# کنترل ولتاژ جبران‌کننده سنکرون استاتیکی در سیستم قدرت با استفاده از کنترل تطبیقی مسطح

سالار شاهنگی[۱،۴]، محمدرضا مرادیان*[۲،۴]، غضنفر شاهقلیان[۳،۴]

۱- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران
*۲- استادیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، moradian54@gmail.com
۳- دانشیار، دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران، shahgholian@iaun.ac.ir
۴- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۶/۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۱۰

**چکیده: جبران‌کننده سنکرون استاتیکی (STATCOM) یکی از ادوات FACTS است که ساختار آن بر اساس مبدل منبع ولتاژ بوده و برای کنترل ولتاژ خط انتقال به صورت موازی در سیستم قدرت نصب می‌شود. در این مقاله یک سیستم کنترل تطبیقی مسطح برای کنترل ولتاژ خروجی STATCOM شبیه‌سازی شده است. کنترل‌کننده با خطی‌سازی دینامیک‌های غیرخطی و تغییر متغیرهای حالت سیستم، قوانین پایداری ورودی کنترلی را طراحی کرده و یک قانون تطبیقی برای طراحی ضرایب کنترل‌کننده با حداقل خطای سیستم بدست می‌آید. در نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده تطبیقی با کنترل‌کننده سنتی PI مقایسه شده است.**

**واژه‌های کلیدی: جبران‌کننده سنکرون استاتیکی، کنترل‌کننده، کنترل تطبیقی مسطح.**

## ۱- مقدمه

گسترش روز افزون صنعت همراه با افزایش بارهای مصرفی و حفظ پایداری دینامیکی همزمان با تامین سطح مجاز ولتاژ باعث ایجاد محدودیت انتقال توان در سیستم قدرت شده است [۱،۲].

سیستم انرژی الکتریکی مدرن، شبکه پیچیده‌ای از ماشین‌های سنکرون، خطوط انتقال و بارها است که مشخصه‌های سیستم با تغییرات موجود در بار و برنامه‌های تولید تغییر می‌کند [۳،۴]. احداث خطوط انتقال جدید برای افزایش ظرفیت انتقال با افزایش هزینه بهره‌برداری همراه است، لذا برای تامین بار شبکه از جبران‌کننده جهت بهبود وضعیت خطوط موجود استفاده می‌شود. وسایل جبران‌کننده در یک سیستم قدرت نقش اساسی در تثبیت ولتاژ در محدوده مورد نظر را دارند [۵،۶].

کنترل‌کننده های سیستم های انتقال AC انعطاف پذیر[۱] (FACTS) امکانات و قابلیت‌های زیادی برای سیستم قدرت فراهم سازند که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد[۷]:

الف- کنترل جریان توان اکتیو برای کنترل انتقال و مقدار آن در مسیرهای دلخواه.

ب- کنترل بارگیری خطوط انتقال تا نزدیکی ظرفیت حرارتی خطوط برای جلوگیری از اضافه بار با استفاده از حداکثر ظرفیت خطوط انتقال که باعث کاهش ذخیره تولید در سیستم در اثر افزایش توانایی انتقال بین نواحی می‌شود.

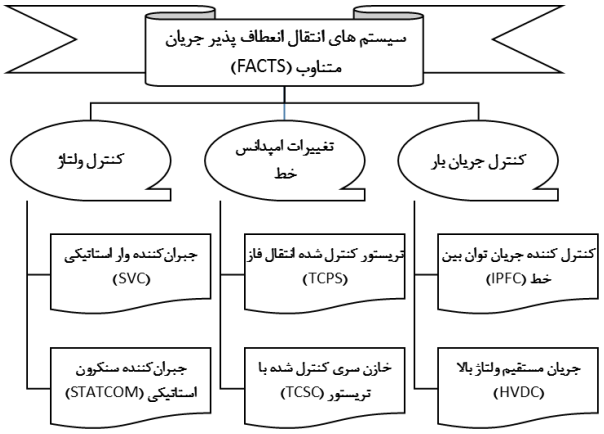
ج- میرایی نوسانات توان که عدم میرایی آنها باعث صدمه زدن به تجهیزات و محدود کردن ظرفیت انتقال خطوط می‌شوند.

د- محدود کردن اثر خطاها و معیوب شدن تجهیزات که باعث جلوگیری از توسعه و گسترش حوادث و خروج پی در پی تجهیزات می‌شوند.

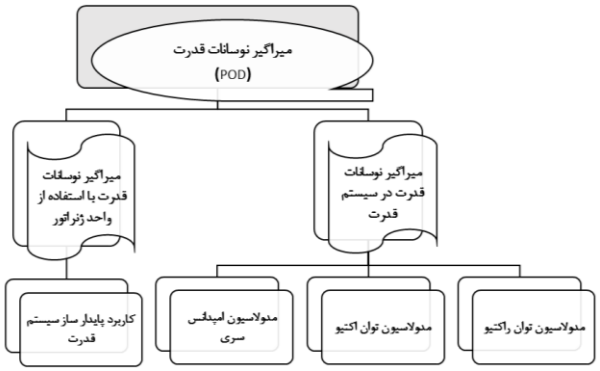
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021

سیستم‌های انتقال ac انعطاف‌پذیر در یک تقسیم‌بندی دیگر مطابق شکل (۱) به سه گروه ادوات FACTS کنترل شده با تریستور، ادوات FACTS بر پایه‌ی مبدل منبع ولتاژ و ادوات هیبرید تقسیم‌بندی می‌شوند [۸،۹].

