

طراحی هماهنگ کنترل کننده میرایی ادوات سیستم انتقال AC انعطاف پذیر با استفاده از روش های متوالی

مهديه اسلامي^۱، سيما افزون^۲

^۱ هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی

^۲ کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرمان

چکیده

امروز به دلیل تقاضای رو به رشد انرژی و فعالیت های بازارگرا سیستم های قدرت تحت تأثیر تنش های بیشتری هستند . بهره برداری از شبکه های سیستم های موجود مستلزم برآوردن محدودیت های انتقال است و این امر مشکلات پایداری زیادی را برای سیستم به وجود می آورد که به طور بالقوه می تواند عواقب و نتایج بدی داشته باشد . ظهور سیستم های راهکارهای جدیدی برای تقویت شبکه های موجود فراهم می کند . علاوه بر این، ادغام از مبتنی بر برای طراحی کنترلر مقاوم میرایی می تواند فرصت های بیشتری را برای افزایش پایداری دینامیکی سیستم ایجاد کند . در این تحقیق یک روش کنترل مقاوم برای کنترل میرایی سیستم های قدرت با استفاده و با هدف بهبود پایداری دینامیکی سیگنال کوچک سیستم ارائه شده است . یک روش جدید ارائه شده است . برخلاف بسیاری از روش های کنترلی موجود روش ارائه شده قادر به مدیریت اهداف کنترلی متعدد با چندین نقطه کار مختلف از پیش انتخاب شده می باشد به طوری که می تواند مقاوم بودن کنترلر را در محدوده وسیع تری تضمین کند . مقبولیت و امکان سنجی روش پیشنهادی با طراحی کنترلر برای سیستم دو ناحیه ای سیستم چهار ژنراتور و یک سیستم ۵ ناحیه ای ۱۶ ژنراتور ۶۸ با سه با ادوات مختلف تأیید شده است . به عنوان یک فرمت تعمیر یافته از روش پیشنهادی مبتنی بر، یک رویکرد هماهنگ کننده برای کنترلر های میرایی چندین برای بررسی مسئله کنترل میرایی با توجه به مودهای نوسانی غالب متعدد در سیستم های قدرت ابعاد وسیع به هم پیوسته توسعه داده شده است برای کاهش تعاملات نامطلوب بین ادوات مختلف، کنترلر های متعدد به شیوه ای ترتیبی با سیگنال فیدبک مطلوب طراحی شده است . برای ارزیابی اثربخشی روش پیشنهادی رویکرد طراحی هماهنگ شده سپس به سیستم ۶۸ با سه ۵ ناحیه ای با ۱۹ اعمال شده است .

واژگان کلیدی: ادوات FACTS، روش های ترتیبی، کنترل کننده میرایی، SVC، TCSC.

مقدمه

امروزه به دلیل تقاضای رو به رشد انرژی و فعالیت‌های بازارگرا سیستم‌های قدرت تحت تأثیر تنش‌های بیشتری هستند بهره‌برداری از شبکه‌های سیستم‌های موجود مستلزم برآوردن محدودیت‌های انتقال است و این امر مشکلات پایداری زیادی را برای سیستم به وجود می‌آورد که به‌طور بالقوه می‌تواند عواقب و نتایج بدی داشته باشد. ظهور سیستم‌های راهکارهای جدیدی برای تقویت شبکه‌های موجود فراهم می‌کند. علاوه بر این ادغام سیستم ایجاد کند. با توسعه سریع تکنولوژی اقتصادی اجتماعی و علوم امروزه تقاضای برق رشد چشمگیری داشته است.

به دلیل استعمار بیش از حد و استفاده از زغال سنگ و گاز طبیعی انرژی ذخیره به‌طور گسترده‌ای با کمبود و کاهش مواجه شده است برای صنعت برق، روند کاهش منابع انرژی اولیه به یک تهدید فوق‌العاده‌ای جهت تامین و حفظ پایدار تقاضای برق عموم مردم تبدیل شده است. علاوه بر این مفهوم کاهش انتشار کربن در طول ده سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است به خوبی می‌دانیم که سوختن زغال سنگ، نفت فسیلی و گاز طبیعی برای تولید برق یکی از علل عمده انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌باشد (۱).

صنعت برق با چالش‌های بزرگی برای مقابله با مسائلی همچون کمبود انرژی و کاهش انتشار کربن مواجه است. بسیاری از تحقیقات و توسعه‌ها جهت بهبود نسبت احتراق سوخت‌های سنتی انجام شده است. با این حال این تحقیقات اساساً مشکلات را حل نکرده‌اند؛ بنابراین تحقق یک رویکرد موثر و پایدار برای حل مسایل انرژی در بلندمدت امری ضروری است در طول چند دهه گذشته، ساختار منابع انرژی تولید برق به تدریج تغییر کرده‌اند و با وجود اینکه منابع انرژی سنتی مانند زغال سنگ و گاز طبیعی هنوز هم نقش بالایی در بازار برق دارند، نوع جدیدی از منابع انرژی مانند انرژی هسته‌ای و انرژی دریایی برای تولید برق استفاده شده‌اند در میان تمام منابع جدید، انرژی هسته‌ای یکی از امیدوارکننده‌ترین جایگزین‌ها برای منابع انرژی سنتی است. با این حال خطرات بالقوه نیز بسیار زیاد است.

بنا به دلایل مختلف، نوسانات فرکانس پایین را می‌توان به مودهای نوسانی محلی و مودهای نوسانی بین ناحیه‌ای تقسیم بندی نمود مودهای نوسانی محلی نوسان بین یک ژنراتور تکی و یا یک گروه از ژنراتورهای موجود در یک ناحیه یکسان را با بقیه عناصر سیستم با فرکانس ۱۰۰ تا ۲۰۰ هرتز توصیف می‌کند؛ در حالی که مودهای نوسانی بین ناحیه‌ای توسط ژنراتورها یا گروهی از ژنراتورهای موجود در نواحی که نسبت به هم با فرکانس ۰.۱ تا ۰.۱ هرتز نوسان کرده‌اند تحریک می‌شوند طبق جدول ۱-۲، باید در نظر گرفته شود که این حوادث واقعاً جزء نوسانات درون ناحیه‌ای باشند. در سیستم‌های قدرت به هم پیوسته گسترده، می‌توان به‌طور موثری با اتخاذ طرح‌های مناسبی از و بر نوسانات محلی غلبه کرد. با این حال، برای نوسانات درون ناحیه‌ای که در برگیرنده نواحی متعدد است مقررات و ملاحظات از طرف ژنراتور می‌تواند بسیار محدودکننده باشد، بنابراین طراحی کنترلرهای مکمل میرایی نوسانات درون ناحیه‌ای امری ضروری است.

از سوی دیگر، ادغام و یکپارچه‌سازی برای کاهش نیز باعث افزایش پیچیدگی سیستم با خطرات همچون باعث ایجاد نوسانات زیر سنکرون پایداری ولتاژ میشود به‌عنوان مثال، خازن‌های سری می‌شوند. اگر فرکانس نوسان نزدیک به فرکانس طبیعی شفت ژنراتور، باشد آنگاه می‌تواند منجر به رزونانس بزرگی شود که به شدت به ماشین سنکرون آسیب می‌رساند علاوه بر این کنترل دینامیک جبران‌سازی سری نیز ممکن است بر سیستم‌های حفاظتی که می‌تواند باعث پیشروی روزه جلو و معکوس سیستم بشود، تأثیر می‌گذارد (۶)؛ بنابراین چگونگی استفاده از ادوات برای رفع این مشکلات بالقوه نیز است. در این مقاله با هدف ارتقاء پایداری دینامیکی سیستم قدرت، به ویژه در حوزه بهبود پایداری سیگنال کوچک سیستم با کنترلر مکمل میرایی بر پیشینه تحقیق و مطالعات انجام شده در زمینه کنترل میرایی سیستم قدرت در بخش بعدی ارائه شده است. مطالعه تحقیقاتی ارائه شده در این مقاله بر کنترل مقاوم میرایی سیستم‌های قدرت یکپارچه برابر نوسانات

فرکانس پایین تمرکز دارد. هدف اصلی از این مقاله طراحی یک کنترل کننده مقاوم مکمل میرایی برای بهبود نسبت میرایی سیستم از مودهای نوسانی با میرایی ضعیف می باشد.

در این مقاله یک روش کنترل مقاوم برای کنترل میرایی نوسانات، سیستم‌های قدرت با استفاده از هدف بهبود پایداری دینامیکی سیگنال کوچک سیستم ارائه شده است که یک روش جدید مبتنی بر طراحی کنترلر مقاوم میرایی ارائه شده است.

تقاضا و تولید انرژی الکتریکی

با توسعه سریع تکنولوژی اقتصادی اجتماعی و علوم امروزه تقاضا برق رشد چشمگیری داشته است. به دلیل استعمار بیش از حد و استفاده از زغال سنگ و گاز طبیعی انرژی ذخیره به‌طور گسترده ای با کمبود و کاهش مواجه شده است. برای صنعت برق روند کاهش منابع انرژی اولیه به یک تهدید فوق العاده ای جهت تامین و حفظ پایدار تقاضای برق عموم مردم تبدیل شده است. علاوه بر این مفهوم کاهش انتشار کربن در طول ده سال گذشته توجه زیادی را به خود جلب کرده است. بخوبی می دانیم که سوختن زغال سنگ، نفت فسیلی و گاز طبیعی برای تولید برق یکی از علل عمده انتشار گازهای گلخانه ای می باشد (۲).

