravindan and C. Nagamani, "Application of Adaptive Back Stepping Control Technique for Damping of Power System Oscillations with UPFC", Fifteenth National Power Systems Conference (NPSC), IIT Bombay, December 2008.
- [29] E. Slotine, W. Li, "Applied Nonlinear Control", Published by Prentice Hall, 1991.
- [30] Kundur, P., "Power System Stability and Control. Ontario," McGraw-Hill, 1994.
- [31] Noroozian, M., Angquist, L., Ghandhari, M., Andersson, G., "Use of UPFC for optimal power flow control", IEEE Transactions on Power Delivery, vol.12, no.4, pp.1629-1634, 1997.

$$\begin{aligned}
 a_{36} &= -B_{93}V_9E_3 \cos(\varphi_9 - \delta_3) + B_{96}V_9V_6 \cos(\varphi_9 - \varphi_6) \\
 &+ B_{98}V_9V_8 \cos(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{37} &= B_{41}E_1 \cos(\varphi_4 - \delta_1) + B_{45}V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) \\
 &+ B_{46}V_6 \cos(\varphi_4 - \varphi_6) - B_{45}u_1; \\
 a_{38} &= +B_{45}V_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 a_{39} &= B_{46}V_4 \cos(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_{40} &= -B_{41}V_4E_1 \sin(\varphi_4 - \delta_1) - B_{45}V_4V_5 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) \\
 &- B_{46}V_4V_6 \sin(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_{41} &= B_{45}V_4V_5 \sin(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 a_{42} &= B_{46}V_4V_6 \sin(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_{43} &= B_{54}V_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_4); \\
 a_{44} &= -2B_5V_5 + B_{54}V_4 \cos(\varphi_5 - \varphi_4) + B_{57}V_7 \cos(\varphi_5 - \varphi_7) + \\
 &B_{45}\{u_1 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) + u_2 \sin(\varphi_4 - \varphi_5)\}; \\
 a_{45} &= B_{57}V_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_7); \\
 a_{46} &= B_{54}V_5V_4 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) + V_5B_{45}\{-u_1 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) \\
 &- u_2 \cos(\varphi_4 - \varphi_5)\}; \\
 a_{47} &= -B_{54}V_5V_4 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) - B_{57}V_5V_7 \sin(\varphi_5 - \varphi_7) \\
 &V_5B_{45}\{u_1 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) + u_2 \cos(\varphi_5 - \varphi_4)\}; \\
 a_{48} &= B_{57}V_5V_7 \sin(\varphi_5 - \varphi_7); \\
 a_{49} &= B_{64}V_6 \cos(\varphi_6 - \varphi_4); \\
 a_{50} &= -2B_6V_6 + B_{64}V_4 \cos(\varphi_6 - \varphi_4) + B_{69}V_9 \cos(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{51} &= B_{69}V_6V_9 \cos(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{52} &= B_{64}V_6V_4 \sin(\varphi_6 - \varphi_4); \\
 a_{53} &= -B_{64}V_6V_4 \sin(\varphi_6 - \varphi_4) - B_{69}V_6V_9 \sin(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{54} &= B_{69}V_6V_9 \sin(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{55} &= B_{75}V_7 \cos(\varphi_7 - \varphi_5); \\
 a_{56} &= B_{72}E_2 \cos(\varphi_7 - \delta_2) + B_{75}V_5 \cos(\varphi_7 - \varphi_5) \\
 &+ B_{78}V_8 \cos(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{57} &= B_{78}V_7 \cos(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{58} &= B_{75}V_7V_5 \cos(\varphi_7 - \varphi_5); \\
 a_{59} &= -B_{72}V_7E_2 \sin(\varphi_7 - \delta_2) - B_{75}V_7V_5 \sin(\varphi_7 - \varphi_5) \\
 &- B_{78}V_7V_8 \sin(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{60} &= B_{78}V_7V_8 \sin(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{61} &= B_{78}V_8 \cos(\varphi_8 - \varphi_7); \\
 a_{62} &= -2B_8V_8 + B_{87}V_7 \cos(\varphi_8 - \varphi_7) + B_{89}V_9 \cos(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{63} &= B_{89}V_9 \cos(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{64} &= B_{87}V_7V_8 \sin(\varphi_8 - \varphi_7); \\
 a_{65} &= -B_{87}V_7V_8 \sin(\varphi_8 - \varphi_7) - B_{89}V_8V_9 \sin(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{66} &= B_{89}V_8V_9 \sin(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{67} &= B_{96}V_9 \cos(\varphi_9 - \varphi_6); \\
 a_{68} &= B_{98}V_9 \cos(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{69} &= B_{93}E_3 \cos(\varphi_9 - \delta_3) + B_{96}V_6 \cos(\varphi_9 - \varphi_6) \\
 &+ B_{98}V_8 \cos(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{70} &= B_{96}V_9V_6 \sin(\varphi_9 - \varphi_6); \\
 a_{71} &= B_{98}V_9V_8 \sin(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{72} &= -B_{93}V_9E_3 \sin(\varphi_9 - \delta_3) - B_{96}V_9V_6 \sin(\varphi_9 - \varphi_6) \\
 &+ B_{98}V_9V_8 \sin(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 b_1 &= -B_{72}V_7E_2 \cos(\varphi_7 - \delta_2); \\
 b_2 &= -B_{93}V_9E_3 \cos(\varphi_9 - \delta_3); \\
 b_3 &= B_{72}V_7E_2 \sin(\varphi_7 - \delta_2); \\
 b_4 &= -B_{93}V_9E_3 \cos(\varphi_9 - \delta_3); \\
 g_1 &= B_{45}V_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 g_2 &= B_{45}V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 g_3 &= B_{45}V_5 \cos(\varphi_5 - \varphi_4); \\
 g_4 &= -B_{45}V_4; \\
 g_5 &= B_{45}V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 g_6 &= -B_{45}V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5); \\
 g_7 &= B_{45}V_5 \sin(\varphi_4 - \varphi_5);
 \end{aligned}$$