از نظر نوع اتصال کنترل‌کننده‌های FACTS مطابق شکل (۱) به چهار نوع a) کنترل‌کننده سری مانند خازن سری کنترل‌شده با تریستور[۲] (TCSC) و جبران‌کننده سری استاتیکی سنکرون[۳] (SSSC)، b) کنترل‌کننده موازی مانند جبران‌کننده وار استاتیکی[۴] (SVC) و جبران‌کننده سنکرون استاتیکی[۵] (STATCOM)، c) کنترل‌کننده سری–سری مانند کنترل‌کننده جریان توان بین‌خط[۶] (IPFC) و تنظیم‌کننده زاویه فاز تریستور کنترل‌شده[۷] (TCPAR) و d) کنترل‌کننده سری–موازی مانند کنترل‌کننده پخش توان یکنواخت[۸] (UPFC) تقسیم می‌شوند. معمولاً دو نوع کنترل‌کننده میراگیر نوسانات قدرت وجود دارد که شامل پایدارساز سیستم قدرت (در واحد ژنراتور) و کنترل‌کننده‌های FACTS (در سیستم انتقال) است که در شکل (۲) نشان داده شده‌اند [۱۰،۱۱].



شکل (۱): تقسیم‌بندی ادوات FACTS بر اساس عملکرد



شکل (۲): میرای نوسانات سیستم قدرت

در زمینه کاربرد ادوات FCATS در سیستم قدرت مطالعات مختلفی انجام شده است [۱۲-۱۸]. در مقاله [۱۹] با تنظیم بهینه منابع توان راکتیو موجود در شبکه قدرت همراه با ادوات FACTS سری و موازی شامل TCSC و SVC به‌منظور هماهنگی آنها با یکدیگر و با استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری مانند ازدحام ذرات به کاهش توان اکتیو، هزینه‌های عملیاتی سیستم از جمله هزینه ادوات FACTS و تراکم در شبکه‌های انتقال کمک می‌شود و با شبیه‌سازی شبکه تست ۳۰ باسه IEEE و قرار دادن ادوات FACTS در آن روش پیشنهادی بررسی می‌شود. در مقاله [۲۰] روشی برای جایابی و تعیین اندازه بهینه TCSC و SVC جهت بهبود شرایط بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی کلاغ ارائه شده که مکان بهینه نصب ادوات سری و موازی به ترتیب بر اساس توان‌های عبوری راکتیو خطوط و شاخص مجاورت فروپاشی ولتاژ تعیین می‌شوند. در مقاله [۲۱] برای تنظیم پارامترهای سیستم قدرت و ادوات FACTS از روش‌های بهینه‌سازی ژنتیک، ازدحام ذرات، ترکیب منطق فازی با الگوریتم ژنتیک و ترکیب منطق فازی با الگوریتم تکامل دیفرانسیل استفاده شده و دو نوع از ادوات FACTS شامل TCSC و SVC برای بهینه‌سازی مصرف توان راکتیو شبکه و کاهش تراکم خطوط مورد استفاده قرار گرفته است. در مقاله [۲۲] طراحی کنترل‌کننده میراساز برای میرایی نوسانات سیستم قدرت بر مبنای UPFC ارائه شده که سیستم تحت مطالعه یک سیستم تک‌ماشینه متصل به شین بینهایت و کنترل‌کننده با روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک برای سیستم بهینه‌سازی شده است و تأثیر کنترل‌کننده میراساز بر میرایی نوسانات سیستم قدرت با استفاده از شبیه‌سازی غیر خطی در حوزه زمان نشان داده شده است.

مقالات مختلفی در زمینه‌ی مدل کردن و طراحی سیستم کنترل STATCOM، مانند تنظیم ولتاژ سیستم قدرت [۲۳]، کنترل چند متغیره برای بهبود مشخصات جبران‌کننده [۲۴]، کنترل فیدبک حالت [۲۵] و پخش توان [۲۶] تاکنون ارائه شده است.

در مقاله [۲۷] کاربرد STATCOM بر اساس تنظیم‌کننده ولتاژ در ژنراتورهای القایی خود تحریک تغذیه‌کننده بارهای غیرخطی نشان داده شده است. در مقاله [۲۸] اثرات سه کنترل‌کننده‌ی FACTS از جمله STATCOM بر پایداری ولتاژ سیستم قدرت با استفاده از یک سیستم آزمایشی شش شینه بررسی‌شده که نتایج شبیه‌سازی افزایش حدود بار پذیری سیستم قدرت را نشان می‌دهد. در مقاله [۲۹] تحلیل کنترل‌پذیری ورودی–خروجی برای تعیین سیگنال ورودی مناسب برای کنترل ادوات FACTS به منظور دستیابی به میرایی بهتر و بیشتر نوسانات داخلی سیستم قدرت ارائه شده است. انتخاب سیگنال ورودی، یکی از موارد مهم در طراحی کنترل‌کننده است. از سیگنال‌های ورودی که برای کنترل‌کننده‌های STATCOM استفاده می‌شوند می‌توان به توان اکتیو تزریقی موثر، ولتاژ باس جبران‌کننده، ولتاژ داخلی محاسبه‌شده و فاز راکتانس تحریک دیده‌شده از محل جبران‌کننده اشاره کرد. در مقاله [۳۰] مدل‌های مختلف برای تحلیل پایداری حالت دائمی و پایداری گذرای سیستم قدرت با STATCOM و فرض ولتاژ و جریانهای سینوسی و متقارن در فرکانس نامی ارائه شده که این مدل تحت اغتشاش بزرگ با مولفه‌های هارمونیکی جریان پاسخ مناسبی ندارد.

