

بهبود پایداری گذرای سیستم‌های قدرت با استفاده از کنترل فازی STATCOM

علیرضا غفوری (کاشناس ارشد)

دانشگاه آزاد اسلامی واحد ساری

محمد رضا ذوالقدری (استادیار)

مهدی احسان (استاد)

دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی شریف

سیستم‌های قدرت امروزی به علت گسترش و پراکندگی روزافزون و طرح مسائلی چون تجدید ساختار، در حال تغییر و تحول اند. با استفاده از سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS) می‌توان کنترل پذیری و پایداری سیستم‌های قدرت را افزایش داد. یکی از ادوات سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر موازی همان STATCOM است که با استفاده از آن می‌توان پایداری ولتاژ، دینامیکی و گذرای سیستم قدرت را بهبود بخشید. در این نوشتار، کاربرد و کنترل مناسب STATCOM برای بهبود پایداری گذرا، مورد بررسی قرار گرفته است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های موجود در سیستم و اجتناب از پیچیدگی‌های موجود در مدل سازی، از منطق فازی برای طراحی کنترل کننده STATCOM استفاده شده است. طراحی کنترل کننده STATCOM براساس ورودی‌های مختلف انجام شده و نتایج طراحی، از طریق شبیه سازی بر روی سیستم تک ماشین-باس بی نهایت و سیستم چندماشینه مورد بررسی قرار گرفته است.

واژگان کلیدی: کنترل فازی، جبران ساز ایستای توان راکتیو، پایداری گذرا، میرایی نوسانات، زمان بحرانی رفع خطا.

zolghadr@sharif.edu
arghafouri@alum.shari.edu
ehsan@sharif.edu

مقدمه

در سال‌های اخیر به علت تجدید ساختار سیستم‌های قدرت، بسیاری از ویژگی‌های اقتصادی و فنی صنعت برق در بخش‌های مختلف - از جمله تولید، انتقال، توزیع و مصرف - تحت تأثیر قرار گرفته‌اند. این مسئله به ویژه در شبکه‌های انتقال که بارگذاری خطوط آنها باید تا حد حرارتی آنها افزایش یابد و بنابراین از محدوده‌ی حاشیه‌ی پایداری فعلی خود تجاوز می‌کنند، مطرح می‌شود. بنابراین برای دست‌یابی به سطح قابل قبولی از قابلیت اطمینان باید استراتژی‌های کنترلی ویژه‌ی به کار گرفته شود که نه تنها در حالت کارکرد عادی سیستم بلکه پس از ایجاد تغییرات ساختاری قابل ملاحظه مثل خارج شدن واحدهای تولید، خطوط انتقال و یا تغییر شرایط بار، تداوم تأمین نیاز مصرف کننده از دست نرود.

پایداری سیستم‌های قدرت به دو صورت «پایداری ولتاژ» و «پایداری زاویه‌ی» مورد بررسی قرار می‌گیرد. ناپایداری استاتیک یا ناپایداری ولتاژ بر اثر تغییرات آهسته و مداوم بار در سیستم قدرت رخ می‌دهد. پایداری زاویه‌ی در سیستم‌های قدرت متناسب با دامنه‌ی اغتشاشات و فرکانس آنها در دو حالت سیگنال کوچک (دینامیک) و گذرا مورد مطالعه قرار می‌گیرد. چنانچه دامنه‌ی اغتشاش وارد شده بزرگ باشد، پایداری سیستم تحت عنوان پایداری گذرا مطرح می‌شود. پایداری گذرا به ساختار

سیستم قدرت، نقطه‌ی کار حالت تعادل قبل از اغتشاش و بعد از رفع آن، و همچنین به دامنه و مدت زمان اغتشاش وارده بستگی دارد. یک سیستم قدرت پایدار گذراست اگر سیستم پس از رفع خطا بتواند به حالت تعادل پایدار قابل قبول برسد. برای ارزیابی پایداری گذرای سیستم قدرت، حد پایداری یا زمان بحرانی رفع خطا (CCT) تعیین می‌شود. هر قدر این زمان با مدت زمان تداوم خطا فاصله‌ی بیشتری داشته باشد، حاشیه‌ی پایداری سیستم بیشتر خواهد بود. مبنای نظری پایداری گذرا در کتاب‌ها و مراجع متفاوت مورد بررسی قرار گرفته است.^[۱-۴]

پیشرفت‌های صورت گرفته در زمینه‌ی ادوات الکترونیک قدرت در اواخر دهه‌ی ۱۹۸۰ منجر به ساخت سیستم‌های انتقال متناوب انعطاف پذیر^۲ (FACTS) شد. این ادوات کنترل پذیری ولتاژ و توان را برای افزایش بهره‌وری و پایداری سیستم‌های موجود افزایش می‌دهند.^[۵] تاکنون کنترل کننده‌های بسیاری برای ادوات سیستم‌های انتقال متناوب انعطاف پذیر (FACTS) طراحی شده‌اند. از جمله‌ی این کنترل کننده‌ها می‌توان به نمونه‌هایی که برای مدل خطی شده در نقاط کار ویژه طراحی شده‌اند اشاره کرد.^[۶] سایر موارد شامل کنترل کننده‌های پیشرفته است که برای در نظر گرفتن تغییرات نقطه‌ی کار سیستم طراحی می‌شوند. کنترل مقاوم، تطبیقی و کنترل فازی از جمله روش‌هایی هستند که برای این منظور مورد استفاده قرار گرفته‌اند.^[۷-۱۲]

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۴/۲۷، دایری ۱۳۸۷/۵/۱۵، پذیرش ۱۳۸۸/۶/۴.

- طراحی یک سیستم فازی تصمیم‌گیرنده برای تغییر وضعیت بین کنترل میرایی نوسانات و پایداری گذرا؛
- تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی فازی به‌منظور عملکرد مناسب در بهبود توأم پایداری گذرا و میرایی نوسانات؛
- شبیه‌سازی و مقایسه‌ی روش‌های مطرح‌شده و ارائه‌ی راهکارهایی درمورد سیستم چندماشینه.

در ادامه، مدل STATCOM برای مطالعات پایداری گذرا ارائه شده و اثر-STATCOM بر پایداری گذرا نیز مطرح شده است. استراتژی‌های کنترل STATCOM نیز مورد بررسی قرار گرفته است؛ بدین‌منظور ابتدا ساختار کنترل‌کننده‌ی فازی بیان شده و سپس کنترل‌کننده‌های مورد نظر با استفاده از ورودی‌های مختلف طراحی شده‌اند. پس از آن، روش‌های پیشنهادی بر روی سیستم تک‌ماشین - باس بی‌نهایت شبیه‌سازی شده‌اند. در پایان، شبیه‌سازی بر روی سیستم چندماشینه انجام شده و ملاحظات و روش‌های مربوط به سیستم چندماشینه بیان شده‌اند.

مدل‌سازی STATCOM

در سیستم قدرت عملکرد STATCOM همانند کندانسور سنکرون است که به‌طور معمول می‌تواند توان فعال مورد نیاز را تأمین کند. هر STATCOM از یک منبع ولتاژ DC به‌همراه سوئیچ‌های قابل کنترل (اینورتر) و یک ترانس تشکیل شده و به‌صورت موازی با شبکه قرار می‌گیرد. به‌منظور مطالعات پایداری می‌توان STATCOM را به‌وسیله‌ی یک منبع جریان موازی قابل کنترل شکل ۱ مدل کرد.^[۱۹] زاویه‌ی فاز جریان STATCOM همواره ۹۰ درجه با زاویه‌ی فاز ولتاژ باسی که بر روی آن نصب شده اختلاف دارد. بنابراین می‌توان آن را به‌صورت رابطه‌ی ۱ بیان کرد:

$$I_{STATCOM} = I_{STATCOMe}^{j(\delta_m \pm 90)} \quad (1)$$

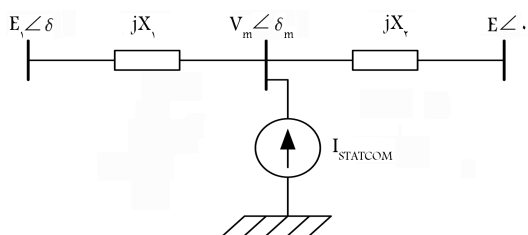
در حالت خازنی، $I_{STATCOM}$ پیش‌فاز و در حالت سلفی پس‌فاز است. علامت‌های مثبت و منفی به‌ترتیب نمایش‌گر حالت‌های سلفی و خازنی‌اند.

اثر STATCOM در پایداری گذرا

در حالت خازنی، ولتاژ و زاویه‌ی باس (m) را می‌توان مطابق روابط ۲ و ۳ نشان داد^[۱۳]:

$$V_m = \frac{E_1 X_T \cos(\delta - \delta_m) + E X_1 \cos \delta_m + X_1 X_T I_{STATCOM}}{X_1 + X_T} \quad (2)$$

$$\delta_m = \tan^{-1} \left(\frac{E_1 X_T \sin \delta}{E X_1 + E_1 X_T \cos \delta} \right) \quad (3)$$



شکل ۱. سیستم تک‌ماشین - باس بی‌نهایت به‌همراه STATCOM.