صنعت برق با چالشهای بزرگی برای مقابله با مسایلی همچون کمبود انرژی و کاهش انتشار کربن مواجه است. بسیاری از تحقیقات و توسعه ها جهت بهبود نسبت احتراق سوخت های سنتی انجام شده است، با این حال، این تحقیقات اساسا مشکلات را حل نکرده‌اند، بنابراین تحقق یک رویکرد موثر و پایدار برای حل مسایل انرژی در بلند مدت امری ضروری است. در طول چند دهه گذشته، ساختار منابع انرژی تولید برق به تدریج تغییر کرده‌اند و با وجود اینکه منابع انرژی سنتی مانند زغال سنگ و گاز طبیعی هنوز هم نقش بالایی در بازار برق، دارند نوع جدیدی از منابع انرژی مانند انرژی هسته ای و انرژی دریایی برای تولید برق استفاده شده اند.

در مقایسه با انرژی هسته ای انرژیهای تجدید پذیر به نظر از لحاظ امنیت بهره‌برداری گزینه بهتری برای تولید برق آینده محسوب می شود انرژیهای تجدیدپذیر مانند انرژی باد و خورشید ایمن، پاک و از همه مهمتر پایدار هستند. با توجه به پیشرفتهای تکنولوژیکی در حوزههای مربوطه مزایای انرژی های تجدید پذیر در حال حاضر به‌طور گسترده ای شناسایی شده است و استفاده از انرژیهای تجدید پذیر در حال حاضر به سرعت در حال پیشرفت و ارتقاء است به‌عنوان مثال انرژی باد را در نظر بگیرید. ظرفیت نصب و راه اندازی جهانی انرژی باد ۳,۲۴ در سال ۲۰۰۱ بوده است (۳) و این رقم در پایان سال ۲۰۱۰ به مقدار ۱۹۹,۷ افزایش یافته است. در پایان سال ۲۰۱۳ ظرفیت نصب و راه اندازی انرژی باد در سراسر جهان تقریباً ۳۱۸ بوده است (۵).

تقویت سیستم انتقال

تقویت سیستم انتقال توان الکتریکی موجود به‌طور طبیعی با افزایش تقاضای برق و بدون توجه به تغییرات ساختارهای انرژی در تولید برق انجام میشود. قابلیت انتقال توان هر شبکه در سیستم انتقال موجود همیشه محدود بوده و قلوئی توان جریان برق افزایشی به تدریج سیستم انتقال را به سمت محدودیت های کاری خود سوق می دهد. در انگلستان شبکه‌های انتقال به شکل ستون فقرات در دهه ۱۹۶۰ ساخته شدند و بسیاری از خطوط انتقال آنها از جمله مانند کوریدرهای انتقال بین انگلستان و اسکاتلند. در حال حاضر با حداکثر ظرفیت خود کار میکنند. طبق مطالب بیان شده در تولید انرژی باد از مزارع بادی ساحلی و دریایی در سال ۲۰۲۰ به‌طور فوق العاده افزایش خواهد یافت و به سیاری از منابع انرژی باد از شمال اسکاتلند به شبکه اصلی تزریق خواهند شد (۶).

سیستم انتقال AC انعطاف پذیر

سیستم انتقال AC انعطاف‌پذیر که به‌طور مختصر FACTS نامیده شده است قادر است راه حل های جدیدی را برای ارتقاء و تقویت سیستم انتقال موجود ارائه کند. با استفاده از ادوات الکترونیک قدرت با قابلیت سوئیچینگ سریع FACTS قادر به کنترل پارامترهای سیستم قدرت با اهداف مختلف است. کاربردهای اصلی FACTS به شرح زیر است: جبرانسازی سری، تنظیم ولتاژ باس، کنترل فلوی توان، بهبود کیفیت توان، افزایش پایداری سیستم و غیره.

جدول ۱: طبقه بندی ادوات

FACTS devices		
	Thyristor-valve based	VSC based
Shunt	SVC	STATCOM
Series	TCSC/TPSC	SSSC
Series-shunt	DPFC	UPFC/IPFC

پایداری سیستم یکپارچه قدرت FACTS

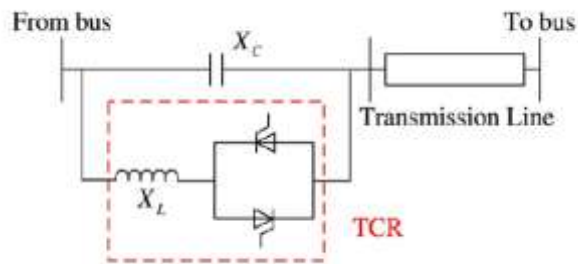
همان طور که در بالا ذکر شد، FACTS راه حلی را برای افزایش ظرفیت انتقال سیستم قدرت با انعطاف به منظور بهبود پایداری سیستم پذیری بسیار بالاتر ارائه می‌کند علاوه بر این، استفاده از ادوات FACTS قدرت می‌تواند مفید و کارآمد باشد. پایداری دینامیکی سیستم قدرت می‌تواند به دو بخش پایداری سیگنال کوچک و پایداری گذرا طبقه بندی شود. پایداری سیگنال کوچک به صورت توانایی سیستم‌های قدرت برای بهبود و بازیابی حالت ماندگار اولیه خود پس از بروز اختلالات کوچک بدون اینکه حالت سنکرون آنها مختل شود، تعریف میشود. در عملیات عادی سیستم قدرت اختلالات کوچک ناشی از نوسانات تصادفی که در پارامترهای سیستم ظاهر شده اند میتوانند نوسانات سیستم قدرت را تحریک کننده این نوسانات به‌عنوان نوسانات فرکانس پائین شناخته شده اند زیرا فرکانس آنها ۱۰۰ در مقایسه با فرکانس پایه سیستم قدرت نسبتاً کم است (۹).

میرایی ناکافی نوسانات فرکانس پایین یکی از عوامل اصلی ناپایداری سیگنال کوچک است و حتی برای یک سیستم پایدار، حصول اطمینان از اینکه سیستم میرایی کافی دارد بسیار مهم است چراکه زمان نشست کاهش (افت) نوسانات را می‌توان بر اساس برخی از نیازمندیهای عملیاتی سیستم به حداقل رساند. شیوه های زیر به‌طور معمول برای افزایش پایداری سیگنال کوچک سیستم پیشنهاد شده اند (۷).

مدل سازی FACTS

در طول سال های گذشته، انواع مختلف ادوات FACTS توسعه یافته است. یک مدل معمول TCSC، همانطور که در شکل زیر نشان داده شده، شامل یک TCR است که به صورت موازی با یک خازن سری قرار داده شده است (۳).

شکل ۱:



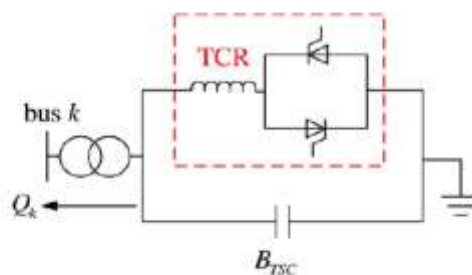
با کنترل زاویه آتش تریستورها در TCR، دستگاه می‌تواند به صورت یک راکتانس قابل کنترل تلقی شود در کاربردهای عملی، TCSC برای جبران سازی راکتانس کل خط انتقال مجاور عمدتاً به‌عنوان یک راکتانس خازنی در نظر گرفته می‌شود، به طوری که قابلیت انتقال توان از خط می‌تواند افزایش یابد استراتژیهای مختلفی برای کنترل حلقه داخلی TCSC وجود دارد که عبارتند از: تنظیم جریان تنظیم ولتاژ کنترل راکتانس و غیره در این تحقیق، روش کنترل راکتانس استفاده شده است و مدل دینامیکی TCSC می‌تواند به سادگی به صورت یک تاخیر واحد با مورد نظر به‌عنوان ورودی و راکتانس TCSC واقعی به‌عنوان خروجی در نظر گرفته شود.

مدل SVC

مدلهای مختلفی از SVC وجود دارند که می‌تواند توسط TSC، TSR و TCR ساخته شوند. در مطالعه زیر مدل SVC متشکل از یک TCR موازی با TSC، اتخاذ شده است. یک دیاگرام شماتیک از مدل در شکل نشان داده شده است که در اینجا در می‌تواند به‌عنوان یک خازن ثابت و می‌تواند به‌عنوان راکتانس قابل کنترل در نظر گرفته شود. با کنترل باید قادر به تولید یا جذب توان راکتیو برای تنظیم ولتاژ باس با شد مقدار سو سپتانس واقعی به صورت زیر بیان شده است.