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

در این مقاله یک مدل کنترل مبتنی بر کنترل‌کننده تطبیقی مسطح برای حلقه‌های کنترلی جبران‌کننده سنکرون استاتیکی شبیه-سازی شده است. این کنترل‌کننده می‌تواند پارامترهای کنترل را به-صورت دینامیکی در طول اغتشاش و خطا تنظیم کند. در این کنترل-کننده در هر لحظه از ولتاژ خط فیدبک گرفته شده و مطابق یک الگوریتم تطبیقی، ضرایب کنترل‌کننده PI به صورت آنلاین تنظیم می‌شود. مقابله با اثرات اغتشاش و عیب در خط انتقال و کاهش میزان نوسانات ولتاژ و افزایش حاشیه پایداری سیستم از جمله اهداف شبیه‌سازی این روش کنترلی است.

## ۲- ساختار کنترل تطبیقی مسطح

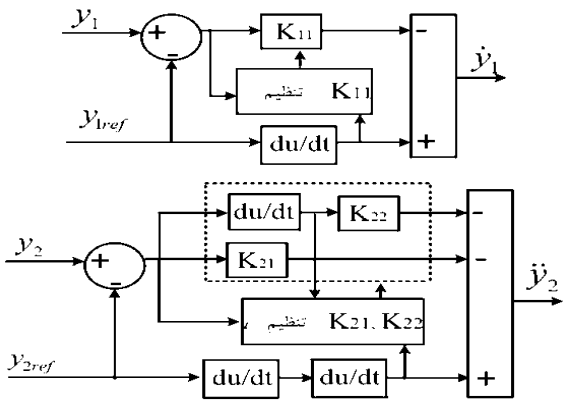
در مرسوم‌ترین سیستم‌های کنترلی استفاده شده برای STATCOMها، ولتاژ خروجی توسط کنترل‌کننده‌های سنتی PI تنظیم می‌گردد. ولتاژ اندازه‌گیری شده خط ($V_m$) با ولتاژ مرجع ($V_{ref}$) مقایسه شده و کنترل-کننده ولتاژ، مرجع جریان راکتیو مورد نیاز ($I_{qref}$) را تولید می‌کند.

جریان راکتیو سیستم ($I_q$) با جریان $I_{qref}$ مقایسه می‌شود و خروجی کنترل‌کننده جریان می‌تواند زاویه فازور ولتاژ خروجی STATCOM را تعیین کند. مشکل اصلی کنترل کننده‌های سنتی PI، تنظیم ضرایب کنترلی آن است که با تغییر نقطهٔ کار عملکرد سیستم باید مجددا تنظیم شود تا بتواند عملکرد قابل قبولی داشته باشد.

یک روش برای تنظیم ضرایب کنترلی در کنترل‌کننده‌های PI، روش آزمون و خطا است. در این روش با تغییر ضرایب و مشاهده تغییرات رفتار خروجی سیستم، اقدام به اصلاح ضرایب کنترلی نموده و این امر تا جایی تکرار می‌شود که شرایط قابل قبولی در رفتار خروجی سیستم حاصل گردد. به‌طور کلی در حالت عملی، کوچکترین تغییر در ساختار شبکه مثلا اضافه شدن یک STATCOM جدید، منجر به اختلال در رفتار سیستم‌های کنترلی از پیش تنظیم شده می‌شود و ناچار به اصلاح مجدد ضرایب کنترل‌کننده با روش آزمون و خطا خواهیم بود که کار نه چندان ساده‌ای است.

همچنین حتی اگر روش آزمون و خطا را برای نقاط کار محتمل سیستم به صورت آفلاین انجام داده و ضرایب بهینه به‌دست آمده را در یک جدول ذخیره نماییم، بازهم عملکرد سیستم در شرایطی که پیش-بینی نشده است، ناکارآمد خواهد بود و کنترل‌کننده نمی‌تواند کنترل قابل قبولی داشته باشد. بنابراین سیستم کنترلی STATCOM ممکن است در زمانی که بیشترین احتیاج به آن وجود دارد، به خوبی کار نکند.

کنترل تطبیق مسطح می‌تواند مطابق بلوک دیاگرام شکل (۳) انجام شود که در آن $y_{1ref}$ و $y_{2ref}$ شرایط اولیه و نهایی است که توسط سیستم مورد نظر تعیین می‌شوند. سیستم STATCOM می‌تواند معادل یک سیستم خطی در نظر گرفته شود و مسیرهای تمام متغیرهای سیستم را می‌توان به‌طور مستقیم با خروجی پیوسته و مشتقات آن بدون حل معادله دیفرانسیل محاسبه کرد. این مزیت کنترل تطبیقی مسطح هنگام استفاده برای کنترل STATCOM است.




شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترل تطبیقی مسطح [۳۱]

## ۳- نتایج شبیه‌سازی

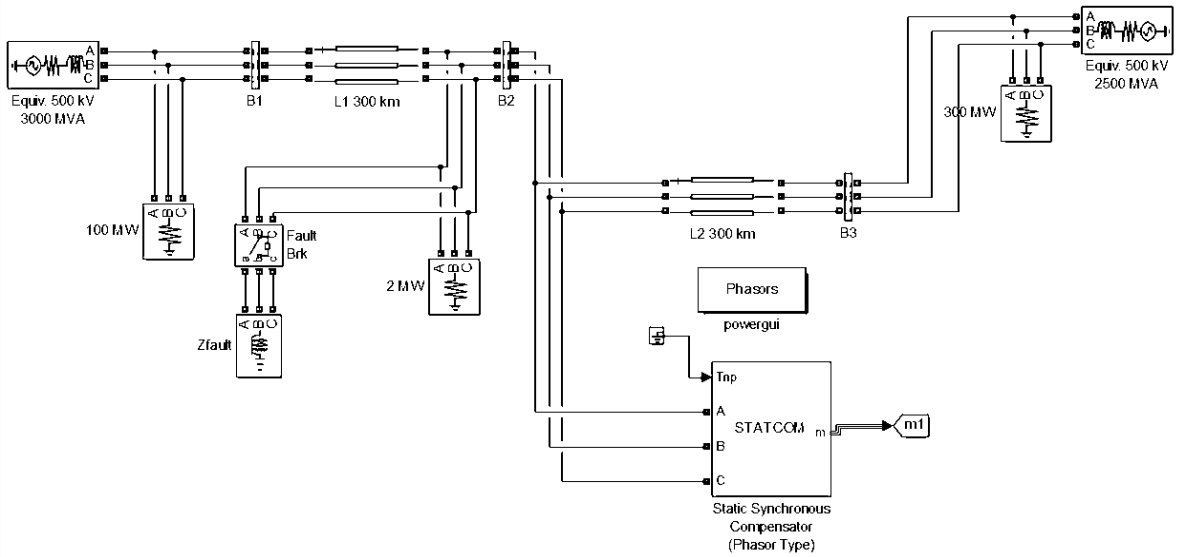
شکل (۴) مدل سیستم قدرت برای مطالعه و شبیه سازی در محیط سیمولینک متلب را نشان می‌دهد. سیستم قدرت سه باسه و دو ماشینه است. توان هر ماشین ۳۰۰۰ مگاولت آمپر و ولتاژ آن ۵۰۰ کیلو ولت است. جبران‌ساز STATCOM به باس دو متصل است.

در کنترل‌کننده ولتاژ اندازه‌گیری شده خط با ولتاژ مرجع مقایسه شده و تنظیم‌کننده جریان مرجع راکتیو مورد نیاز را فراهم می‌کند. شکل‌های (۵) و (۶) به ترتیب ولتاژ و توان راکتیو در باس دو را نشان می‌دهند که در قسمت (الف) با کنترل‌کننده PI و در قسمت (ب) با کنترل‌کننده تطبیقی نتایج نشان داده شده‌اند.

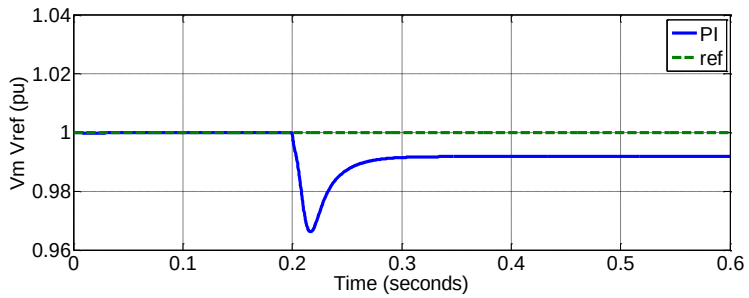
با کنترل‌کننده PI مشاهده می‌شود که پاسخ ولتاژ باس دو در هنگام رخداد خطا در لحظه ۰/۲ ثانیه به‌صورت نامطلوب بوده و با رخداد خطا در خط انتقال، ولتاژ به مقدار ۰/۹۶۵ پریونیت رسیده است و پس از خطا ولتاژ پس از مدت ۰/۱ ثانیه در مقدار ۰/۹۹۴ پریونیت ماندگار شده که نسبت به مقدار واحد دچار خطای حالت دائمی شده است.

با کنترل‌کننده تطبیقی در لحظه وقوع خطا در خط انتقال، ولتاژ خروجی کاهش یافته و در این زمان کنترل‌کننده توان راکتیو را به خط تزریق کرده و بدین ترتیب ولتاژ خروجی به مقدار واحد بازمی‌گردد و سپس توان راکتیو به صفر می‌رسد. این ساختار کنترلی با زمان کمتری نسبت به کنترل‌کننده PI عمل می‌کند و سریعتر ولتاژ خروجی به مقدار مطلوب می‌رسد. همانطور که مشاهده می‌شود با وجود کنترل‌کننده تطبیقی مسطح، خطای دائمی پس از رخداد خطا در باس حذف شده که نسبت به کنترل‌کننده PI عملکرد مناسبی در کاهش خطای حالت ماندگار دارد.

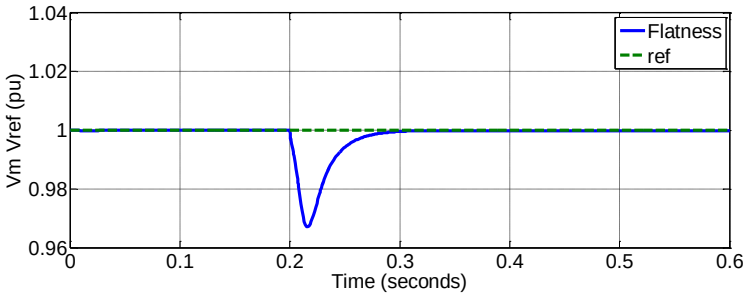
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]