در این تحقیق پایداری گذرا در کانون توجه قرار گرفته است. یکی از اولین و پرکاربردترین روش‌های بررسی پایداری گذرا استفاده از شاخص سطوح برابر است، که براساس سیستم تک‌ماشین - باس ۳ بی‌نهایت بوده و از مدل ساده‌شده‌ی سیستم بهره می‌گیرد. در این روش، برای بررسی حاشیه‌ی پایداری یا زمان بحرانی رفع خطا حل معادلات دینامیک غیرخطی سیستم ضرورت می‌یابد. روش رانگ کوتا و اوپار از جمله روش‌هایی هستند که برای حل این معادلات به‌کار می‌روند.^[۱] روش مستقیم استفاده از تابع انرژی سیستم نمونه‌یی از روش‌های به‌کار گرفته شده برای تحلیل پایداری گذرا است. روش‌های مبتنی بر انرژی، موارد خاصی از روش دوم لیاپونوف‌اند. برای طراحی کنترل‌کننده‌ی STATCOM از رویکرد تابع انرژی استفاده شده است.^[۱۳] عملکرد این کنترل‌کننده به‌نحوی است که مشتق تابع انرژی سیستم در حضور STATCOM منفی می‌شود، یعنی انرژی سیستم مستهلک می‌شود. در این رویکرد از مدل ساده‌شده‌ی سیستم استفاده شده و سیستم به‌صورت تک‌ماشین - باس بی‌نهایت است. همچنین این روش درمورد سیستم چندماشینه به‌کار رفته و نتایج حاصل از آن، بدون ارائه‌ی اثبات ریاضی، ارائه شده‌اند. یکی از مهم‌ترین مشکلات روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا (طراحی کنترل‌کننده برای بهبود پایداری گذرا)، وابستگی این روش به مدل سیستم قدرت برای تعریف تابع انرژی، به‌خصوص درمورد سیستم چندماشینه است. با فرض این که معادلات دینامیکی سیستم به‌درستی مدل شده و تابع انرژی مناسب نیز تعریف شود، طراحی کنترل‌کننده از این روش و پیاده‌سازی عملی آن، به‌دلیل لزوم اندازه‌گیری در نقاط مختلف سیستم، بسیار مشکل است.^[۱۴]

در سال ۱۹۷۳ منطق فازی و قانون‌مند به‌عنوان ابزاری برای در نظر گرفتن عدم قطعیت و تجربیات انسان، توسط زاده^۴ معرفی شد. در ارتباط با این کنترل‌کننده تحقیقات نظری و تحلیلی قابل توجهی انجام شده است.^[۱۵-۱۹] یکی از ویژگی‌های اصلی کنترل فازی، توانایی آن برای دریافت خواص سیستم کنترل به‌صورت کیفی و براساس پدیده‌های قابل رؤیت است. پیچیدگی و مشکلات پیاده‌سازی کنترل‌کننده‌های سنتی باعث می‌شود که شیوه‌های کنترل هوشمند - نظیر منطق فازی - مورد توجه قرار گیرد. استفاده از این شیوه‌ها راه حلی است برای کنترل سیستم‌های دارای خاصیت غیرخطی و نیز تأخیر و عدم قطعیت - که از ویژگی سیستم‌های قدرت است.^[۱۹]

تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده‌ی PI از طریق منطق فازی انجام شده است.^[۲۰،۲۱] در این رابطه، یک کنترل‌کننده‌ی فازی برای ادوات FACTS سری پیشنهاد شده که تنظیم پارامترهای آن براساس کنترل‌کننده‌ی PI بهینه‌سازی شده است.^[۲۱] همچنین در کنترل‌کننده‌ی فازی که برای SVC طراحی شده^[۲۲] سیگنال کنترل براساس زاویه و فرکانس در دستگاه COI^۵ است که این خود پیچیدگی‌هایی را به مسئله می‌افزاید. عملکرد این کنترل‌کننده مبتنی بر مدل‌سازی یک سیستم چندماشینه به‌صورت دو ناحیه‌ی متصل به هم از طریق خط واصل است که SVC می‌بایست نوسانات بین این دو ناحیه را به کم‌ترین حد ممکن برساند، به‌ویژه که در طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی نیز از نمودار توان فعال خط واصل برحسب اختلاف زاویه‌ی دو ژنراتور معادل در هر ناحیه استفاده شده است. در کنترل‌کننده‌های فازی طراحی‌شده براساس تابع انرژی سیستم ساده‌شده^[۲۳] نیز مشکلات موجود در روش تابع انرژی به‌چشم می‌خورد، هرچند ممکن است در شبیه‌سازی بر روی یک سیستم، به بهبود پایداری کمک کند. مهم‌ترین رویکردهای این تحقیق را می‌توان چنین برشمرد:

- طراحی کنترل‌کننده‌ی فازی براساس ورودی‌های مختلف، نظیر فرکانس ژنراتورها، فرکانس باس STATCOM و توان فعال شایسته‌سازی^۶ شده؛

دست نبودن اطلاعات دقیقی از مدل اجزاء سیستم، باید به دنبال روشی برای تعیین زمان سوئیچینگ با در نظر گرفتن تغییرات و عدم قطعیت‌های موجود در سیستم باشیم. در این تحقیق برای تعیین زمان سوئیچینگ بین حالت‌های مختلف براساس منطق فازی روشی ارائه خواهد شد.

الف) ساختار کنترل کننده فازی

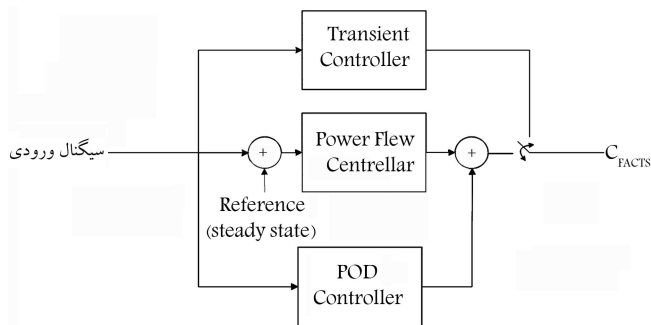
چنان که در شکل ۴ نشان داده شده، کنترل کننده فازی از ۳ قسمت اصلی تشکیل شده است. ابتدا ورودی‌های کنترل کننده وارد قسمت فازی‌سازی می‌شوند. در این قسمت مقادیر ورودی در قالب مجموعه‌های فازی درخواهند آمد. در قسمت استنتاج، براساس قوانین تعریف شده در پایگاه قوانین، برای مقادیر فازی ورودی، تصمیم‌گیری انجام می‌شود. در نهایت خروجی قسمت استنتاج توسط غیرفازی‌سازی به صورت غیرفازی درمی‌آید و به عنوان سیگنال کنترلی قابل استفاده است.

ب) سوئیچینگ از وضعیت کنترل پخش بار به وضعیت کنترل

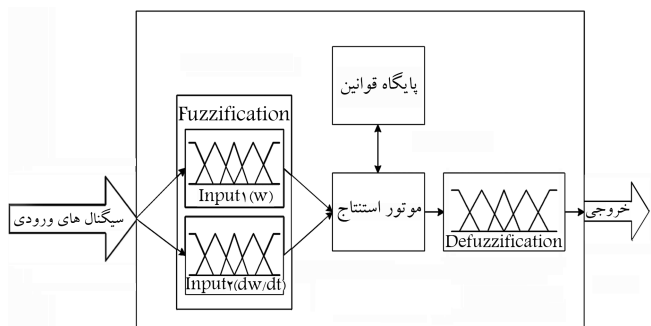
پایداری گذرا

ابتدا سیستم تک‌ماشین - باس بی‌نهایت شکل ۱ را در نظر می‌گیریم. در حالت عادی، کنترل کننده STATCOM در حالت توزیع بار قرار دارد. برای تشخیص رخداد خطای منجر به ناپایداری، برخی از متغیرهای حالت سیستم اندازه‌گیری، و به عنوان ورودی کنترل کننده استفاده می‌شود (شکل ۵).