شکل ۲:

$$BSVC = BTSC + BTCR$$



خطی سازی سیستم و فرمول بندی سیستم چند مدله

خطی سازی سیستم بدون FACTS

برای بررسی پایداری سیگنال کوچک، سیستم باید مدل‌های سیستم خطی سازی شوند و به فرم فضای حالت بیان شوند خطی سازی مدل دینامیکی ژنراتور و مدل دینامیکی سیستم تحریک می‌تواند به صورت زیر بیان شوند:

$$\Delta \dot{x}_i = A_{1i} \Delta x_i + B_{1i} \Delta I_{gi} + B_{2i} \Delta V_{gi} + E_{1i} \Delta u_{gi}$$

$$\text{where } \Delta x = [\Delta \delta_i \quad \Delta \omega_i \quad \Delta E'_{qi} \quad \Delta E'_{di} \quad \Delta \varphi_{1qi} \quad \Delta \varphi_{2qi} \quad \Delta E_{fai}]^T, \Delta I_{gi} = [\Delta I_{di} \quad \Delta q_{qi}]^T, \quad (1-2)$$

$$\Delta v_{gi} = [\Delta \theta_i \quad \Delta V_i]^T, \Delta u_{gi} = [\Delta T_{Mi} \quad \Delta V_{ref}]^T$$

پس از آن، مدل دینامیکی ژنراتورهای چندگانه را می توان به صورت یک فرم ماتریسی فشرده بیان نمود:

$$\Delta \dot{x} = A_1 \Delta x + B_1 \Delta I_g + B_2 \Delta V_g + E_1 \Delta I_g$$

$$\text{where } \Delta x = [\Delta x_1^T \dots \Delta x_m^T]^T, \Delta I_g = [\Delta I_{g1}^T \dots \Delta I_{gm}^T]^T, \Delta V_g = [\Delta V_{g1}^T \dots \Delta V_{gm}^T]^T \quad (2-2)$$

$$\Delta u_g = [\Delta u_{g1}^T \dots \Delta u_{gm}^T]^T;$$

خطی سازی معادلات تزریق فلوی توان TCSC منجر به تحقق روابط زیر می شود :

$$\Delta P_k = K_{11}\Delta X_{actual} + K_{12}\Delta V_1$$

$$\Delta Q_k = K_{21}\Delta X_{actual} + K_{22}\Delta V_1$$

$$\Delta P_m = M_{11}\Delta X_{actual} + M_{12}\Delta V_1$$

$$\Delta Q_m = M_{21}\Delta X_{actual} + M_{22}\Delta V_1$$

خطی سازی معادلات تزریق فلوی توان (۲۲۲) منجر به تحقق روابط زیر می شود :

$$\Delta Q_k = K_{B1}\Delta svc + K_{V2}\Delta V_1$$

با ترکیب معادله دیفرانسیل مدل دینامیکی سیگنال کوچک سیستم کامل با FACTS را میتوان با فرمفضای حالت زیر بیان نمود :

$$\begin{aligned} \Delta \dot{\bar{x}} &= A_{sys} \Delta \bar{x} + B_{sys} \Delta u_{FACTS} \\ \text{where } \Delta \bar{x} &= \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta x_{FACTS} \end{bmatrix}, A_{sys} = \begin{bmatrix} A_{sys1} & A_{sys2} \\ 0 & A_{FACTS} \end{bmatrix}, B_{sys} = \begin{bmatrix} B_{sys1} \\ B_{FACTS} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

تشکیل سیستم چند مدله

برای افزایش استحکام طرح کنترلی، میرایی با تشکیل یک سیستم چند مدله، چندین نقطه کار سیستم در مرحله مدل سازی سیستم گنجانده شده اند. سیستم چند مدله شامل یک سری از مدل های سیستم خطی سازی شده هستند.

$$\begin{aligned} \Delta \dot{x} &= A_{sys} \Delta \bar{x} + B_{sys,i} \Delta u_{FACTS} \\ \Delta y &= C_{sys,i} \Delta \bar{x} + D_{sys,i} \Delta u_{FACTS} \\ i &= 1, 2, \dots, L \end{aligned}$$

در آن L تعداد شاخص نقاط کار سیستم است. L تعداد کل نقاط عملیاتی نقاط کار است و Ay خروجی سیستم خواهد بود که به عنوان سیگنال فیدبک برای کنترل میرایی استفاده می شود. اگر یک کنترل فیدبک خروجی مشترک را بتوانیم برای همه این مدل های سیستم تعیین کنیم طرح پیشنهادی بر مبنای نقطه مرجع مقاوم خواهد شد.

مروری بر پیشینه تحقیق در زمینه میرایی نوسانات سیستم قدرت

بررسی همه کارهای انجام شده در جهت بهبود پایداری دینامیکی سیستم های قدرت حتی به صورت مختصر، به دلیل مطالعات و تحقیقات متعددی که در این زمینه صورت گرفته است گزارش مفصلی را طلب کند. در این زیر بخش ضمن

اشاره مختصر به شاخه های مهم، تحقیق کارهای انجام شده بر اساس شاخه کنترل مقاوم را مرور خواهیم کرد با بروز نا پایداری دینامیکی در سیستم های قدرت تحقیقات گسترده ای در این زمینه آغاز شد. مفاهیم اساسی پایداری دینامیکی برای ژنراتور سنکرون متصل به شین بینهایت، اولین بار توسط دملو به شیوه ای زیبا در سال ۱۹۹۹ بیان شد (۱۰). در این مقاله با معرفی مفاهیم گشتاورهای سنکرون کننده و میرا کننده اثر پارامترهای مختلف سیستم و شرایط نقطه کار بر پایداری دینامیکی ماشین سنکرون تشریح شده و بدنبال آن با استفاده از تئوری جبران فاز به طراحی پرداخته شد. در مرجع (۶) اثر دینامیک ماشینهای سنکرون یک سیستم قدرت چند ماشینه بر پایداری دینامیکی ماشین ام این شبکه بررسی شده است. حاصل این مطالعه چند توصیه مفید در طراحی برای ماشین های سنکرون در سیستم های چند ماشینه می باشد. همچنین از آنجایی که پایدار کننده های سیستم قدرت بر اساس مدل تک ماشین - شین بینهایت طراحی میشود هماهنگ سازی این پایدار کننده ها در سیستم های قدرت چند ماشینه اجتناب ناپذیر است. بدین منظور روش های مختلفی مانند روش های طراحی ترتیبی و افزایش پهنای باند ها در جهت هماهنگ سازی ها ارائه شده است (۳) از دیگر مسائل مورد مطالعه در زمینه پایداری دینامیکی سیستم های قدرت تعیین بهترین محل برای نصب در شبکه های بزرگ به منظور بهبود میرایی یک مود خاص شبکه می باشد. این موضوع که هم اکنون نیز در رأس تحقیقات قرار دارد در مراجع (۲) مورد بررسی قرار گرفته است. همگام با توسعه تئوریهای کنترل روش های پایدار سازی سیستم های قدرت نیز بهبود یافت از اوائل دهه ۱۹۷۰ کاربرد کنترل بهینه در بهبود پایداری دینامیکی به طور چشمگیری افزایش یافت. در مرجع (۸) روش طراحی پایدار کننده با استفاده از تئوری کنترل بهینه به سیستم های قدرت چند ماشینه می باشد. اگر چه استفاده از روش های کنترل بهینه مورد استقبال فراوان محققان دانشگاهی قرار گرفت و مقالات متعددی در جهت توسعه این روشها در پایدار سازی سیستم های قدرت انتشار یافت اما هرگز به شکل جدی در صنعت برق مطرح نشد گذشته از مشکلات اجرایی استفاده از روش های کنترل بهینه در عمل نقص اصلی این روشها بی توجهی به مسئله عدم قطعیت های مختلف موجود در مدل سیستم می باشد (۱۰) تغییر پارامترهای سیستم صرفنظر از دینامیک های سریع و دینامیک های مدل نشده فرکانس بالا در مدل سازی از مهمترین منابع ایجاد عدم قطعیت در مدل سیستم ها می باشد. چشم پوشی از عدم قطعیت های مختلف موجود در مدل ممکن است نتایج، گمراه کننده ای را به دنبال داشته باشد، به طوری که اهداف مورد نظر در کنترل با به کارگیری کنترل کننده طرح شده بر اساس مدل سیستم، در سیستم واقعی تحقق نیابد. در ادامه این زیر بخش کارهای انجام شده در جهت بهبود پایداری سیستم های قدرت که بر مبنای تئوری کنترل مقاوم شکل گرفته است را توضیح می دهیم. بررسی استحکام پایداری با استفاده از مفاهیم مقادیر تکین ماتریسها به منظور تحلیل پایداری دینامیکی سیستم های قدرت، اولین بار در سال ۱۹۸۴ به کار رفت (۲) ابتدا با استفاده از گشتاورهای سنکروه کننده و میرا کننده یک مدل ماتریس تابع انتقال برای سیستم قدرت ارائه کردند. سپس با مدل سازی عدم قطعیت های ناشی از دینامیکهای مدل نشده مودهای پیچشی شافت، ژنراتور تغییر مقادیر گشتاورهای سنکرون کننده و میرا کننده بدلیل تغییر شرایط نقطه کار و تغییر در دینامیکهای تحریک کننده های سیستم به صورت عدم قطعیت های ضرب شوند به تحلیل پایداری سیستم پرداختند. این مقاله بیشتر جنبه تحلیل داشته و توصیه های مفیدی را در طراحی کنترل کننده های مقاوم به دنبال ندارد. تئوری کنترل در طراحی کنترل قید یک حالت برای یک توربوژنراتور استفاده کردند (۱۱).