شکل (۴): مدل سیستم قدرت مورد مطالعه در محیط سیمولینک متلب



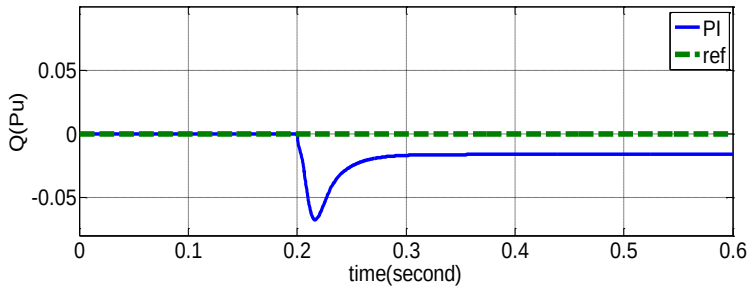

(الف) کنترل‌کننده PI



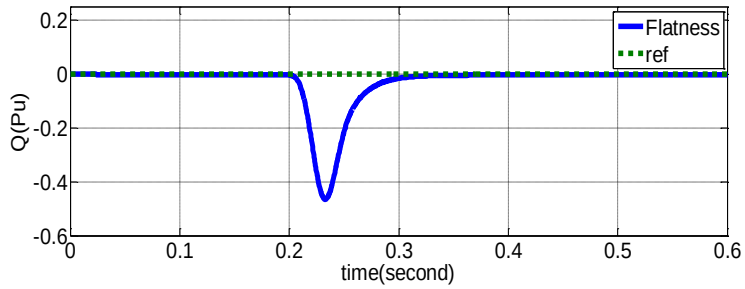

(ب) کنترل‌کننده با ساختار مسطح

شکل (۵): ولتاژ باس دو در حالت رخداد خطا در ۰/۲ ثانیه با استفاده از کنترل‌کننده‌های PI و ساختار مسطح

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

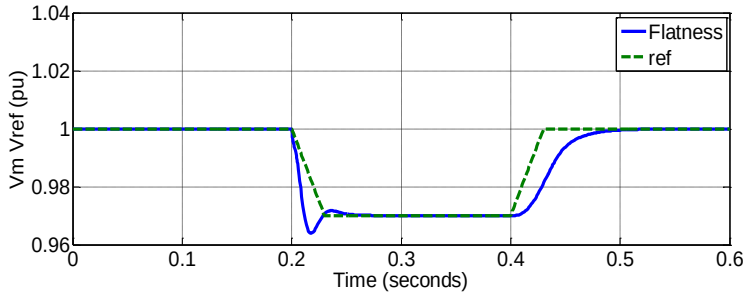



(الف) کنترل‌کننده PI

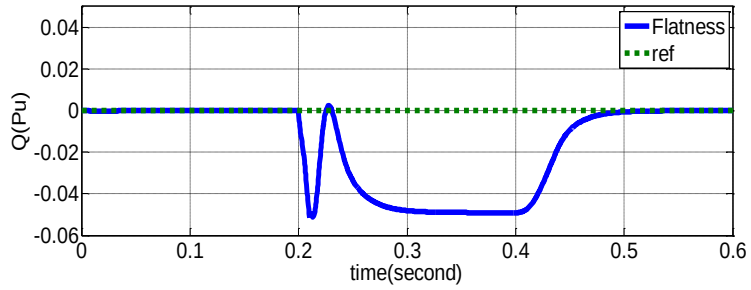



(ب) کنترل‌کننده با ساختار مسطح

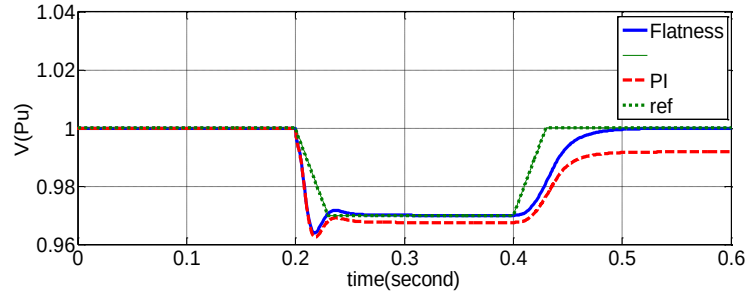
شکل (۶): توان راکتیو باس دو در حالت رخداد خطا در ۰/۲ ثانیه با استفاده از کنترل‌کننده‌های PI و ساختار مسطح