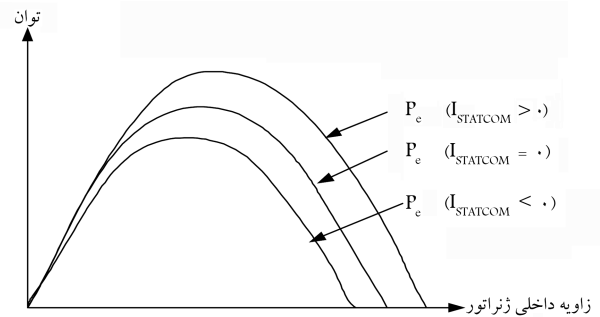
در چنین وضعیتی، STATCOM در بیشترین ظرفیت خازنی قرار گرفته و حداکثر توان راکتیو مجاز را به شبکه تزریق می‌کند. با استفاده از کنترل کننده فازی می‌توان تصمیم‌گیری را براساس ورودی‌های مختلف انجام داده و اثر هرکدام را در خروجی واحد تصمیم‌گیری به نحو مناسبی وارد کرد. برای این منظور از فرکانس ژنراتور و مشتق آن به عنوان ورودی استفاده شده است. به عنوان مثال اگر سرعت ژنراتور،



شکل ۳. کنترل کننده‌های مختلف پس از رخداد خطا.



شکل ۴. ساختار کنترل کننده فازی.



شکل ۲. تأثیر STATCOM بر روی منحنی توان الکتریکی.

که در آن، E_1 ولتاژ داخلی ژنراتور، E ولتاژ باس بی‌نهایت، V_m ولتاژ باسی که STATCOM بر روی آن قرار گرفته، δ زاویه داخلی ژنراتور، و δ_m زاویه باس STATCOM است. توان خروجی ژنراتور نیز چنین محاسبه می‌شود:

$$P_e = \frac{E_1 V_m}{X_1} \sin(\delta - \delta_m) \quad (4)$$

با استفاده از روابط ۲ و ۳، رابطه‌ی ۴ را می‌توان چنین بازنویسی کرد [۱۳]:

$$P_e = P_{max} \sin \delta + c I_s \sin(\delta - \delta_m) \quad (5)$$

که در آن

$$c = \frac{E_1 X_T}{X_1 + X_T}, \quad P_{max} = \frac{E_1 E}{X_1 + X_T}$$

اثر STATCOM بر منحنی توان را در یک سیستم تک‌ماشین - باس بی‌نهایت، می‌توان با استفاده از شکل ۲ بررسی کرد.

در حالت خازنی، حد توان انتقالی افزایش یافته و در حالت سلفی این مقدار کاهش می‌یابد. بنابراین با کنترل مناسب STATCOM می‌توان حاشیه پایداری سیستم را افزایش داد.

استراتژی‌های کنترل STATCOM

پس از وقوع یک اغتشاش بزرگ، معمولاً سه دوره زمانی برای اعمال کنترلی مناسب ادوات FACTS در نظر گرفته می‌شود. [۶] در آغاز، با تشخیص وقوع خطا، کنترل گذرا وارد عمل می‌شود. در حالت کنترل گذرا، ادوات FACTS باید امکان انتقال توان الکتریکی بیشتری را برای خط انتقالی که بر روی آن نصب شده‌اند فراهم آورند. به عنوان مثال، STATCOM باید در بیشینه ظرفیت خازنی خود قرار گیرد. پس از برقراری پایداری اولین نوسان، کنترل کننده به حالت کنترل میرایی نوسانات توان (POD) [۷] وارد می‌شود. هدف این کنترل کننده که معمولاً از چند جبران‌ساز پیش‌فاز - پس‌فاز سری تشکیل شده است، میرایی هرچه سریع‌تر نوسانات و رسیدن به نقطه تعادل پس از خطا است. در نهایت کنترل کننده‌ی توزیع بار، که معمولاً یک کنترل کننده‌ی PI است، با هدف رساندن متغیرهای سیستم به مقادیر حالت ماندگار، وارد عمل می‌شود. مثلاً STATCOM باید ولتاژ باسی را که بر روی آن نصب شده به مقدار مورد نظر برساند. شکل ۳ کنترل کننده‌های فوق و چگونگی عملکرد آنها را نشان می‌دهد. در کنترل کننده‌های سنتی، سوئیچینگ بین حالت‌های مختلف، در زمان‌های ثابت و از پیش تعیین شده انجام می‌شود [۶] با توجه به وابستگی زمان مناسب سوئیچینگ به پارامترهایی چون محل خطا و زمان تداوم خطا، و نیز به لحاظ در

جدول ۱. پایگاه قوانین کنترل‌کننده فازی.

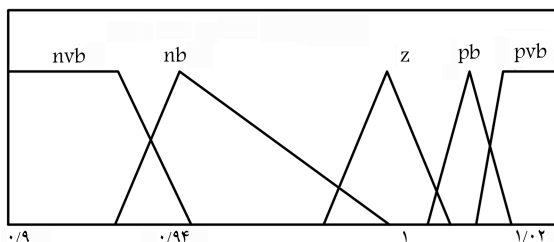
Pvb	pb	z	nb	nvb	$d\omega/dt\omega$
I	i	i	ib	ib	Nvb
Z	i	i	ib	ib	Nb
Cb	c	z	i	ib	Z
Cb	cb	c	c	z	Pb
Cb	cb	c	c	c	Pvb

شکل‌های ۷ تا ۹ نشان داده شده است. جدول ۱ پایگاه قوانین کنترل‌کننده‌ی مورد نظر را نشان می‌دهد.

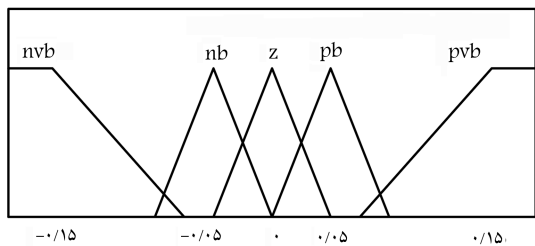
منحنی سطح کنترل‌کننده‌ی طراحی‌شده در شکل ۱۰ نشان داده شده است. با توجه به این شکل می‌توان مقدار خروجی کنترل‌کننده را در شرایط مختلف ورودی به دست آورد و رفتار کنترل‌کننده را شناسایی کرد.

ه) استفاده از توان فعال خط انتقال

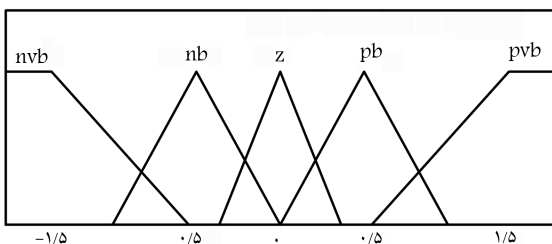
یکی از گزینه‌ها برای انتخاب ورودی کنترل‌کننده، اندازه‌گیری توان فعال گذرکننده از خط انتقالی است که STATCOM بر روی آن نصب شده است. از آنجا که معمولاً ساختار سیستم قدرت پس از خطا تغییر می‌یابد و معادلات دینامیکی و حتی توزیع بار متفاوت از حالت قبل از رخداد خطا هستند، توان حالت ماندگار خطوط انتقال



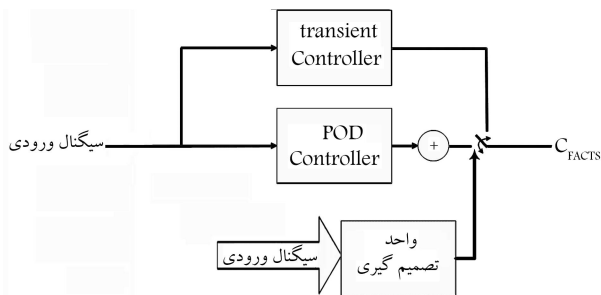
شکل ۷. توابع عضویت ورودی برای ω .



شکل ۸. توابع عضویت ورودی برای $d\omega/dt$.



شکل ۹. توابع عضویت خروجی.



شکل ۵. واحد تصمیم‌گیری برای سوئیچینگ به حالت کنترل گذرا.

نیز مشتق آن (شتاب آن) زیاد باشد، ژنراتور در وضعیت بحرانی، و STATCOM در مد کنترل گذرا قرار گیرد.

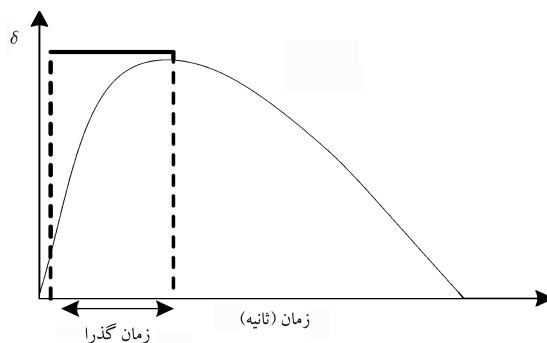
ج) سوئیچینگ از وضعیت کنترل پایداری گذرا به وضعیت کنترل میرایی نوسانات توان

سوئیچینگ از وضعیت کنترل پایداری گذرا به وضعیت کنترل میرایی نوسانات توان، ممکن است براساس رؤیت زاویه‌ی ژنراتور یا فرکانس آن انجام شود. ایده‌ی اصلی تغییر وضعیت، ناشی از این حقیقت است که کنترل پایداری گذرا می‌بایست تا زمانی که زاویه‌ی ژنراتور به بیشترین مقدار خود می‌رسد، ادامه داشته باشد. شکل ۶ بازه زمانی مربوط به کنترل پایداری گذرا را نشان می‌دهد.