مواد و روش ها

کنترل میرایی سیستم قدرت را میتوان با طراحی کنترل فیدبک مطلوب با اجزای سیستم قدرت مناسب به دست آورد. با طراحی یک کنترلر میرایی مناسب پارامترهای سیستم، قدرت مانند جریان، فلوی توان می تواند به طور موثری در طول نوسانات تنظیم شوند و به عنوان یک نتیجه عملکرد نوسانات سیستم حلقه بسته به این ترتیب بهبود خواهد یافت نوسانات فرکانس پایین بسته به علل شکل گیری آنها، به دو دسته مودهای نوسانی محلی و بین ناحیه ای تقسیم میشوند نصب و راه اندازی PSS یک راه حل کارآمد برای کاهش نوسانات محلی خواهد بود، به طوری که PSS قادر به ارائه میرایی مکمل از طریق کنترل سیستم تحریک ژنراتور می باشد. به یک دلیل، مشابه به منظور کاهش نوسانات درون ناحیه، ای، کنترلرهای

میرایی مکمل را میتوان برای ادوات FACTS توسعه داد. در این قسمت یک رویکرد کنترل مبتنی بر BMI برای تحقق کنترلرهای FACTS پیشنهاد شده است. حل مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI در صورت غیر محدب بودن تابع هدف می تواند پیچیده و دشوار شود. ترکیب سیستم چند مدله باعث می شود حل مسئله سخت تر شود، زیرا متغیرهای ماتریس سیستم تغییر می کنند. یک روش دو مرحله ای برای یافتن پاسخ های بهینه مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI معرفی شده است. با پیروی از روش دو مرحله ای قیود را می توان خطی سازی نمود و مسئله بهینه سازی را میتوان به طور سیستماتیک توسط حلگرهای LMI محدب حل کرد.

فرمول بندی مسئله کنترل میرایی چند هدفه در BMI

اهداف کنترلی که باید در مسئله کنترل مقاوم میرایی گنجانده شوند شامل جابایی قطب محلی، بهینه سازی سیگنالهای کنترلی و حذف اغتشاشات است این اهداف کنترلی تحت نقاط کار مختلف سیستم در ابتدا به صورت مجموعه های متعددی از نابرابریهای ماتریس فرمول بندی شده اند و سپس باهم ادغام شدند و به صورت مجموعه ای یکپارچه از قیود BMI از یک مسئله بهینه سازی ترکیبی پردازش شدند.

جابایی قطب محلی

فرض کنید یک سیستم LTI به فرم فضای حالت بیان شده در رابطه ارائه شده باشد، مشخصات میرایی سیستم به طور معمول توسط مقادیر ویژه ماتریس A تعیین خواهند شد

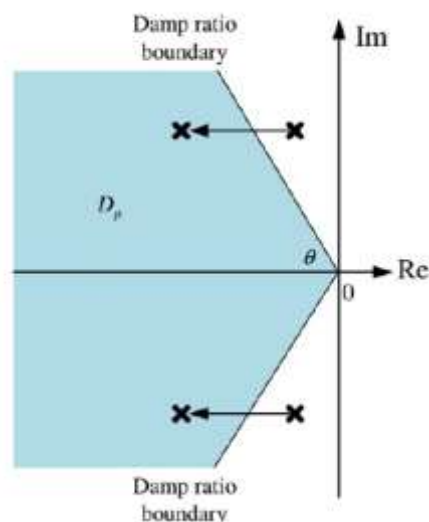
$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx + Du$$

تئوری تعمیم یافته لیاپانوف با جابایی قطب محلی

نظریه کلاسیک لیاپانوف به طور گسترده ای به عنوان معیار پایداری سیستم های کنترل شناخته شده است؛ سیستم حلقه بسته با ماتریس حالت پایدار است اگر و تنها اگر یک ماتریس متقارن مثبت معین P وجود داشته باشد که:

شکل ۳: ناحیه جابایی قطب با حداقل میرایی



$$A P_{cl}^T + P A_{cl} < 0$$

به‌عنوان یک نتیجه از طراحی جایابی قطب محلی، لازم است که سیستم حلقه بسته پایدار باشد و همچنین تمام مقادیر ویژه آن در ناحیه مشخص شده LMI قرار گیرد؛ در همین راستا تئوری تعمیم یافته لیاپانوف با جایابی قطب محلی ارائه شده است. سیستم حلقه بسته با ماتریس حالت در ناحیه پایدار است پایدار اگر و تنها اگر یک ماتریس متقارن وجود داشته باشد به‌طوری‌که

$$\alpha \otimes P + \beta \otimes (P A_{cl}) + \beta^T \otimes (A_{cl}^T P) < 0$$

$$P > 0$$

که در این نامساوی بیانگر ضرب کرونگر دو ماتریس است .

تدوین مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI

یک مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI با اهداف کنترلی اعم از جایابی قطب محلی، بهینه سازی سیگنالهای کنترلی و حذف اغتشاش می‌تواند به صورت زیر فرمول بندی شود :

$$\min \alpha \otimes p + \beta \otimes (P A_{cl}) + \beta^T \otimes (A_{cl}^T P) < 0$$

$$s.t \left\{ \begin{array}{l} \left[\begin{array}{ccc} P A_{cl} + A_{cl}^T P & P B_{cl} & C_{cl1}^T \\ B_{cl}^T P & -\gamma I & D_{cl1}^T \\ C_{cl1} & D_{cl1} & -\gamma I \end{array} \right] < 0 \\ \left[\begin{array}{cc} Q & C_{cl2} \\ * & P \end{array} \right] > 0 \\ Trace(Q) < v \end{array} \right.$$

حل مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI

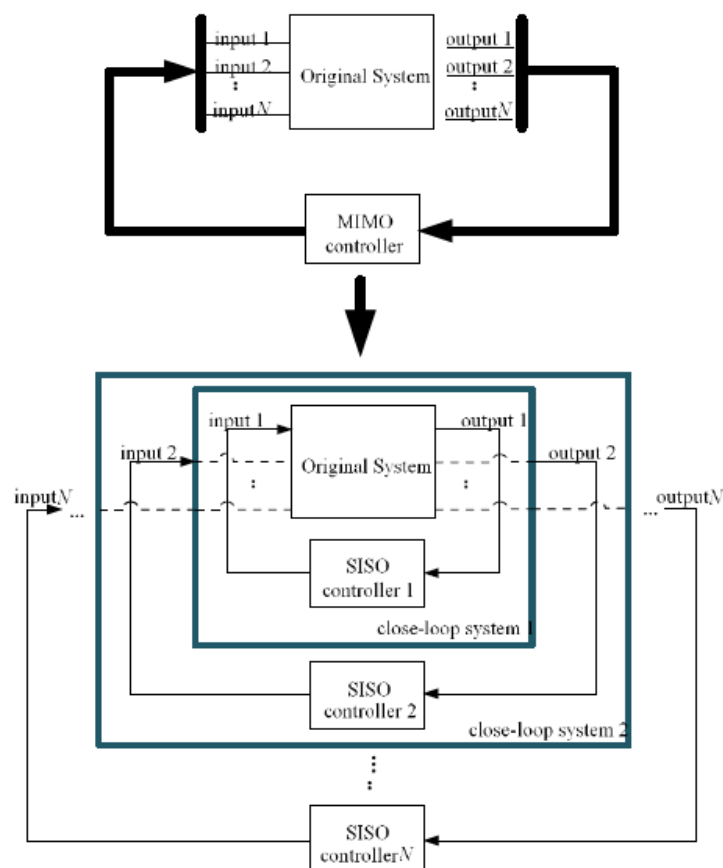
مسئله کنترل مقاوم میرایی را میتوان به صورت یک مسئله بهینه سازی ترکیبی BMI فرمول بندی کرد؛ بنابراین یافتن یک پاسخ بهینه برای مسئله بهینه سازی بخش مهمی از طراحی کنترلر است روش‌های کنترل میرایی سنتی با اهداف کنترل چندگانه اغلب بر اساس مدل نامی مدل ایده آل مسئله را حل می کردند استحکام کنترلر تنها حول یک نقطه کار خاصی با

عملکرد یا قابل تضمین بود. به همین منظور علاقه زیادی برای گنجاندن نقطه کارهای مختلف در مرحله طراحی کنترلر وجود داشت تا استحکام کنترلر بتواند بهبود یابد حل مسئله بهینه سازی با توجه به یک مدل نامی سیستم کاملاً سر راست است، و در اکثر مقالات این موضوع بیان شده است. در اینجا کامل بودن روش طراحی مبتنی بر نشان داده شده است.

رویکرد طراحی ترتیبی

رویکرد طراحی ترتیبی در بسیاری از مطالعات تحقیقاتی برای استراتژیهای مختلف کنترل میرایی به کار برده شده است و از این رو برای رویکرد سیستم چند مدله چندهدفه مبتنی بر اجرا است. مفهوم رویکرد طراحی ترتیبی پی در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل ۴: نمودار شماتیک روش ترتیبی