شکل (۷): ولتاژ باس دو با استفاده از ساختار مسطح

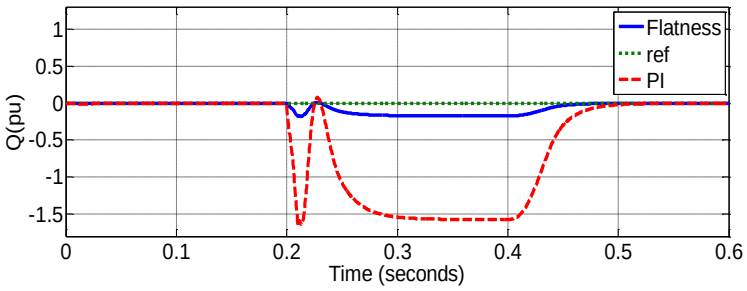



شکل (۸): توان راکتیو باس دو با استفاده از ساختار مسطح

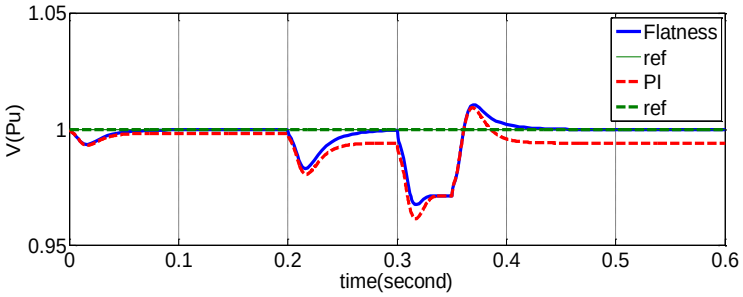



شکل (۹): ولتاژ باس دو با استفاده از ساختارهای مسطح و PI

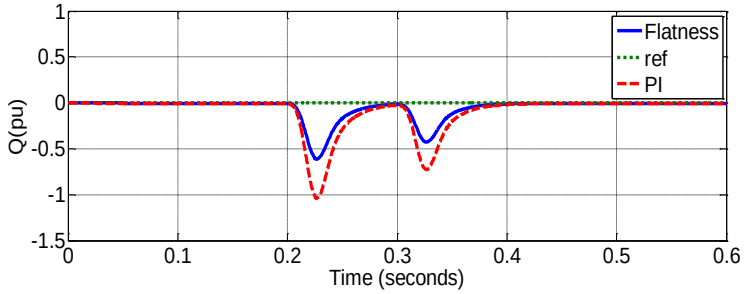
[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]



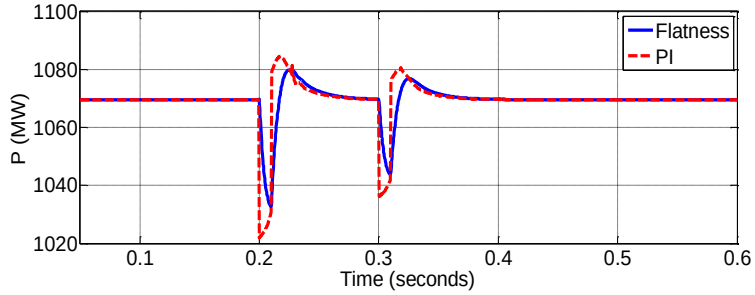

شکل (۱۰): توان راکتیو باس دو با استفاده از ساختارهای مسطح و PI




شکل (۱۱): ولتاژ باس دو با استفاده از ساختارهای مسطح و PI




شکل (۱۲): توان راکتیو باس دو با استفاده از ساختارهای مسطح و PI




شکل (۱۳): توان اکتیو باس دو با استفاده از ساختارهای مسطح و PI

### ۳-۱- تاثیر ولتاژ مرجع

ولتاژ مطلوب و ولتاژ باس دو با کنترل‌کننده تطبیقی در شکل (۷) آمده که در آن تغییر ولتاژ مرجع با خط‌چین نشان داده شده است. ولتاژ مطلوب در لحظه ۰/۲ ثانیه به ۰/۹۷ پریونیت کاهش یافته و در لحظه ۰/۴ ثانیه به مقدار واحد باز می‌گردد. در لحظه ۰/۲ ثانیه بار سلفی نیز به خط انتقال متصل به باس دو در نظر گرفته می‌شود. این ساختار به‌منظور ارزیابی کنترل‌کننده تطبیقی مسطح در کنترل‌کننده جبران-کننده ارائه شده است. توان تزریق شده به خط انتقال با استفاده از ساختار کنترل تطبیقی مسطح در شکل (۸) نشان داده شده است.

مشاهده می‌شود با استفاده از ساختار کنترلی تطبیقی، ولتاژ خروجی با حداقل نوسانات به مقدار مطلوب رسیده و تزریق توان راکتیو به خوبی انجام شده و پس از دست‌یابی به مقدار ولتاژ مطلوب، توان راکتیو به صفر رسیده است. در این کنترل‌کننده با توجه به ساختار معادلات آن، پاسخ ولتاژ باس به‌صورت همواری دنبال شده و نوسانات به حداقل رسیده است. در شکل‌های (۹) و (۱۰) هر دو کنترل‌کننده PI و کنترل‌کننده مسطح با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

### ۳-۲- تاثیر مقادیر متفاوت بار

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021
[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

در این قسمت به بررسی و تحلیل خط انتقال با در نظر گرفتن اثرات تغییر بار اشاره می‌شود. در لحظه ۰/۲ ثانیه در باس دو با تغییر بار از ۳۰۰ مگاوات به ۵۰۰ مگاوات افزایش یافته و در لحظه ۰/۳ ثانیه در همان باس دو خطای اضافه و قطع شدن بار سلفی رخ داده و تا پایان شبیه‌سازی ادامه می‌یابد. شکل (۱۱) ولتاژ باس دو و شکل‌های (۱۲) و (۱۳) توان‌های راکتیو و اکتیو در باس دو را نشان می‌دهند.

همان‌طور که دیده می‌شود کنترل‌کننده PI در ساختار کنترلی STATCOM با وجود تغییر مقدار بار در باس دو در لحظه ۰/۳ ثانیه و رخداد خطا در لحظه ۰/۲ ثانیه حالت عدم تطبیق و غیرمقاوم دارد و خروجی ولتاژ باس با نوسان به مقداری با خطای حالت دائمی دست یافته و قادر نبوده به مقدار مطلوب برسد. این در صورتی است که با استفاده از ساختار تطبیقی مسطح، به خوبی کنترل‌کننده بر شرایط جدید غلبه کرده و می‌تواند عملکرد STATCOM را در کاهش نوسانات و عملکرد مقاوم بهبود بخشد.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله براساس اهمیت کنترل و پایداری ولتاژ و توان با وجود شرایط کاری متفاوت خط انتقال، از ساختار جبران‌ساز استاتیکی با شرایط تطبیقی استفاده شده است. روش کنترلی تطبیقی PI برای ساختار STATCOM برای کنترل ولتاژ به کار برده شده است.
کنترل‌کننده PI تطبیقی برای STATCOM با کنترل STATCOM معمولی با بهره PI ثابت و از پیش تعیین شده مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که کنترل PI تطبیقی عملکرد مناسبی را در شرایط مختلف عملیاتی دارد.