در کنترل‌کننده‌های سنتی، این زمان مقداری از پیش تعیین‌شده دارد، در حالی که این مقدار به عواملی چون مدت زمان تداوم خطا، محل خطا و آرایش سیستم در زمان خطا بستگی دارد. بنابراین می‌توان مشابه حالت قبل، یک بلوک کنترل فازی برای سوئیچینگ از وضعیت کنترل پایداری گذرا به وضعیت کنترل میرایی نوسانات توان طراحی کرد. در این کنترل‌کننده، زمانی که زاویه‌ی ژنراتور بیشینه شود، یا به عبارت دیگر فرکانس ژنراتور برای اولین بار به مقدار اسمی برسد، کنترل‌کننده فرمان تغییر وضعیت به حالت میرایی نوسانات توان را صادر می‌کند.

د) طراحی کنترل‌کننده بدون استفاده از سوئیچینگ

با تنظیم مناسب پارامترهای کنترل‌کننده‌ی فازی می‌توان اعمال کنترلی لازم را در هر یک از بازه‌های زمانی فوق به دست آورد، به این معنی که می‌توان از یک کنترل‌کننده‌ی فازی مشترک برای پایداری گذرا و میرایی نوسانات استفاده کرد. در این تحقیق، از سیگنال‌های ورودی متفاوتی به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده استفاده شده است. یکی از گزینه‌ها سرعت ژنراتور و مشتق آن است. توابع عضویت کنترل‌کننده طراحی، و در



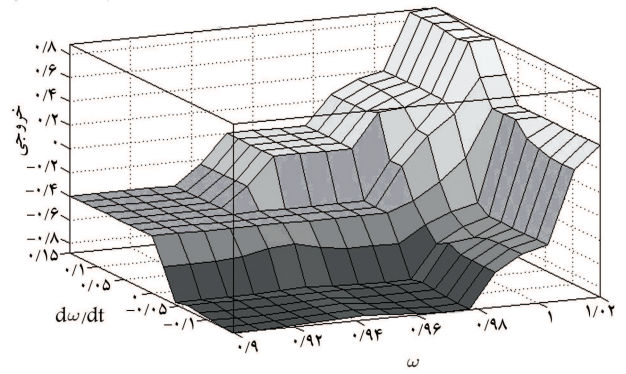
شکل ۶. بازه زمانی مربوط به کنترل پایداری گذرا.

آهنگ تغییر توان الکتریکی و زاویه ی ژنراتور منطبق اند. با توجه به شکل ۱۲ این مسئله زمانی برقرار است که توان الکتریکی به مقدار اوج خود نرسیده باشد. چنانچه افزایش زاویه زیاد باشد، منحنی مطابق شکل ۱۳ خواهد بود. با توجه به نمودارهای ارائه شده در این شکل می توان نتیجه گیری کرد که این دو سیگنال از نظر عبور از مقدار حالت ماندگار هم فازند؛ یعنی در یک زمان از مقدار حالت ماندگار خود عبور می کنند. بنابراین می توان با استفاده از فیلتری که مقدار dc سیگنال توان را حذف می کند، تنها تغییرات این سیگنال را در نظر گرفت. هرگاه سیگنال فیلتر شده صفر شود، درحقیقت به نقطه ی تعادل پس از خطا رسیده ایم. این فیلتر را اصطلاحاً washout filter می نامند. [۲۴] شکل ۱۴ سیگنال اصلی و فیلتر شده را نشان می دهد.

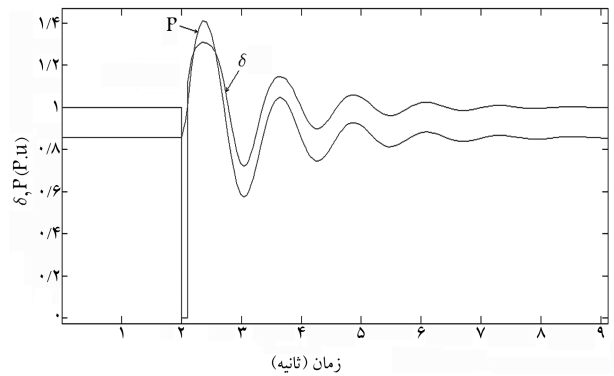
چنان که در قسمت قبل اشاره شد، ورودی فرکانس و مشتق آن به عنوان ورودی های مناسب برای طراحی کنترل کننده مطرح اند. حال اگر بتوان با استفاده از سیگنال توان فیلتر شده، رفتار سیگنال فرکانس ژنراتور را تخمین زد، می توان کنترل کننده ی طراحی شده برای ورودی های فرکانس و مشتق آن را، برای ورودی اصلاح شده ی توان به کار برد.

شکل ۱۵ سیگنال های ورودی مختلف را که می توان از آنها به عنوان ورودی کنترل کننده استفاده کرد، از نظر اختلاف فاز نشان می دهد.

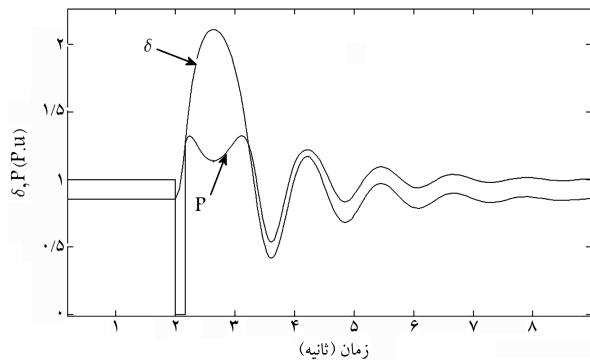
بنابراین، می توان از مشتق اول و دوم توان فعال به عنوان ورودی کنترل کننده استفاده کرد. برای این منظور، از نمودار صفحه ی فاز سیستم استفاده می کنیم. شکل ۱۶ نمودار صفحه ی فاز سیستم را برای متغیرهای ΔP و $d\Delta P/dt$ هنجار شده نشان می دهد. با توجه به این نمودار می توان لحظاتی را که منحنی توان - زاویه ی ژنراتور از مقدار اوج خود می گذرد تشخیص داد. اولین نقطه از منحنی که در آن



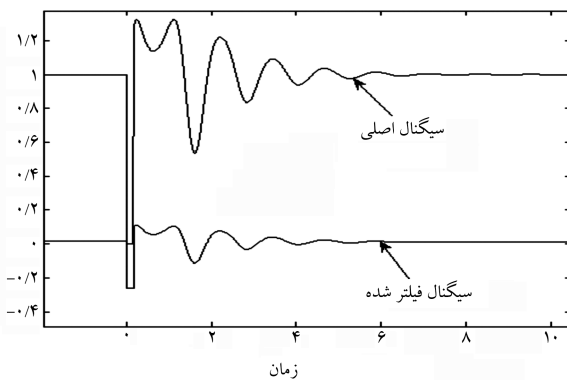
شکل ۱۰. منحنی سطح کنترل کننده ی فازی مورد نظر.



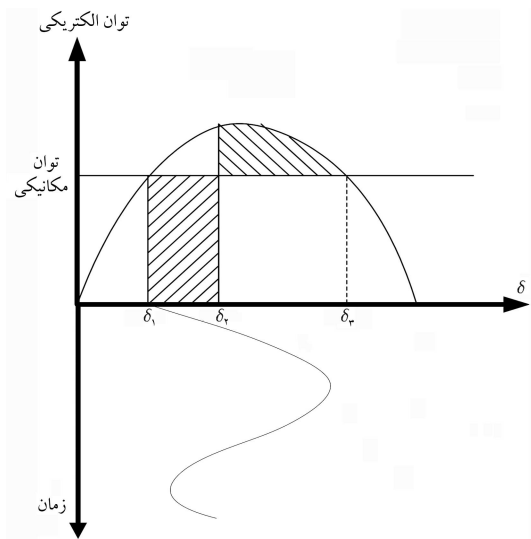
شکل ۱۱. نمودار توان الکتریکی و زاویه ژنراتور در سیستم تک ماشین-باس بی نهایت (زمان رفع خطا). $CT=100ms$



شکل ۱۳. نمودار توان الکتریکی و زاویه ی ژنراتور در سیستم تک ماشین-باس بی نهایت ($CT=170ms$).



شکل ۱۴. سیگنال توان فیلتر شده توسط washout filter.



شکل ۱۲. منحنی توان- زاویه ژنراتور در سیستم تک ماشین-باس بی نهایت.