جدول ۵: مشخصات سیستم تک ماشین متصل به شین بینهایت

$V_l = 1.0\text{pu}$	$V_T = 1.0\text{pu}$	$P_{l=1.2}\text{pu}$
$T_{d0}' = 5.044\text{s}$	$X_d' = 0.3\text{pu}$	$X_d = 1.0\text{pu}$
$X_{L2} = 0.3\text{pu}$	$X_{L1} = 0.3\text{pu}$	$X_t = 0.1\text{pu}$
$M = 8\text{MJ/MVA}$	$C_{dc} = 2.0\text{pu}$	$V_{dc} = 10.0\text{pu}$
$f = 60\text{Hz}$	$D = 0.0$	$X_q = 0.6\text{pu}$
$G_4 = 1.0\text{pu}$	$B_3 = .2\text{pu}$	$G_3 = .3\text{pu}$
	$D = 0.0$	$B_4 = .4\text{pu}$

پیوست ۲:

$$\begin{aligned}
 a_1 &= B_{41}E_1 \sin(\varphi_4 - \delta_1) + B_{45}V_5 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) + \\
 &B_{46}V_6 \sin(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_2 &= B_{45}V_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) + B_{45}\{u_1 \sin(\varphi_4 - \varphi_5) + \\
 &u_2 \cos(\varphi_4 - \varphi_5)\}; \\
 a_3 &= B_{46}V_4 \sin(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_4 &= B_{41}V_4E_1 \cos(\varphi_4 - \delta_1) + B_{45}V_4V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) \\
 &+ B_{46}V_4V_6 \cos(\varphi_4 - \varphi_6) + V_5B_{45}\{u_1 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) \\
 &- u_2 \sin(\varphi_4 - \varphi_5)\}; \\
 a_5 &= -B_{45}V_4V_5 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) + V_5B_{45}\{-u_1 \cos(\varphi_4 - \varphi_5) + \\
 &u_2 \sin(\varphi_4 - \varphi_5)\}; \\
 a_6 &= -B_{46}V_4V_6 \cos(\varphi_4 - \varphi_6); \\
 a_7 &= B_{45}V_5 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) \\
 a_8 &= 2G_5V_5 + B_{54}V_4 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) + B_{57}V_7 \sin(\varphi_5 - \varphi_7) + \\
 &B_{54}\{u_1 \sin(\varphi_5 - \varphi_4) + u_2 \cos(\varphi_5 - \varphi_4)\}; \\
 a_9 &= B_{57}V_5 \sin(\varphi_5 - \varphi_7); \\
 a_{10} &= -B_{54}V_5V_4 \cos(\varphi_5 - \varphi_4) + V_5B_{45}\{-u_1 \cos(\varphi_5 - \varphi_4) \\
 &+ u_2 \sin(\varphi_5 - \varphi_4)\}; \\
 a_{11} &= B_{54}V_5V_4 \cos(\varphi_5 - \varphi_4) + B_{57}V_5V_7 \sin(\varphi_5 - \varphi_7) \\
 &V_5B_{45}\{u_1 \cos(\varphi_5 - \varphi_4) - u_2 \sin(\varphi_5 - \varphi_4)\}; \\
 a_{12} &= -B_{57}V_5V_7 \cos(\varphi_5 - \varphi_7); \\
 a_{13} &= B_{46}V_6 \sin(\varphi_6 - \varphi_4); \\
 a_{14} &= 2G_6V_6 + B_{64}V_4 \sin(\varphi_6 - \varphi_4) + B_{69}V_9 \sin(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{15} &= B_{69}V_6V_9 \sin(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{16} &= -B_{64}V_6V_4 \cos(\varphi_6 - \varphi_4); \\
 a_{17} &= B_{64}V_6V_4 \cos(\varphi_6 - \varphi_4) + B_{69}V_6V_9 \cos(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{18} &= -B_{69}V_6V_9 \cos(\varphi_6 - \varphi_9); \\