## مراجع


[1] P. Ghanbari-Mobarakeh, M. Moradian, "A *new paradigm for distributed generation management considering the renewable energy uncertainties and demand response resources",* International Journal of Renewable Energy Research, Vol. 9, No. 1, pp. 215-225, March 2019.

[۲] حمیدی عبدالخالق، بیضاء جمال، عابدین‌زاده طاهر، دقیق علی، **"بهبود پایداری دینامیکی شبکه های قدرت شامل مزارع بادی فراساحلی و مجهز به سیستم انتقال** HVDC **با استفاده از کنترل‌کننده عصبی تطبیقی"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۱۱، ش.: ۴۲، ص.: ۷۹-۹۹، ۱۳۹۹.

[۳] طاووسی مجید، فانی بهادر، ادیب احسان، **"تحلیل پایداری و کنترل توربین بادی مبتنی بر DFIG با به کارگیری استراتژی FBC"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۴، ش.: ۱۵، ص.: ۳۱-۴۲، پاییز ۱۳۹۲.

[4] F. Hajimohammadi, B. Fani, I. Sadeghkhani, "*Fuse saving scheme in highly photovoltaic-integrated distribution networks*", International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 30, No. 1, e12148, Jan. 2020.

[۵] قاسمی مهدی، روستا علی‌رضا، فانی بهادر، **"کنترل هماهنگ ادوات FACTS نسل اول با استفاده از شبکه عصبی و به‌منظور افزایش پایداری گذرا در سیستم‌های قدرت"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۳، ش.: ۹، ص.: ۲۷-۴۰، بهار ۱۳۹۱.

[۶] رجب‌مومن رضا، براتی حسن، **"جایابی و تعیین اندازه** UPFC **جهت بهبود شرایط بهره‌برداری از سیستم قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی ملخ"**، تحقیقات نوین در برق، سال: ۸، ش. ۴، ص.: ۱-۱۶، ۱۳۹۸.

[7] G. Shahgholian, P. Shafaghi, S. Moalem, M. Mahdavian, *"Analysis and design of a linear quadratic regulator control for static synchronous compensator"*, Proceeding of the IEEE/ICCEE, pp. 65-69, Dubai, 2009.

[8] M. Mahdavian, G. Shahgholian, N. Rasti, *"Modeling and damping controller design for static synchronous compensator"*, Proceeding of the IEEE/ECTICON, pp. 300-304, Pattaya, Chonburi, 2009.

[۹] شیرین‌زبان امیر، براتی حسن، نصیر محمد، **"جایابی بهینه چند هدفه** UPFC **جهت برنامه‌ریزی بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی چرخه آب در طبیعت"**، تحقیقات نوین در برق، سال: ۸، ش.: ۱، ص.: ۴۷-۵۹، ۱۳۹۸.

[10] E. Jafari, A. Marjanian, S. Silaymani, G. Shahgholian, "Designing an emotional intelligent controller for IPFC to improve the transient stability based on energy function", Journal of Electrical Engineering and Technology, Vol. 8, No. 3, pp. 478-489, 2013.

[۱۱] کاظمی‌زهرانی امیر, پرستگاری معین، **"طراحی همزمان پارامترهای PSS و SVC با استفاده از روش کوانتوم بهبود یافته جهت ارتقای پایداری سیستم قدرت چند ماشینه"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۸، ش.: ۳۱، ص.: ۶۹-۷۵، ۱۳۹۶.

[12] B. Fani, M. Mahdavian, S. Javadi, "*Shunt FACTS controller: Classification, modeling, operation and control techniques*", Proceeding of the IEEE/ECTI-CON, pp. 50-53, Phuket, Thailand, June 2017.

[13] A. A. Sadiq, M. Buhari, S. S. Adamu, H. Musa, "*Coordination of multi-type FACTS for available transfer capability enhancement using PI–PSO*", IET Generation, Transmission and Distribution, vol. 14, no. 21, pp. 4866-4877, Feb. 2020.

[14] A. Hamidi, S. Golshannavaz, D. Nazarpour, "*D-FACTS cooperation in renewable integrated microgrids: A linear multiobjective approach*", IEEE Trans. on Sustainable Energy, vol. 10, no. 1, pp. 355-363, Jan. 2019

[15] B. Li, G. Xiao, R. Lu, R. Deng, H. Bao, "*On feasibility and limitations of detecting false data injection attacks on power grid state estimation using D-FACTS devices*", IEEE Trans. on Industrial Informatics, vol. 16, no. 2, pp. 854-864, Feb. 2020.

[16] N. Izadpanahi, B. Fani, A. Etesami, M. Mahdavian, S. Javadi, "*DFIG-based wind turbine using STATCOM for improvement performance*", Proceeding of the IEEE/EC-TICON, pp. 396-399, Phuket, Thailand, June 2017.