نیز با مقدار پیش از خطا متفاوت خواهد بود. بنابراین برای تعریف سیگنال خطای توان و استفاده از آن به عنوان ورودی کنترل کننده، با مشکلاتی مواجه خواهیم بود. برای برطرف کردن این مشکل، می توان سیگنال توان اندازه گیری شده را به نحو مناسبی تغییر داد. در شکل ۱۱ نمودار توان الکتریکی و زاویه ی داخلی ژنراتور پس از وقوع اتصال کوتاه سه فاز بر روی خط انتقال در سیستم تک ماشین-باس بی نهایت، رسم شده است. چنان که مشاهده می شود، در تمامی لحظات به جز لحظه ی اتصال کوتاه،

شبیه‌سازی سیستم تک‌ماشین - باس بی‌نهایت

در این قسمت، سیستم نشان داده شده در شکل ۱۷ را در نظر گرفته و از کنترل‌کننده‌های طراحی شده برای کنترل STATCOM استفاده می‌شود.^[۱] سیستم مورد نظر با استفاده از نرم‌افزار PSCAD شبیه‌سازی شده و کنترل‌کننده، در نرم‌افزار Simulink پیاده‌سازی شده است.

ارتباط بین این دو نرم‌افزار از طریق بلوکی انجام می‌شود که در نرم‌افزار PSCAD تعریف شده است. وظیفه‌ی این بلوک خلاصه‌وار عبارت است از:

۱. دریافت ورودی‌های مورد نیاز کنترل‌کننده از سیستم قدرت؛

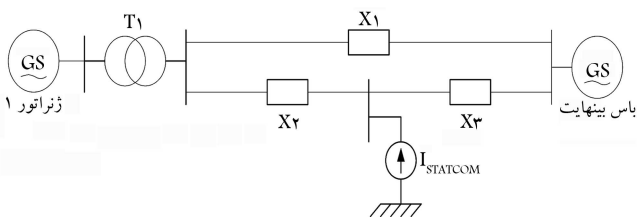
۲. فراخوانی و اجرای مدل Simulink؛

۳. انتقال خروجی‌های مدل Simulink (سیگنال کنترل) به PSCAD برای استفاده‌ی محرک.

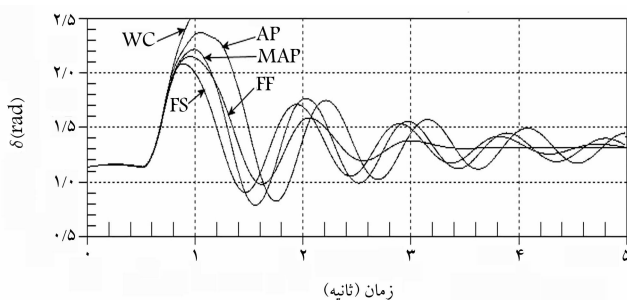
برای بررسی کارایی هر یک از کنترل‌کننده‌های طراحی شده، نمودار زاویه‌ی داخلی ماشین پس از یک اتصال کوتاه سه‌فاز و زمان رفع خطای ۲۰۰ میلی‌ثانیه در شکل ۱۸ نشان داده شده است. علامت‌های اختصاری به‌کار برده شده برای هر نمودار در قسمت اختصارات مشخص شده‌اند.

زمان بحرانی رفع خطا برای هر یک از کنترل‌کننده‌های طراحی شده در جدول ۲ ارائه شده است.

با توجه به شکل ۱۸ و جدول ۲، کنترل‌کننده‌ی سوئیچینگ فازی از نظر بهبود اولین نوسان بهترین عملکرد را داشته است. کنترل‌کننده‌ی فازی فرکانس و فازی توان به‌ترتیب در رده‌های بعدی قرار می‌گیرند. از آنجا که پس از رخداد خطا، کنترل‌کننده‌ی



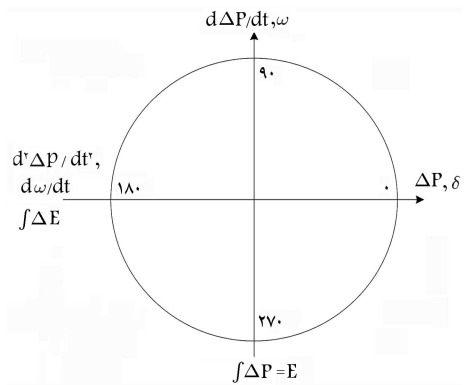
شکل ۱۷. سیستم نمونه‌ی انتخاب شده^[۱].



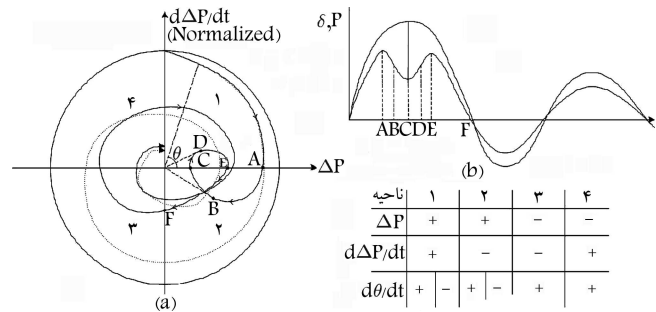
شکل ۱۸. نمودار زاویه‌ی داخلی ماشین پس از اتصال کوتاه سه‌فاز و زمان رفع خطای ۲۰۰ میلی‌ثانیه.

جدول ۲. زمان بحرانی رفع خطا سیستم تک‌ماشین باس بی‌نهایت.

کنترل‌کننده	بدون کنترل‌کننده	فازی با استفاده از اکتیو	فازی با استفاده از فرکانس	فازی با استفاده از روش قطع و وصل
CCT (ms)	۱۸۰	۲۱۰	۲۳۰	۲۳۵



شکل ۱۵. اختلاف فاز بین سیگنال‌های ورودی مختلف.



شکل ۱۶. الف) نمودار صفحه فاز نرمالیزه شده، ب) توان و زاویه ژنراتور، ج) جدول تغییرات.

$d\Delta P/dt$ برابر صفر می‌شود، نقطه‌ای است که منحنی توان برای اولین بار و با افزایش زاویه‌ی ژنراتور، از مقدار اوج عبور می‌کند. با کاهش زاویه‌ی ژنراتور، منحنی توان مجدداً از مقدار اوج خود عبور کرده و $d\Delta P/dt$ بار دیگر صفر خواهد شد. چنانچه منحنی توان-زاویه‌ی ژنراتور از نقطه‌ی اوج خود عبور نکند، مسیر سیستم نواحی ۱، ۲، ۳، ۴ را به‌ترتیب طی خواهد کرد. در غیر این صورت به‌ترتیب نواحی ۱، ۲، ۳، ۴ طی خواهند شد. می‌توان با در نظر گرفتن ترتیب طی شدن این نواحی تشخیص داد که آیا منحنی توان-زاویه‌ی ژنراتور از مقدار اوج خود گذشته و سیگنال $d\Delta P/dt$ را که به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده استفاده می‌شود، اصلاح کرد. با توجه به این مسئله که پس از رخداد خطا، هرچه سریع‌تر باید پایداری گذرا در سیستم برقرار شود، بنابراین به‌دنبال روشی برای تشخیص سریع‌تر این مسئله و کنترل مناسب آن هستیم. با توجه به شکل ۱۶، همواره مثبت است مگر در حالتی که منحنی از مقدار اوج خود عبور نکند. در لحظه‌ی که $d\theta/dt$ برای اولین بار برابر با صفر می‌شود، منحنی هنوز وارد ناحیه‌ی ۱ نشده است نقطه (B)، لذا سیستم تشخیص با استفاده از این روش سریع‌تر عمل کرده و سیگنال $d\Delta P/dt$ را اصلاح خواهد کرد. بنابراین کنترل‌کننده‌ی فازی براساس سیگنال‌های ورودی $d\Delta P/dt$ و $d\theta/dt$ اصلاح شده و $d\theta/dt$ طراحی خواهد شد.

و) استفاده از فرکانس باس STATCOM

یکی دیگر از سیگنال‌هایی که می‌توان به‌صورت محلی اندازه‌گیری کرد و از آن به‌عنوان ورودی کنترل‌کننده استفاده کرد، فرکانس باس STATCOM است. وقوع اغتشاش در سیستم، باعث تغییر فرکانس ژنراتورها و در نتیجه، تغییر فرکانس در تمامی باس‌های سیستم می‌شود. با در نظر گرفتن تغییرات فرکانس باس STATCOM می‌توان به وقوع اغتشاش در سیستم پی برده و همانند کنترل براساس فرکانس ژنراتور عمل کرد.

حاشیه‌ی پایداری سیستم کم‌تر خواهد بود که این مسئله در حوزه‌ی زمان، معادل با زمان بحرانی رفع خطای کم‌تر است. همچنین میزان نوسانات مسیر سیستم، حول نقطه‌ی کار حالت ماندگار، نشان‌دهنده‌ی توانایی سیستم در میرا کردن نوسانات توان است. با توجه به این شکل می‌توان اثر هرکدام از کنترل‌کننده‌های طراحی شده را در بهبود پایداری اولین نوسان و میرا کردن نوسانات توان مشاهده کرد.