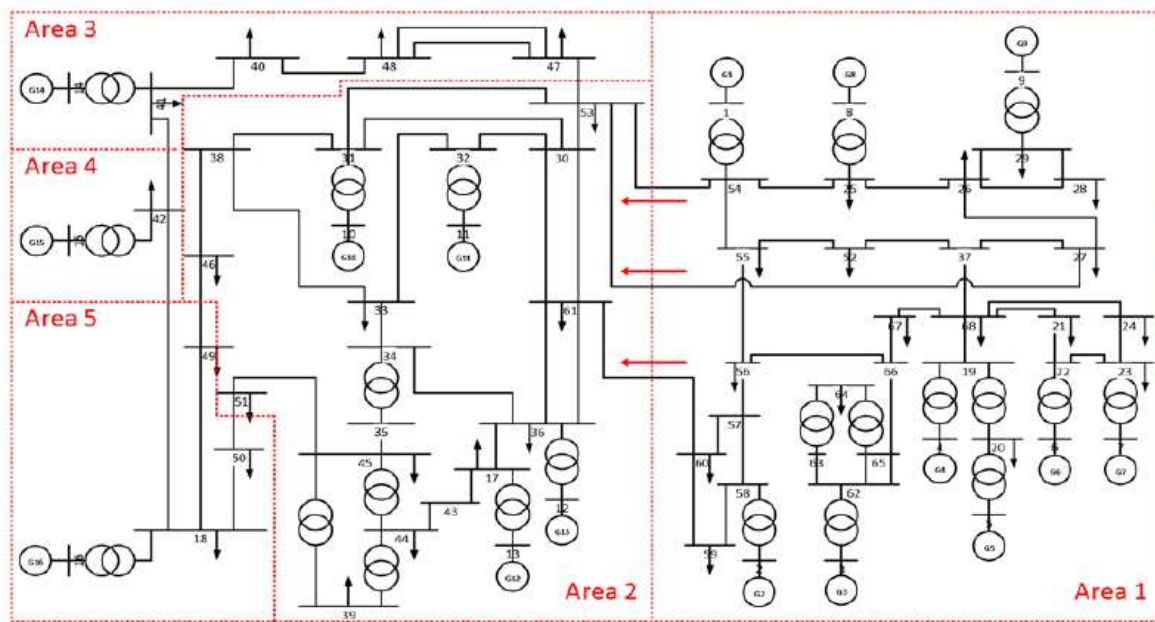
به جای یافتن یک کنترلر فیدبک خروجی MIMO، یک سری از کنترلرهای فیدبک خروجی SISO به صورت ترتیبی برای کاهش عوارض جانبی بین ادوات FACTS مختلف طراحی شده اند (یعنی کنترلر فیدبک خروجی بعدی بر اساس سیستم حلقه بسته با کنترلر فیدبک خروجی قبلی طراحی شده است) که در آن جابجایی قطب منطقه ای و عملکرد به طور همزمان در هر دو نقطه کار نامی و متغیر در نظر گرفته شدند.

یافته های تحقیق

طراحی هماهنگ کنترلرهای میرایی مقاوم FACTS

طراحی هماهنگ در این بخش شامل دو ادوات FACTS می شود یک SVC و TCSC. سیستم ۶۸ با سه پنج ناحیه‌ای با ۱۶ ژنراتور که در شکل ۴-۱۴ نشان داده شده به عنوان سیستم تست استفاده شده است. برای اطمینان از استحکام طراحی کنترل، میرایی همانطور که در جدول زیر نشان داده شده است. سیستم چند مدله شامل دو نقطه کار است.

شکل ۵: سیستم تست ۶۸ باسه



جدول ۲: نقاط عملیاتی سیستم چند مدله

Operating points	Power transfer Area 5 → Area 2 (MW)
Nominal	1150
Off-nominal	1250

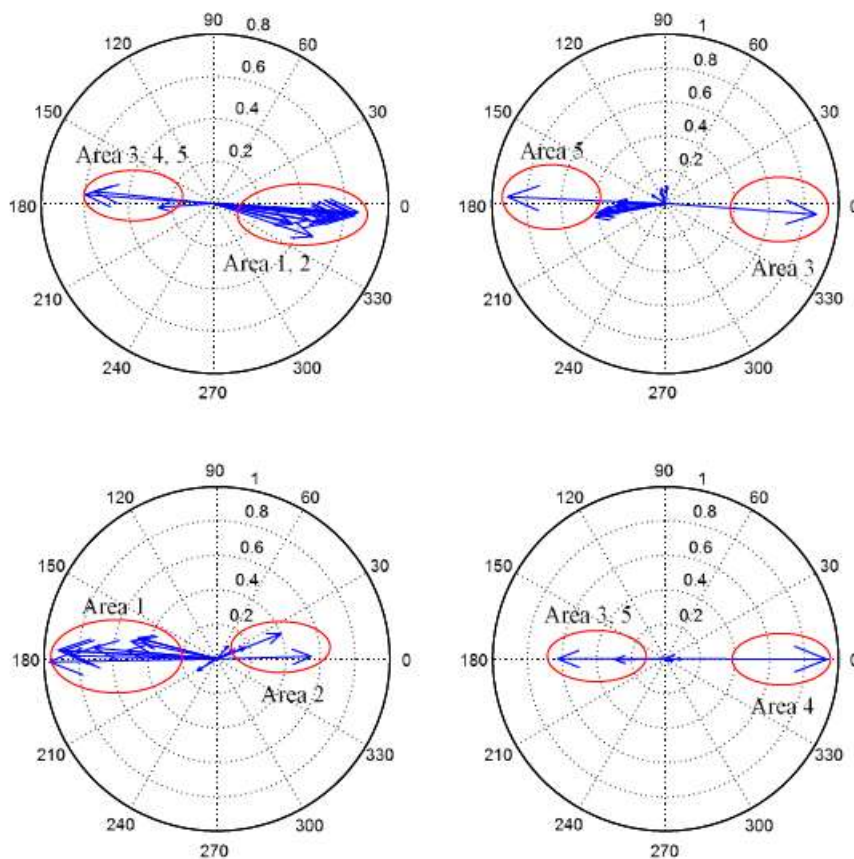
در سیستم پنج ناحیه‌ای تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه برای بررسی مودهای نوسانی درون ناحیه‌ای با میرایی ضعیف انجام شده است. نتایج در جدول نشان می‌دهد که سیستم دارای چهار مود نوسانی بین ناحیه‌ای است که مدهای اول دوم و چهارم تقریباً برابر ۰.۴، ۵.۰ و ۰.۸ هرتز هستند، که به طور چشمگیری بیانگر عدم میرایی هستند.

جدول ۳: مدهای نوسانی درون ناحیه‌ای سیستم پنج ناحیه‌ای بدون

Operating points	Mode 1		Mode 2		Mode 3		Mode 4	
	ζ	ω (Hz)	ζ	ω (Hz)	ζ	ω (Hz)	ζ	ω (Hz)
Nominal	5.88%	0.40	2.49%	0.55	8.33%	0.65	3.52%	0.81
Off-nominal	5.87%	0.40	2.34%	0.54	8.39%	0.65	3.50%	0.81

شکل مدهای هر یک از مدهای نوسانی بین ناحیه‌ای بر اساس ضرایب مشارکت سرعت های مختلف روتور ژنراتور در شکل رسم شده است. مشاهده میشود که مود ۱ بین ناحیه ۱، ۲ و ناحیه ۳، ۴، ۵ است مود ۲ بین ناحیه ۳ و ۵ است؛ مود ۳ بین ناحیه ۱ و ۲ است مود ۴ بین ناحیه ۳، ۵ و ناحیه ۴ است

شکل ۶: اشکال مدهای نوسانی بین ناحیه‌ای



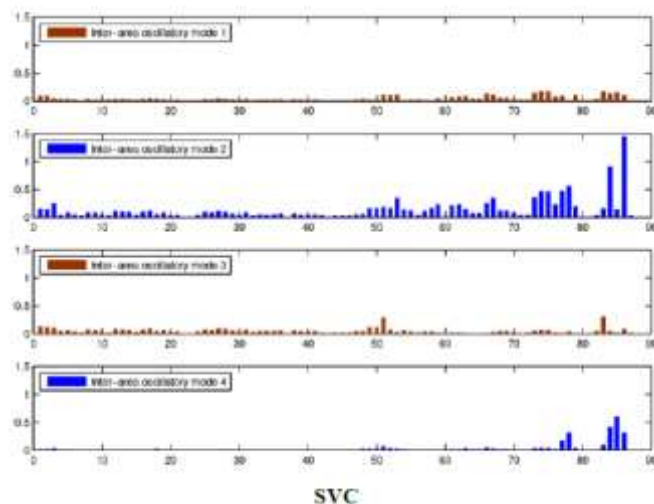
محل نصب و راه اندازی FACTS و انتخاب سیگنال فیدبک

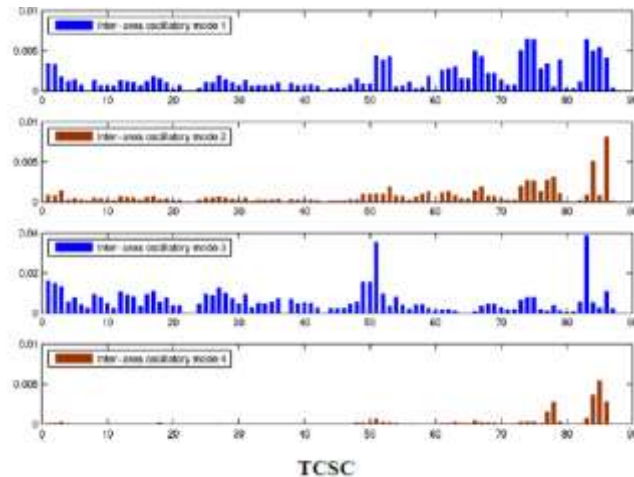
با توجه به شکل، مودها چهار مود نوسانی بین ناحیه‌ای را میتوان به لحاظ جغرافیایی به دو گروه طبقه بندی کرد مودهای حالت ۱ و ۳ (به شدت همبسته به ناحیه ۱ و ۲ و مودهای حالت ۲ و ۴) به شدت همبسته به ناحیه ۳، ۴ و ۵ از آنجا که کنترل پذیری یک کنترلر میرایی FACTS خاص به حالت نوسانی بین ناحیه‌ای ویژه بر اساس محل نصب آن تصمیم گرفته میشود فرض می شود که ما حداقل به دو ادوات برای پوشش چهار مود نوسانی بین ناحیه‌ای نیاز داریم به دلایل فوق یک در خط ۵۳ ۵۴ برای میرایی مودهای درون ناحیه‌ای ۱ و ۳ نصب شده است؛ یک برای میرایی مودهای نو سانی درون ناحیه‌ای ۲ و ۴ در باس ۵۱ نصب شده است .