 a_{19} &= B_{75}V_7 \sin(\varphi_7 - \varphi_5); \\
 a_{20} &= B_{75}V_5 \sin(\varphi_7 - \varphi_5) + B_{72}E_2 \sin(\varphi_7 - \delta_2) + \\
 &B_{78}V_8 \sin(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{21} &= B_{78}V_7 \sin(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{22} &= -B_{75}V_7V_5 \cos(\varphi_7 - \varphi_5); \\
 a_{23} &= B_{72}V_7E_2 \cos(\varphi_7 - \delta_2) + B_{75}V_7V_5 \cos(\varphi_7 - \varphi_5) \\
 &+ B_{78}V_7V_8 \cos(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{24} &= -B_{78}V_7V_8 \cos(\varphi_7 - \varphi_8); \\
 a_{25} &= B_{78}V_8 \sin(\varphi_8 - \varphi_7); \\
 a_{26} &= 2G_8V_8 + B_{87}V_7 \sin(\varphi_8 - \varphi_7) + B_{89}V_9 \sin(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{27} &= B_{89}V_9 \sin(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{28} &= -B_{87}V_7V_8 \cos(\varphi_8 - \varphi_7); \\
 a_{29} &= B_{87}V_7V_8 \cos(\varphi_8 - \varphi_7) + B_{89}V_8V_9 \cos(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{30} &= -B_{89}V_8V_9 \cos(\varphi_8 - \varphi_9); \\
 a_{31} &= B_{96}V_9 \sin(\varphi_9 - \varphi_6); \\
 a_{32} &= B_{98}V_9 \sin(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{33} &= B_{93}E_3 \sin(\varphi_9 - \delta_3) + B_{96}V_6 \sin(\varphi_9 - \varphi_6) \\
 &+ B_{98}V_8 \sin(\varphi_9 - \varphi_8); \\
 a_{34} &= -B_{96}V_9V_6 \cos(\varphi_9 - \varphi_6); \\
 a_{35} &= -B_{98}V_9V_8 \cos(\varphi_9 - \varphi_8);
 \end{aligned}$$

$$g_{T1} = K_7 \sin(\delta_2 - \varphi_7) - K_{19} V_7 \cos(\delta_2 - \varphi_7)$$

$$g_{T2} = K_8 \sin(\delta_2 - \varphi_7) - K_{20} V_7 \cos(\delta_2 - \varphi_7)$$

$$g_{T3} = K_{11} \sin(\delta_3 - \varphi_9) - K_{23} V_9 \cos(\delta_3 - \varphi_9)$$

$$g_{T4} = K_{12} \sin(\delta_3 - \varphi_9) - K_{24} V_9 \cos(\delta_3 - \varphi_9)$$

$$f_{T1} = (\omega_2 - \omega_0) \{ C_7 \sin(\delta_2 - \varphi_7) + V_7 \cos(\delta_2 - \varphi_7) (1 - C_{19}) \} \\ + (\omega_3 - \omega_0) (C_8 \sin(\delta_2 - \varphi_7) - C_{20} V_7 \cos(\delta_2 - \varphi_7))$$

$$f_{T2} = (\omega_3 - \omega_0) \{ C_{11} \sin(\delta_3 - \varphi_9) + V_9 \cos(\delta_3 - \varphi_9) (1 - C_{23}) \} \\ + (\omega_2 - \omega_0) (C_{12} \sin(\delta_3 - \varphi_9) - C_{24} V_9 \cos(\delta_3 - \varphi_9))$$

زیر نویس ها

^Δ Thyristor controlled Series Compensator

[∇] Model Predictive Control

[∇] Static Synchronous Series Compensator

[∇] Power System Stabilizer

[∇] Superconductive Fault Current Limiter

[∇] Flexible Alternative Current Transmission

[§] Unified Power Flow Controller