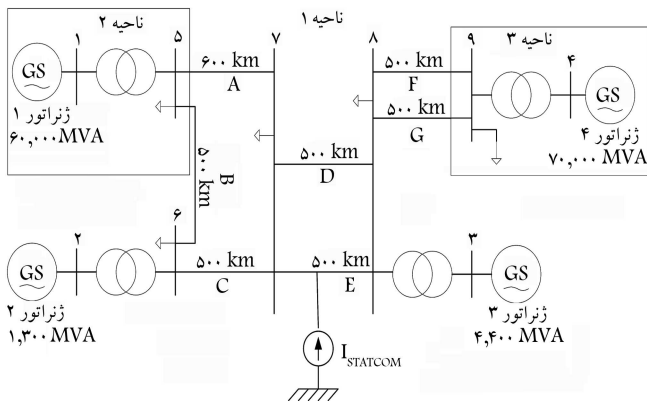
شبیه‌سازی سیستم ۹ باس IEEE

به‌طور کلی هر سیستم قدرت را می‌توان به‌صورت تک‌ماشین-باس بی‌نهایت مدل کرد، اما ممکن است این مدل در بسیاری از موارد و با توجه به نوع مطالعه‌ی مورد نظر منجر به نتایج مطلوب نشده و یا بعضاً هدف طراحی را برآورده نکند. همچنین کنترل‌کننده‌ی طراحی شده، در عمل می‌بایست بر روی یک سیستم قدرت واقعی پیاده‌سازی شود که سیستمی چندماشینه است. از آنجا که ادوات FACTS در سیستم‌های قدرت و بر روی خطوط انتقال نصب می‌شوند، لذا بررسی عملکرد کنترل‌کننده‌ی طراحی شده برای این ادوات در یک سیستم چندماشینه، از اهمیت ویژه‌ی برخوردار است. در این قسمت با در نظر گرفتن یک سیستم ۹ باس IEEE [۲۵]، کنترل‌کننده‌های طراحی شده در قسمت‌های قبل را روی آن پیاده‌سازی کنیم. چنان که در شکل ۲۰ مشخص شده، این سیستم دارای سه ناحیه است: ژنراتورهای ۱ و ۴ نشان‌دهنده‌ی مجموعه‌ای از ژنراتورها هستند که به ترتیب در نواحی ۲ و ۳ قرار گرفته‌اند. ژنراتور ۴ به‌عنوان مرجع زاویه در نظر گرفته شده و بنابراین باس ۴ در مطالعات توزیع بار، باس Slack است.

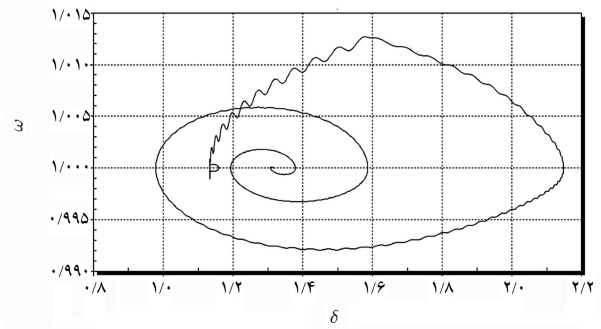
در این تحقیق، محل نصب STATCOM براساس مطالعات توزیع بار تعیین شده و از مرحله‌ی کنترل ولتاژ صرف نظر می‌شود. در این مطالعات STATCOM بر روی خط انتقال E نصب شده است. همچنین STATCOM در حالت ماندگار به‌صورت خازن ثابت عمل می‌کند و در هنگام وقوع خطا به پایداری سیستم کمک خواهد کرد. در واقع سیگنال کنترل‌کننده به‌صورت یک سیگنال تکمیلی اعمال می‌شود.

الف) استفاده از سیگنال‌های غیر محلی برای کنترل STATCOM

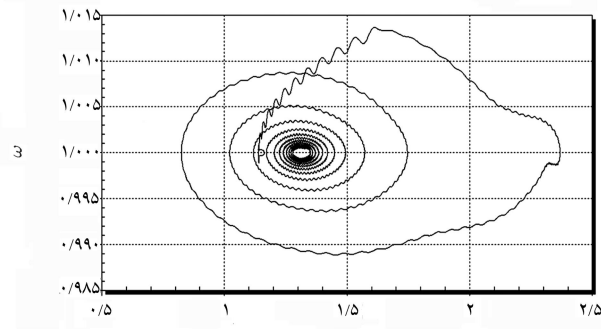
ابتدا با این فرض که هیچ سیگنال کنترل تکمیلی برای STATCOM وجود ندارد، یک اتصال کوتاه سه‌فاز روی باس ۷ ایجاد شده و پس از ۱۰۰ میلی‌ثانیه، برطرف می‌شود. نمودار زاویه‌ی داخلی ژنراتورهای ۱، ۲ و ۳ در شکل ۲۱ رسم شده است.



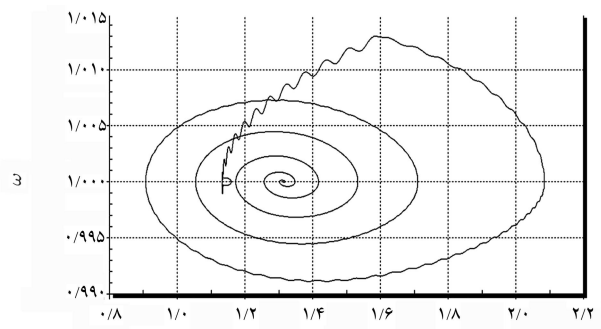
شکل ۲۰. سیستم ۹ باس IEEE [۲۵].



(الف)



(ب)



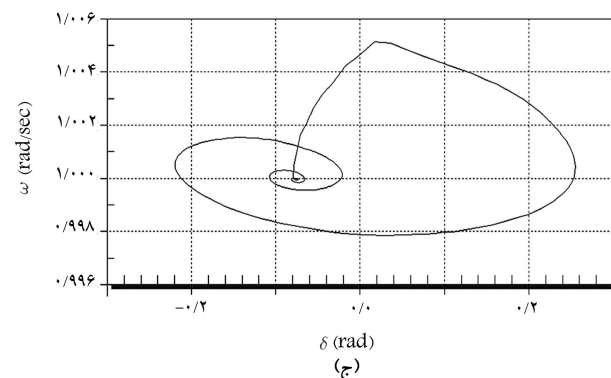
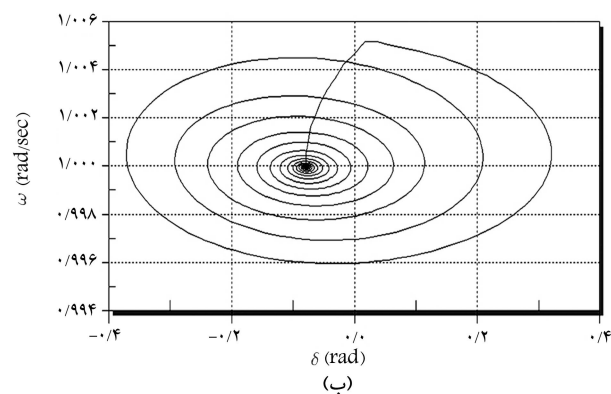
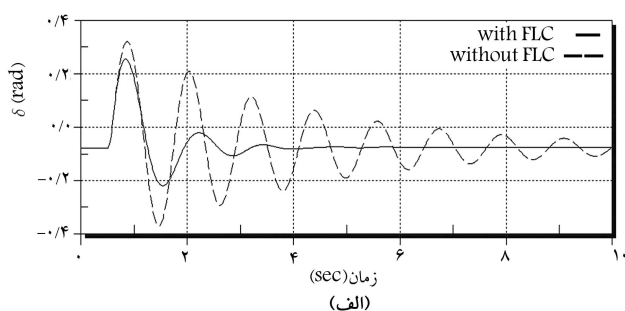
(ج)

شکل ۱۹. نمودار صفحه‌ی فاز سیستم با استفاده از کنترل‌کننده‌های الف) سوئیچینگ فازی؛ ب) فازی توان؛ ج) فازی فرکانس.