سیگنال فید بک برای هر کنترلر میرایی FACTS با احتیاط از طریق سیگنال هایی که اطلاعات ارزشمندی از مودهای نوسانی بین ناحیه‌ای، دارند انتخاب شده است .سیگنال فیدبک بهینه نه تنها امکان سنجی طراحی را افزایش میدهد بلکه باعث کاهش مراحل کنترل میرایی میشود جریان خط سیستم یک سیگنال فیدبک موثر است که قبلا به آن اشاره شد .از آن دوباره در طرح هماهنگ زیر استفاده خواهد شد .برای پیدا کردن مناسب ترین سیگنال جریان خط مانده‌های مودال (معین) برای هر مودهای درون ناحیه‌ای با جریانهای مختلف خط محاسبه خواهند شده یک مانده مودال بالاتر نشان دهنده رویت پذیری بالاتر مودهای نوسانی بین ناحیه‌ای در جریان خط مربوطه است شکل ۹ مقادیر باقی مانده مطلق ادوات مختلف را با جریان خطهای مختلف نشان میدهد میتوان مشاهده کرد که کنترلر میرایی برتری بالاتری را در کاهش نوسانات مودهای ۲ و ۴ داشته است زیرا مقدار مانده آنها بسیار بالا است .در حالی که به همین دلیل کنترلر میرایی FACTS پتانسیل بسیار زیادی برای کاهش نوسانات مودهای ۱ و ۳

از خود نشان میدهد. سیگنالهای کنونی با مقادیر مانده بالاتر از مودهای ۱، ۲، ۳ و ۴ بر این اساس به و انتخاب خواهند شد . علاوه بر این، به منظور عنوان سیگنالهای فیدبک برای کنترلر میرایی کاهش تعاملات نامطلوب بین کنترلرهای مختلف مانده یک سیگنال فیدبک برای مودهای که کنترلر قصد ندارد آنها را پوشش دهد باید تاحد امکان در مقدار پایینی ثابت باقی بماند .

شکل ۷: مقادیر مانده مطلق کنترلرهای میرایی





کنترلر میرایی SVC

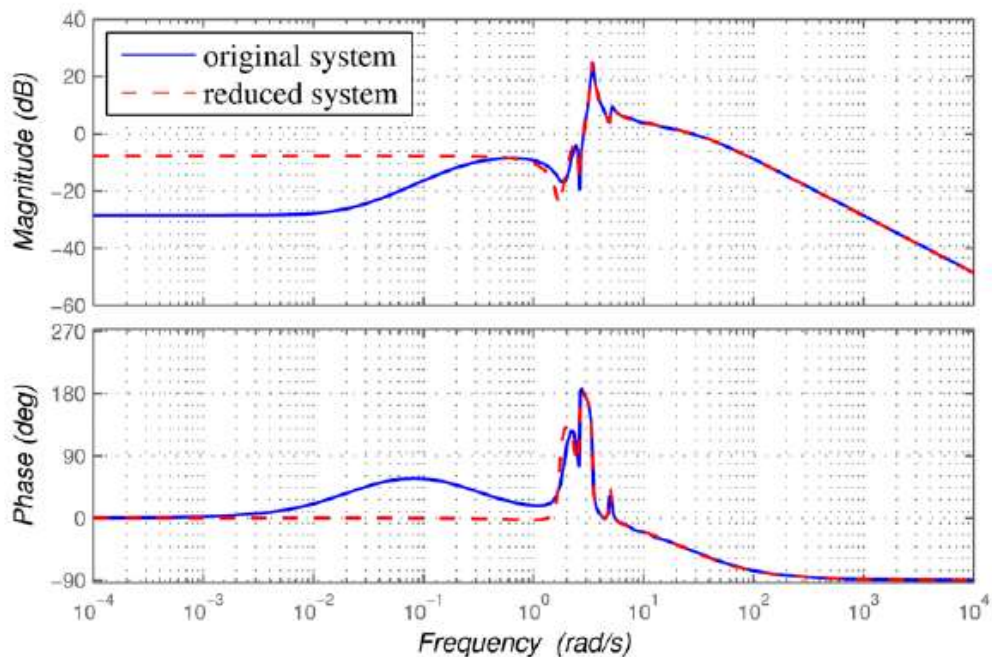
رویکرد طراحی ترتیبی در ابتدا با طراحی کنترل میرایی SVC شروع میشود مرتبه سیستم حلقه باز ۱۵۲ است. روش کاهش مدل کوتاه سازی بالانس در اینجا کار به منظور کاهش ابعاد سیستم به یک سیستم مرتبه ۷ استفاده شده است. مقادیر ویژه ارائه شده در جدول زیر نشان میدهد که سیستم کاهش مرتبه داده شده، به طور کارآمدی ویژگیهای میرایی مودهای نوسانی درون ناحیه‌ای ۲ و ۴ را نشان داده است.

جدول ۴: مقادیر ویژه سیستم کاهش مرتبه یافته

Operating points	Eigenvalues	Damping ratio ζ	Damping frequency ω
Nominal	$-0.216 \pm 2.46i$	8.75 %	0.39 0.55
	$-0.079 \pm 3.43i$	2.29 %	0.81
	$-0.185 \pm 5.06i$	5.06 %	
	-24.4	/	/
Off-nominal	$-0.230 \pm 2.43i$	9.43 %	0.39 0.55
	$-0.084 \pm 3.45i$	2.44 %	0.81
	$-0.175 \pm 5.06i$	3.47 %	
	-24.3	/	/

پاسخ فرکانسی سیستم مرتبه کامل و سیستم کاهش مرتبه یافته حول نقطه کار نامی در شکل مقایسه شده است. نمودار بد نشان می دهد که سیستم کاهش مرتبه داده شده اطلاعات زیادی را در محدوده فرکانس دلخواه ما از دست نمی دهد و همچنان کارایی لازم را دارد.

شکل ۸: پاسخ فرکانس سیستم اصلی نسبت به سیستم کاهش مرتبه داده شده، نقطه کار نامی



جهت ادغام بهینه سازی سیگنالهای کنترلی فضای حالت با سیستم کاهش مرتبه داده شده تحقق یافته است. مرز نسبت میرایی برای جایابی قطب برای تضمین میرایی کافی مودهای نوسانی درون ناحیه‌ای ۲ و ۴ در سیستم‌های حلقه ۸ تنظیم شده است. متغیرهای کنترل فیدبک خروجی به‌طور سیستماتیک از طریق روش دو مرحله ای تعیین شده اند :

$$\begin{aligned}
 A_s &= \begin{bmatrix} -56.39 & 125.73 & -675.33 & 5341.24 & 16730.74 & 36401.16 & 111023.26 \\ 2.63 & -2.36 & -34.58 & -98.77 & 2147.90 & -985.09 & -11972.27 \\ 1.23 & -4.81 & 7.61 & -191.22 & -1526.18 & -1188.30 & -3048.74 \\ -0.26 & 0.96 & 1.01 & 33.04 & 168.09 & 222.50 & 960.91 \\ 0.01 & 0.09 & -0.29 & 3.82 & -2.38 & 15.09 & -11.74 \\ 0.04 & -0.17 & 0.06 & -5.68 & -19.69 & -36.36 & -116.34 \\ -0.01 & 0.03 & -0.02 & 1.12 & 5.00 & 8.38 & 27.62 \end{bmatrix} \\
 B_s &= [3.5110 \quad -0.2315 \quad 0.0928 \quad 0.0235 \quad 0.0005 \quad -0.0030 \quad 0.0006] \\
 C_s &= [-1.19 \quad -30.06 \quad -57.33 \quad -724.15 \quad -452.87 \quad -3261.81 \quad 89.13]
 \end{aligned}$$

و تابع تبدیل کنترلر مربوطه به صورت ۲۴ نشان داده شده است :

$$T_{svc} = \frac{0.8477(s^2 + 4.5564s - 115.1025)(s^2 + 1.6433s + 21.6314)(s^2 + 1.4284s + 7.9315)}{(s + 23.8780)(s^2 + 2.8174s + 24.9007)(s^2 + 1.4407s + 19.2210)(s^2 + 1.0805s + 5.2297)}$$