[17] G. S. Chawda, A. G. Shaik, O. P. Mahela, S. Padmanaban, J. B. Holm-Nielsen, "*Comprehensive review of distributed FACTS control algorithms for power quality enhancement in utility grid with renewable energy penetration*", IEEE Access, vol. 8, pp. 107614-107634, 2020.

[18] S. Bruno, G. D. Carne, M. L. Scala, "*Distributed FACTS for power system transient stability control*", *Energies, vol. 13, no.* 11, Article: 2901, pp. 1-16, June 2020

[۱۹] متقی علی، علیزاده محسن، عباسیان محمدعلی، **"جبران‌سازی توان راکتیو و کاهش تلفات شبکه انتقال توسط مکان‌یابی بهینه‌ی**


[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021

**ادوات** FACTS **سری و موازی با روش فازی- تکاملی"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۹، ش.: ۳۵، ص.: ۲۷-۳۸، ۱۳۹۷.

[۲۰] نوری‌نژاد نوراله، **"جایابی و تعیین اندازه TCSC و SVC جهت بهبود شرایط بهره‌برداری سیستم‌های قدرت با استفاده از الگوریتم جست‌وجوی کلاغ"**، تحقیقات نوین در برق، سال: ۸، ش.: ۱، ص.: ۶۱-۷۵، بهار ۱۳۹۸.

[۲۱] قاسمی ساسان، قلی‌پور اسکندر، **"بهینه‌سازی توان راکتیو در حضور ادوات** FACTS **با استفاده از الگوریتم های تکاملی بر پایه منطق فازی"**، روش‌های هوشمند در صنعت برق، سال: ۶، ش.: ۲۳، ص.: ۴۵-۵۴، پاییز ۱۳۹۴.

[۲۲] طاهر سیدعباس، همتی رضا، عبدالعلی‌پور علی، **"بهبود میرایی نوسانات سیستم قدرت با استفاده از UPFC بهینه‌شده توسط الگوریتم ژنتیک"**، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، سال: ۷، ش.: ۳، ص.: ۲۵۱-۲۵۶، پاییز ۱۳۸۸.

[23] N. Voraphonpiput, S. Chatratana, *"STATCOM analysis and controller design for power system voltage regulation"*, Proceeding of the IEEE/PES, pp.1-6, Aug. 2005.

[24] J. Huilam, Z. Qiang, L. Guixin, X. Jianqiang, *"An optimal fuzzy controller for synchronous generator excitation control system"*, Proceeding of the IEEE/PES, pp.1-6, Aug. 2005.

[25] V. Spitsa, A. Alexandrovitz, E. Zeheb, *"Design of a robust state feedback controller for a STATCOM using a zero set concept"*, IEEE Tran. on Pow. Del., Vol.25, No.1, pp.456-467, Jan. 2010.

[26] Z. Yang, C. Shen, M.L. Crow, L. Zhang, *"An improved STATCOM model for power flow analysis"*, Proceeding of the IEEE/PESS, Vol.2, pp.1121-1126, July 2000.

[27] B. Singh, S.S. Murthy, S. Gupta, *"STATCOM based voltage regulator for self excited induction generator feeding nonlinear loads"*, IEEE Tran. on Ind. Elec., Vol. 53, No. 5, pp. 1437-1452, Oct. 2006.

[28] R. Natesan, G. Radman, "Effects of STATCOM, SSSC and UPFC on voltage stability", IEEE Trans. On Pow. Sys., No.4, pp.546-550, 2004.

[29] C.D. Collins, A.R. Wood, N.R. Watson, *"Unbalanced STATCOM analysis in the harmonic domain"*, Proceeding of the IEEE/ICHQP, pp.232-237, Sep. 2004.

[30] C.A. Canizares, M. Pozzi, S. Corsi, E. Uzunovic, *"STATCOM modeling for voltage and angle stability studies"*, Electric Power Systems Research, pp.431–441, Vol.25, 2003.

[31] Y. Xu, F. Li, Z. Jin, C. Huang, *"Flatness-based adaptive control (FBAC) for STATCOM"*, Electric Power Systems Research, Vol. 122, pp. 76-85, May 2015.

## زیرنویس‌ها

1. Flexible alternating current transmission system
2. Thyristor controlled series capacitor
3. Static synchronous series compensator
4. Static var compensator
5. Static synchronous compensator
6. Interline power flow controller
7. Thyristor-controlled phase angle regulator
8. Unified power flow controller



[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021

# Static Synchronous Compensating Voltage Control in Power System Using Flat Adaptive Control

**Salar Shahangi[1,4], Mohamadreza Moradian[2,4], Ghazanfar Shahgholian[3,4]**

1- MSc Student, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran
2- Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, moradian54@gmail.com
3- Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran, shahgholian@iaun.ac.ir
4- Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

**Abstract: Static Synchronous Compensator (STATCOM) is a FACTS device whose structure is based on a voltage source converter and is installed in parallel to control the voltage of the transmission line in the power system. In this paper, a flat adaptive control system for STATCOM output voltage control is simulated. By linearizing the nonlinear dynamics and changing the system state variables, the controller designs the rules of control input stability, and an adaptive rule is obtained for designing the controller coefficients with the least system error. In the simulation results, the adaptive controller is compared with the traditional PI controller.**

**Keywords: Static Synchronous Compensator (STATCOM), Controller, Flat adaptive control**

[ Downloaded from jeps.dezful.iau.ir on 2026-11-14 ]

[ DOR: 20.1001.1.23222468.1399.9.4.1.5 ]
Journal of Novel Researches on Electrical Power - Vol. 9-No.4 Winter 2021