سوئیچینگ STATCOM را در بیشترین مقدار خازنی قرار می‌دهد، لذا پاسخ سیستم برای اولین نوسان با استفاده از این کنترل‌کننده بهینه خواهد شد. به‌علت تأخیر در تشخیص عبور از نقطه‌ی اوج توان، پاسخ کنترل‌کننده‌ی فازی توان در مقایسه با کنترل‌کننده مشابه فازی فرکانس، از فرجهش بیشتری برخوردار است. به‌هر حال با استفاده از روش اصلاح شده، عملکرد کنترل‌کننده‌ی فازی توان بهبود یافته است. از نظر میرایی نوسانات، بهترین پاسخ را کنترل‌کننده فازی فرکانس داشته است. کنترل‌کننده‌های سوئیچینگ فازی و فازی توان به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. نمودار صفحه‌ی فاز سیستم برای متغیرهای δ و ω ، در شکل ۱۹ رسم شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، نقطه‌ی کار سیستم پس از خطا تغییر یافته و در صورت پایداری، سیستم وارد نقطه‌ی کار جدید خواهد شد. هر قدر مسیر سیستم در هنگام رفع خطا، از نقطه‌ی کار حالت ماندگار خود فاصله‌ی بیشتری داشته باشد،

آن ژنراتور در محاسبات وارد نخواهد شد. با اعمال روش فوق، ژنراتور ۳ به‌عنوان بحرانی‌ترین ژنراتور انتخاب خواهد شد. در ادامه، نتایج طراحی کنترل‌کننده با استفاده از این ایده بررسی خواهد شد. با توجه به نمودار زاویه‌ی داخلی ژنراتور ۳ در شکل ۲۲، کنترل‌کننده‌ی فازی طراحی شده توانسته پایداری ژنراتور ۳ را بهبود دهد.

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، کنترل‌کننده‌ی طراحی شده علاوه بر بهبود پایداری اولین نوسان، توانسته در میراشدن سریع‌تر نوسانات نیز نقش به‌سزایی داشته باشد. نمودار زاویه‌ی داخلی ژنراتورهای ۱ و ۲ در شکل ۲۳ رسم شده است. این کنترل‌کننده، اوج اولین نوسان را در مورد ژنراتور ۲ نیز کاهش داده اما تأثیر چندانی بر پایداری ژنراتور ۱ نداشته است. از آنجا که کنترل‌کننده براساس فرکانس ژنراتور ۳ طراحی شده است، ایجاد بهترین عملکرد برای این ژنراتور دور از انتظار نیست. اکنون محل خطا را تغییر داده و تأثیر کنترل‌کننده‌ی طراحی شده برای خطا در نقاط مختلف سیستم بررسی خواهد شد. میزان کاهش اوج نوسانات برای هر حالت در جدول ۴ ارائه شده است.



شکل ۲۲. الف) نمودار زاویه‌ی داخلی ژنراتور ۳؛ ب) نمودار صفحه‌ی فاز ژنراتور ۳ بدون کنترل‌کننده؛ ج) نمودار صفحه‌ی فاز ژنراتور ۳ با کنترل‌کننده.

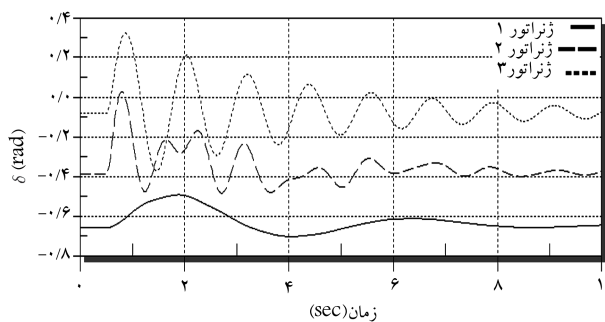
چنان که مشاهده می‌شود، تغییرات زاویه‌ی ژنراتور ۳ بیش از سایر ژنراتورها بوده است. یکی از ایده‌های مطرح شده برای طراحی کنترل‌کننده در روش فرکانس، استفاده از فرکانس تنها یک ژنراتور به‌عنوان ژنراتور بحرانی است.

ژنراتور بحرانی ژنراتوری است که بیشترین تغییرات را پس از وقوع خطا داشته است. انتخاب ژنراتور بحرانی به عواملی چون محل خطا، ثابت اینرسی ژنراتورها و محل نصب STATCOM بستگی دارد. هرچه فاصله‌ی محل وقوع خطا از باس ژنراتور کم‌تر باشد، مقدار انحراف زاویه‌ی ژنراتور، پس از وقوع خطا، بیشتر خواهد بود. همچنین میزان تأثیرگذاری STATCOM بر بهبود پایداری یک ژنراتور، به محل نصب STATCOM و آرایش شبکه بستگی دارد. برای پیدا کردن بحرانی‌ترین ژنراتور، دو راه حل پیشنهاد می‌شود. در راه حل اول، با این فرض که سیگنال سرعت تمامی ژنراتورها در محل کنترل‌کننده در دسترس‌اند، کنترل‌کننده در هر لحظه و براساس سرعت ژنراتوری که بیشترین انحراف را از سرعت حالت ماندگار داشته است، عمل خواهد کرد. این روش به علت نیاز به اندازه‌گیری‌های نسبتاً زیاد و تغییر وضعیت بین سیگنال‌های ورودی مختلف، مناسب نیست. راه حل دیگر که نابه‌هنگام است، بررسی راهکارهای مختلف خطا و تعیین بحرانی‌ترین ژنراتور با توجه به رفتار زاویه و فرکانس ژنراتورها، پس از خطاست. برای این منظور، زمان بحرانی رفع خطا به‌ازای اتصال کوتاه بر روی باس‌های ژنراتوری محاسبه خواهد شد. همچنین میزان بهبود این زمان در حضور STATCOM برای هر ژنراتور به دست می‌آید. تعیین بحرانی‌ترین ژنراتور براساس زمان بحرانی رفع خطای معادل هر ژنراتور است که از رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود:

$$CCTE_i = CCT_i \times (1 - D_i) \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

که در آن $CCTE_i$ ، زمان بحرانی رفع خطای معادل ژنراتور i ، D_i ضریب تأثیرگذاری STATCOM بر این زمان و n ، تعداد ژنراتورهای سیستم می باشد. مقدار D_i به صورت نرمالیزه شده در نظر گرفته می‌شود. برای محاسبه D_i ، مقدار بیشترین بهبود برابر ۱ در نظر گرفته شده و سایر موارد نسبت به آن محاسبه می‌شوند. سپس این مقادیر به میزان کم‌ترین تأثیر به سمت صفر شیف‌ت داده می‌شوند. زمان بحرانی رفع خطا و میزان بهبود آن برای خطا روی باس‌های ژنراتوری، در جدول ۳ آورده شده‌اند.

بدیهی است اگر تأثیر STATCOM بر CCT ژنراتوری صفر باشد، CCT



شکل ۲۴. نمودار زاویه‌ی داخلی ژنراتورهای ۱، ۲ و ۳.

جدول ۳. زمان بحرانی رفع خطا و تأثیر STATCOM بر آن.

۸	۶	۵	Faulted Bus
۱۷۸	۱۸۳	۱۲۰	CCT(ms)
۱۸۹	۱۹۲	۱۲۱	CCT with STATCOM(ms)

جدول ۶. میزان کاهش اوج اولین نوسان برای کنترل‌کننده‌ی فازی براساس فرکانس ژنراتور ۳.

باز خطا	ژنراتور ۱	ژنراتور ۲	ژنراتور ۳
۵	—	۰٫۱۱	۰٫۲
۶	۰٫۱۲	۰٫۱۲	۰٫۶۰
۷	۰٫۰۱	۰٫۰۵	۰٫۱۶
۸	—	۰٫۸۲	۰٫۱۴۷

نتیجه‌گیری

در این نوشتار برخی از روش‌های کنترل STATCOM برای بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت ارائه شد. برای این منظور، مفاهیم پایداری گذرا معرفی، و تأثیر ادوات STATCOM بر آن بررسی شد. نشان داده شد که با استفاده از منطق فازی می‌توان طراحی کنترل‌کننده را با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در سیستم انجام داد و ایده‌های طراح را به‌سادگی در اجزاء کنترل‌کننده پیاده‌سازی کرد. به‌طور کلی، روش‌های پیشنهادی براساس سیگنال ورودی کنترل‌کننده، به دو دسته‌ی محلی و غیرمحلی تقسیم شد. سهولت اندازه‌گیری و کاهش هزینه از مزایای استفاده از سیگنال‌های محلی است. در عوض با اندازه‌گیری سیگنال‌های کنترلی در نقاط مختلف می‌توان اطلاعات بیشتری را از سیستم کسب کرد و کنترل مؤثرتری انجام داد. مسئله‌ی تشخیص رخداد خطای منجر به ناپایداری گذرا، از جمله مواردی است که به آن پرداخته شد. با استفاده از سیستم تشخیص‌دهنده‌ی فازی، زمان مناسب برای سوئیچینگ به حالت پایداری گذرا و مدت زمان تداوم آن تعیین شد. سپس یک کنترل‌کننده فازی برای انجام اعمال کنترلی لازم در زمان‌های مختلف پیشنهاد شد. عملکرد هر کدام از کنترل‌کننده‌های طراحی شده، با استفاده از نتایج شبیه‌سازی بر روی سیستم تک‌ماشین-باس بی‌نهایت و سیستم چندماشین‌بررسی شده است. نشان داده شد که با تنظیم صحیح پارامترهای کنترل‌کننده‌ی فازی می‌توان پاسخ مناسبی برای بهبود پایداری سیستم به‌دست آورد.