شبیه سازی مطالعات موردی

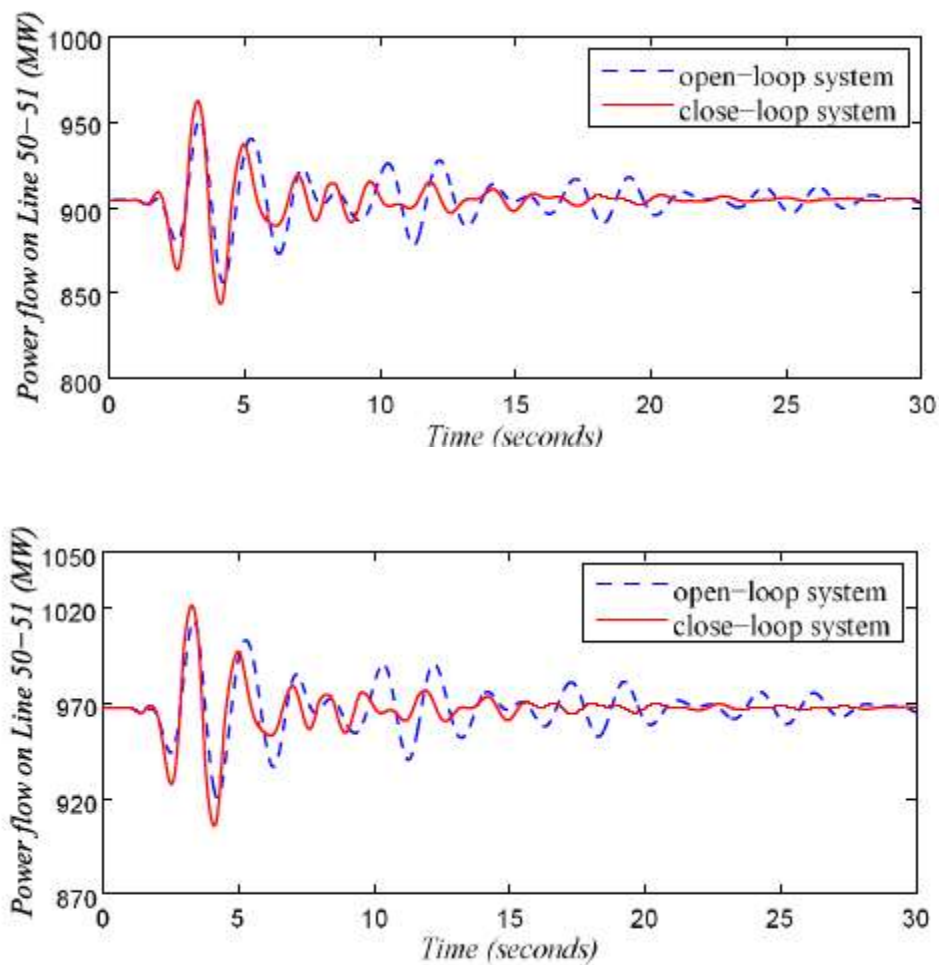
یک بلوک فیلتر واش ات با ثابت زمانی ۱۰ ثانیه به هر یک از کنترلرها به صورت یک فیلتر میان گذر برای میرایی نوسانات درون ناحیه‌ای اضافه شده است. طبق زمان انتقال از بسته های اندازه گیری PMU از چند میلی ثانیه به ۱۰۰ میلی ثانیه تغییر میکنند از این رو بلوکهای تاخیر واحد با ثابت زمانی ۱۰ ثانیه تاخیر ۱۰۰ میلی ثانیه برای شبیه سازی تاخیرهای انتقال سیگنالهای سیستم گسترده به سیگنال فیدبک اضافه شده است. پاسخ های سیستم تحت هر دو نقطه کار نامی و غیر

نامی برای مختلف اختلالات بررسی شده است. اختلال سیستم تحریک تغییرات بار و قطع خطوط انتقال مطالعات موردی به صورت زیر ارائه شده است.

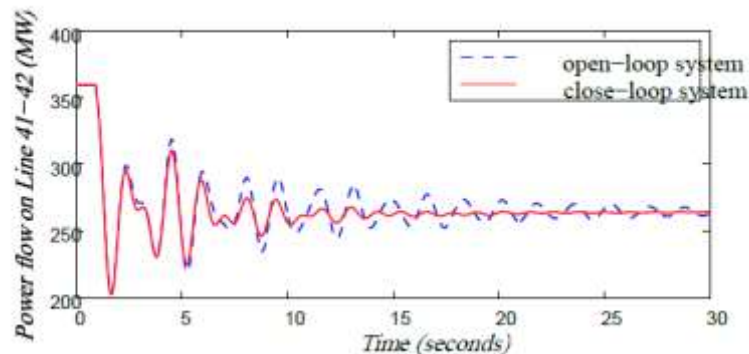
اختلال سیستم تحریک

اختلال توسط یک ضربه کوچک در مرجع ولتاژ سیستم، تحریک تولید می شود. در این مورد، مرجع ولتاژ سیستم تحریک در از ۱۰۰۱ پریونیت به ۱۱۰ پریونیت در ۲۰۰ میلی ثانیه شبیه سازی (افزایش یافته است). پاسخهای فلولی توان مربوطه در خط ۵۱-۵۰ به اختلالات در شکل زیر نشان داده شده است.

شکل ۸: پاسخ فلولی توان به اختلالات تحریک در شرایط نامی



شکل ۹: پاسخ های فلوی توان به افزایش بار در نقطه کار نامی



بحث و نتیجه گیری

امروزه، تقاضای افزایشی انرژی و تولید برق به تدریج سیستم انتقال قدرت موجود را به سوی محدودیت‌های کار آن سوق داده است. تقویت شبکه انتقال یک وظیفه مهم و در عین حال چالش برانگیز می باشد که در دراز مدت باید برای سیستم قدرت نظر گرفته شود. به جای ساخت خطوط جدید، استفاده از ادوات یک راه حل مقرون به صرفه تری برای بهبود قابلیت سیستم انتقال ارائه می دهد. علاوه بر این، انعطاف پذیری و کنترل پذیری ادوات نیز برای بهره‌برداری سیستم قدرت پایدار بسیار مفید است. این مقاله یک کنترلر مقاوم میرایی سیستم‌های قدرت را با ادوات برای افزایش پایداری سیگنال کوچک سیستم در برابر نوسانات فرکانس پایین طراحی و ارائه کرده است. تلاش‌های اصلی انجام شده در این زمینه به صورت خلاصه بیان شده است.

- ۱ - مدل‌های سیگنال کوچک سیستم قدرت با گذرای الکترومکانیکی ژنراتور سنکرون و ادوات ارائه شد. در مرحله مدل سازی سیستم، حالت همراه با سیستم فلوهای توان استاتیکی سیستم در نظر گرفته شد. دینامیک‌های سیگنال کوچک کل سیستم به درستی خطی سازد شد و در معادلات فضای بیان شد. یک سیستم چند مدله متشکل از یک سری مدل‌های خطی در نقاط کار مختلف سیستم برای طراحی کنترلر مقاوم میرایی تشکیل شد.
- ۲ - بهبود میرایی نوسانات فرکانس پایین با طراحی مطلوب کنترلرهای مکمل. دو شرط اساسی برای طراحی کنترلرهای میرایی مکمل بدست آمد. عبارتند بودند از: الف) کنترل کننده باید به طور موثری نسبت میرایی مودهای نوسانی با میرایی ضعیف را افزایش دهد.
- ب) کنترل کننده باید در برابر عدم قطعیت‌های سیستم مقاوم باشد. برای ارضای نیازهای فوق یک رویکرد سیستم چند مدله-چندهدفه مبتنی بر برای طراحی کنترلرهای میرایی ارائه شد.

هدف کنترلی بهبود میرایی به صورت جایابی قطب محلی در قیود فرمول بندی شد و معیار لیاپانوف تعمیم یافته برای اطمینان از پایداری سیستم حلقه بسته استفاده شد. ساختار فرمول بندی ساده بوده و درک آن آسان است. هر دو عدم قطعیت‌های ساختار یافته و بدون ساختار سیستم در فرمول بندی مسئله می توانند در نظر گرفته شوند برای بهینه سازی سیگنال‌های کنترلی و حذف اغتشاش عدم قطعیت بدون ساختار، به حداقل رساندن حساسیت‌های نرم محدود بین خروجی‌های مختل شده و خروجی‌های واقعی سیستم اتخاذ شده است و به صورت یک مسئله بهینه سازی با قیود فرمول بندی شده است. با ادغام قیود بهبود میرایی، مسئله کنترل مقاوم میرایی به صورت یک مسئله بهینه سازی ترکیبی فرمول بندی شده است. برای اطمینان از استحکام سیستم در نقطه کار غیر نامی خاص عدم قطعیت ساختار یافته، مجموعه‌های متعددی از قیود را میتوان با توجه به مدل‌های مختلف خطی تشکیل داد. سپس مسئله بهینه سازی ترکیبی با توجه به یک مدل نامی

سیستم مدل سیستم واحد تحت نقطه کار نامی را می توان با پارامتریزه کردن متغیرهای ماتریس سیستم و ماتریس لیاپانوف خطی سازی کرد، و آن را با حلگرهای محذب حل نمود. از آنجا که متغیرهای ماتریس با توجه به مدل های سیستم های مختلف تغییر میکنند این روش برای یک سیستم چند مدله قابل اجرا نیست. برای پیدا کردن یک کنترل کننده فیدبک خروجی مشترک برای یک سیستم چند، مدله یک روش دو مرحله ای در اینجا به کار رفته است، به طوری که پارامترهای کنترلی را میتوان به طور سیستماتیک بدون پارامتریزه کردن متغیرهای ماتریس تعیین نمود.

ادوات و رویکرد سیستم چندهدفه چند مدله ارائه شده مبتنی بر به صورت جداگانه به کنترلرهای دو اعمال شده است. طرح های کنترلی به صورت ترتیبی در یک سیستم دو ناحیه ای و یک سیستم پنج ناحیه ای استفاده شده است که در آن جایابی قطب محلی و بهینه سازی سیگنال های کنترلی به طور همزمان برای نقاط کار مختلف سیستم در نظر گرفته شده است. سیگنال های فیدبک کنترلرها بر اساس ضرایب مشارکت و مانده های مودال (معین) انتخاب شدند. برای سیستم دو ناحیه ای. ترکیبی از دو انحراف سرعت روتور با ضرایب مشارکت بالا به مودهای نوسانی غالب به عنوان ورودی کنترلر مورد استفاده قرار گرفت. در حالی که برای یک سیستم پنج ناحیه ای سیگنال های جریان خط محلی با رویت پذیری بالا حول مودهای نوسانی غالب به عنوان سیگنال فیدبک استفاده شد. به منظور کاهش پیچیدگی محاسباتی، بهینه سازی در سیستم های کاهش مرتبه یافته شده انجام شد؛ بنابراین، مرتبه کنترلر به دست آمده از مسئله بهینه سازی با مرتبه سیستم های کاهش مرتبه یافته یکسان بود. با این حال، کاهش مرتبه بیشتر هنوز هم می تواند برای کنترلرهای اتخاذ شود در صورت لزوم نتایج تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه سیستم های حلقه بسته خطی با مرتبه کامل نشان داد که کنترلرهای پیشنهادی به اندازه کافی می تواند نسبت میرایی را از یک یا چند مود نوسانی غالب برای نقاط کار از پیش انتخاب شده سیستم بهبود دهند. علاوه بر این در مقایسه با کنترلرهای طراحی شده برای مدل نامی، سیستم کنترلر پیشنهادی عملکرد بهتری را در نقاط کار غیر نامی سیستم نشان داده است. همچنین نتایج نشان داد که برای سیستم های بزرگ مانند سیستم پنج ناحیه ای یک کنترلر میرایی برای میرا سازی تمام مودهای نوسانی غالب ناکافی است شبیه سازی های زمان واقعی در برای بررسی عملکرد کنترلر طراحی شده انجام شد. نتایج شبیه سازی نشان داد که کنترلرها قادر به حفظ عملکرد سیستم و تامین پایداری در نقاط کار مختلف با اختلالات مختلف هستند.

سیستم به عنوان یک فرمت تعمیم یافته از رویکرد سیستم چند هدفه چند مدل مبتنی بر کاربرد آن برای طراحی هماهنگ کنترلرهای میرایی شد به طوری که یک سری از کنترلرهای مختلف طراحی شوند. طراحی هماهنگ در یک سیستم پنج ناحیه ای با متعدد بررسی شد. روش طراحی ترتیبی در اینجا اتخاذ باید به صورت متوالی بدون اتصال متقابل بین ادوات برای بهبود میرایی چهار مود نوسانی بین ناحیه ای با میرایی ضعیف اجرا شد برای کاهش تعاملات نامطلوب بین کنترلر های مختلف سیگنال های فیدبک به دقت بر اساس مانده های مودال انتخاب شدند. به جای استفاده از سیگنال های محلی قابل اندازه گیری سیگنال های گسترده کنترل شده از راه دور معرفی شدند به طوری که هر یک از دستگاه های می توانند دو تا از چهار مود غالب را پوشش دهند. نتایج تجزیه و تحلیل مقادیر ویژه نشان داد که طراحی هماهنگ به اندازه کافی میرایی سیستم را حول ۴ مود نوسانی برای نقاط کار مختلف سیستم بهبود داده است. عملکرد کنترلر میرایی طراحی شده از طریق شبیه سازی زمان واقعی بر اعتبار سنجی شده است. نتایج شبیه سازی عددی نشان داد که طراحی از نظر اثربخشی و روی نیرومندی موفق آمیز بوده است. بر اساس کارهای ارائه شده در این تحقیق مطالعات تحقیقات آینده را میتوان به صورت بندهای زیر مطرح نمود:

۱- شبیه سازی زمان واقعی استفاده شده برای اعتبار سنجی کنترلر بر اساس مدل های دقیق سیستم قدرت و ادوات انجام شد. بر اساس نتایج شبیه سازی مشخص شده بود که طراحی کنترلرها در انجام شده در بسیاری از موارد موثر بودند. با این حال، سیستم های خطی با مدل معادل ادوات شبیه سازی زمان واقعی نیز محدودیت روش های کنترل میرایی غالب را بر اساس مدل سیستم کاهش مرتبه داده شده نشان

داد به طوری که به دلیل ساده سازی سیستم در عمل این رویکرد کارایی کمتری خواهد داشت. در نظر گرفتن مدل‌های دقیقتر برای سیستم قدرت و با جزئیات بیشتر در مرحله طراحی کنترلر باعث بهبود بیشتر کنترلر میرایی طراحی شده برای سیستم‌های قدرت واقعی خواهد شد. همان طور که مسئله غیر محدب و سیستماتیک بهینه سازی ترکیبی با تفکیک ماتریس لیاپانوف در دو مرحله حل شد. پاسخ های بدست آمده می‌تواند محافظه کارانه باشند و ممکن است به صورت محلی بهینه سازی نشده باشند؛ بنابراین بررسی امکان استفاده از الگوریتم‌های دیگر و یا حل کننده برای یافتن پاسخ بهینه چنین مسئله ای می‌تواند انجام شود.

۲- با سیگنال های غیر خطی مانند نتایج شبیه سازی نشان داد که طراحی کنترلرهای میرایی کنترل شده از راه دور با تاخیر زمانی کوچک (۱۰۰ میلی ثانیه) سازگار بود اگر چه تاخیر در مرحله طراحی در نظر گرفته نشده است با این حال برای سیستم‌های قدرت با تاخیر زمانی قابل ملاحظه، بهتر است به مسئله تاخیر زمانی به درستی در طرح‌های کنترلی توجه شود. همانطور که در مقاله بیان شده است، مسئله کنترلر میرایی با تاخیر زمانی می‌تواند با استفاده از روش ترکیبی با حساسیت فرمول بندی شود، از این رو روش طراحی پیشنهادی مبتنی بر باید برای مسئله فوق قابل اجرا باشد.

۳- در مقایسه با سیستم‌های انتقال AC سنتی، سیستم‌های HVDC براساس جوانب زیر مزایای خوبی دارند: الف) تلفات انتقال پایین تر برای مسافت های طولانی. ب) اتصال بهتر بین سیستم‌های با سطوح ولتاژ و فرکانس مختلف. ج) کنترل پذیری بیشتر بر فلوهای توان؛ علاوه بر این، سیستم‌های HVDC مبتنی بر VSC قادر به ارائه کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو هستند. از آنجا که مکانیزم مدولاسیون فلوهای توان سیستم‌های HVDC بسیار شبیه به ادوات FACTS است، بنابراین این تعمیم و توسعه کنترلر مقاوم میرایی پیشنهادی برای کنترلر میرایی مکمل HVDC می‌تواند قابل توجه باشد. علاوه بر این، روش طراحی هماهنگ پیشنهادی همچنین می‌تواند برای سیستم HVDC چند ترمینالی تعمیم داده شود.

منابع:

1. A. C. Zolotas, B. Chaudhuri, I. M. Jaimoukha, and P. Korba, "A Study on LQG/LTR Control for Damping Inter-Area Oscillations in Power Systems," IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 15, pp. 151-160, 2007.
2. D. Simfukwe and B. C. Pal, "Robust and Low Order Power Oscillation Damper Design Through Polynomial Control," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 28, pp. 1599-1608, 2013.
3. G. Berube, L. Hajagos, and R. Beaulieu, "Practical utility experience with application of power system stabilizers," IEEE PES Working Group Panel Presentation on Power System Stabilizers, 1999.
4. G. Rogers, Power System Oscillations, Kluwer Academic Publishers, 2000.
5. H. F. Wang, F. J. Swift, and M. Li, "A unified model for the analysis of FACTS devices in damping power system oscillations. II. Multi-machine power systems," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, pp. 1355-1362, 1998.
6. H. Quinot, H. Bourles, and T. Margotin, "Robust coordinated AVR+PSS for damping large scale power systems," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 14, pp. 1446-1451, 1999.
7. I. R. Petersen and R. Tempo, "Robust control of uncertain systems: Classical results and recent developments," Automatica.
8. M. Chino, H. Nakayama, H. Nagai, H. Terada, G. Katata, and H. Yamazawa, "Preliminary estimation of release amounts of 131I and 137Cs accidentally

- discharged from the Fukushima Daiichi nuclear power plant into the atmosphere," *Journal of nuclear science and technology*, vol. 48, pp. 1129-1134, 2011.
9. M. Hoel and S. Kverndokk, "Depletion of fossil fuels and the impacts of global warming," *Resource and Energy Economics*, vol. 18, pp. 115-136, 1996.
 10. M. Parsa and J. Toyoda, "Implementation of a hybrid power system stabilizer," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 4, pp. 1463-1469, 1989.
 11. M. Simoes, D. C. Savelli, P. C. Pellanda, N. Martins, and P. Apkarian, "Robust Design of a TCSC Oscillation Damping Controller in a Weak 500-kV Interconnection Considering Multiple Power Flow Scenarios and External Disturbances," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 24, pp. 226-236, 2009.
 12. R. Mohan Mathur and R. K. Varma, *Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems*, Wiley-IEEE Press, 2002.
 13. W. Watson and G. Manchur, "Experience with Supplementary Damping Signals for Generator Static Excitation Systems," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. PAS-92, pp. 199-203, 1973.
 14. X.-P. Zhang, C. Rehtanz, and B. Pal, *Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control*, Springer, 2006.
 15. Z. Wang, C. Y. Chung, K. P. Wong, and C. T. Tse, "Robust power system stabiliser design under multi-operating conditions using differential evolution," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 2, pp. 690-700, 2008.