فهرست علائم

inductive :i
capacitive :c
positive :p
negative :n
big :b
very :v

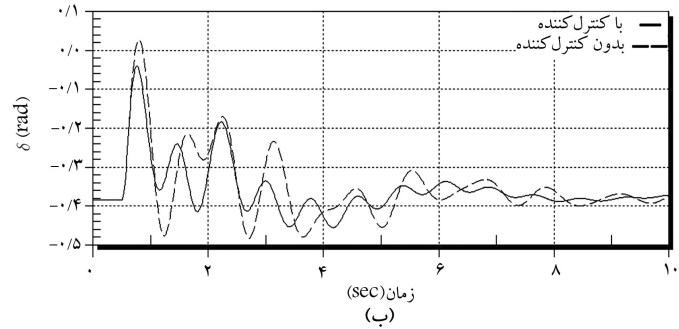
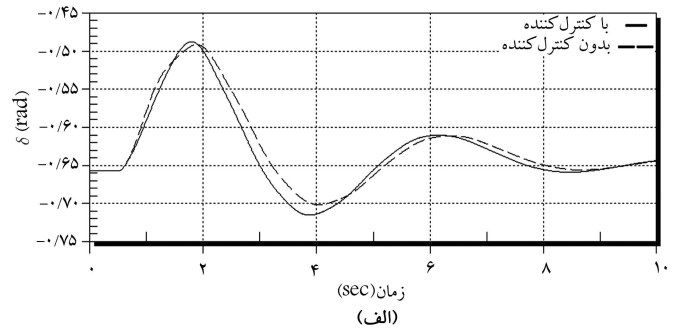
Without Control (WC): بدون کنترل

Fuzzy Switching (FS): کنترل‌کننده فازی سوئیچینگ

Fuzzy Frequency (FF): کنترل‌کننده فازی که از فرکانس باس STATCOM استفاده می‌کند.

Active Power (AP): کنترل‌کننده فازی که از توان فعال خط انتقال استفاده می‌کند.

Modified Active Power (MAP): کنترل‌کننده فازی که از توان فعال خط انتقال استفاده کرده و اصلاح شده است.



شکل ۲۳. نمودار زاویه‌ی داخلی: الف) ژنراتور ۱؛ ب) ژنراتور ۲ با کنترل‌کننده فازی.

ب) استفاده از سیگنال‌های محلی برای کنترل STATCOM

کنترل‌کننده‌ی طراحی شده با استفاده از ورودی توان فعال خط انتقال و فرکانس باس STATCOM نیز پیاده‌سازی شده و نتایج آن به‌ترتیب در جداول ۵ و ۶ آورده شده است. برای تهیه‌ی این جداول، بیشترین میزان انحراف زاویه‌ی ژنراتورها به‌ازای هر خطا نسبت به حالتی که روی STATCOM کنترل تکمیلی (پایداری گذرا) وجود نداشته اندازه‌گیری شده و به‌صورت % بیان شده است. به‌عنوان مثال، عدد ۰٫۶ در جدول به این معنی است که بیشینه‌ی انحراف زاویه‌ی ژنراتور خاصی پس از اعمال کنترل تکمیلی به ۰٫۶٪ حالت قبل رسیده است.

جدول ۴. میزان کاهش اوج اولین نوسان برای کنترل‌کننده فازی براساس فرکانس ژنراتور ۳.

باز خطا	ژنراتور ۱	ژنراتور ۲	ژنراتور ۳
۵	۰٫۰۸	۰٫۲۳	۰٫۲۵
۶	۰٫۱۱	۰٫۲۲	۰٫۳۱
۷	—	۰٫۱۴	۰٫۱۷۵
۸	—	۰٫۲۵	۰٫۱۹۵

جدول ۵. میزان کاهش اوج اولین نوسان برای کنترل‌کننده فازی براساس توان فعال خط انتقال.

باز خطا	ژنراتور ۱	ژنراتور ۲	ژنراتور ۳
۵	—	—	۰٫۱۲۵
۶	—	—	۰٫۸۱
۷	—	۰٫۱۱	۰٫۲۳
۸	—	۰٫۱۲	۰٫۱۲

پانوشت

1. critical clearing time
2. flexible alternating current transmission systems (FACTS)
3. single machine infinite bus
4. Zadeh
5. centre of inertia
6. signal conditioning
7. power oscillation damping

منابع

1. Kundur, P. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc. (1994).
2. Anderson, P.M. and Fouad, A.A. *Power System Control and Stability*, John Wiley & Sons INC., Publications, (2003).
3. PAI, M.A. *Power System Stability*, North-Holland Publishing Company (1981).
4. Moechtar, M.; Cheng, T.C. and Hu, L. "Transient Stability of Power System-A Survey", ISBN 0-7803-2636-9.
5. Hingorani, N.G. and Gyugyi, L. *Understanding FACTS*, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York (2000).
6. Cai, L. "Robust Coordinated Control of Facts Devices in Large Power Systems", PHD Thesis, Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften der Universität Duisburg-Essen zur Erlangung des akademischen Grades eines (2004).
7. Wang, H.F. "Selection of Robust Installing Locations and Feedback Signals of FACTS-based Stabilizers in Multi-machine Power Systems," *IEEE Trans. Power Syst.*, **14**, (2), pp. 569-574 (1999).
8. Noroozian, M.; Ghandhari, M.; Anderson, G.; Gronquist, J. and Hiskens, I. "A Robust Control Strategy for Shunt and Series Reactive Compensators to Damp Electrical Oscillations", *IEEE Transactions on Power Delivery*, **16**, (4), pp.812-817 (2001).
9. Fang, D.Z.; Xiaodong, Y.; Chung, T.S. and Wong, K.P. "Adaptive Fuzzy-Logic SVC Damping Controller Using Strategy of Oscillation Energy Descent", *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, (3), pp.1414-1421 (2004).
10. Dash, P.K.; Morris, S. and Mishra, S. "Design of a Non-linear Variable-Gain Fuzzy Controller for FACTS Devices", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, **12**, (3), pp.428-438 (2004).
11. Menniti, D.; Burgio, A.; Pinnarelli, A. and Sorrentito, N. "Synchronizing Fuzzy Power System Stabilizer and Fuzzy FACTS Device Stabilizer to damp Electromechanical Oscillations in a Multi-Machine Power System", IEEE Bologna Power Tech Conference (2003).
12. Kazemi, A. and Sohrforouzani, M.V. "Power System Damping Using Fuzzy Controlled FACTS Devices", International Conference on Power System Technology-POWERCON, Singapore, pp.1623-1628 (November 2004).
13. Haque, M.H. "Use of Energy Function to Evaluate the Additional Damping Provided by STATCOM", *Electric Power System Research*, **72**, pp. 195-202 (2004).
14. Abazari, S.; Mahdavi, J.; Ehsan, M. and Zolghadri, M. "Transient Stability Improvement by Using Advanced Static Var Compensator", IEEE Bologna PowerTech Conference (June 2003).
15. Zimmermann, H.J. (Hans-Jurgen) *Fuzzy Set Theory and its Applications*, Kluwer Academic Publishers, 3th Edition, (1996).
16. Langari, R. *Fuzzy Control Synthesis and Analysis*, Willey Publications (1995).
17. Siler, W. and Buckley, J.J. *Fuzzy Expert Systems and Fuzzy Reasoning*, John Willey & Sons Inc., (2005).
18. Jantzen, J. *Tutorial on Fuzzy Logic*, Tech. report no. 98-E868, Technical University of Denmark, Department of Automation (Aug1998).
19. Jager, R. *Fuzzy Logic in Control*, PHD Thesis, elektrotechnisch ingenieur, geborente Amsterdam (1995).
20. Dash, P.K.; Stella Morris and Basu, K.P. "A fuzzy variable structure current controller for flexible ac transmission system proceeding of transmission and distribution conference and exhibition, pp.330-335 (2002).
21. Dash, P.K. and Mishra, S. "Damping of multimodal power system oscillations by FACTS devices using non-linear Takagi-Sugeno fuzzy controller", *Electrical Power and Energy Systems*, **25**, pp. 481-490 (2003).
22. Qun Gu, Anupama Pandey, Shelli K. and Starrett. "Fuzzy logic control schemes for static VAR compensator to control system damping using global signal", *Electric Power System Research*, **67**, pp. 115-122 (2003).
23. Tomonobu Senjyu, Marta Molinas, Katsumi Uezato "Multi-Machine Power System Stabilization with FACTS Equipment Applying Fuzzy Control", 35th conference on decision and control, Kobe, Japan, pp.2202-2207 (December 1996).
24. Munther A. Hassouneh, Hsien-Chiarn Lee, Eyad H. Abed. "Washout Filters in Feedback Control: Benefits, Limitations and Extensions", Proceeding of American Control Conference, Boston (2004).
25. Available online at: http://psdyn.ece.wisc.edu/IEEE_benchmarks/.