

Journal of Soft Computing and Information Technology (JSCIT)

Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran

Journal Homepage: www.jscit.nit.ac.ir

Volume 6, Number 2, Fall & Winter 2018, pp. 83-99

Received: 2017/11/22; Revised: 2018/01/12; Accepted: 2018/03/06



Features Designing a Neuro-Fuzzy Controller for GUPFC to Improve Transient Stability Based on Energy Function

Abdoreza Noori Shirazi, Babak Mozafari, Soodabeh Soleymani

Department of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

a_noorishirazi@iaunour.ac.ir, mozafari@srbiau.ac.ir, s.soleymani@srbiau.ac.ir

Corresponding author address: Babak Mozafari, Department of Electrical and Computer Engineering, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Tehran, Iran.

Abstract- In this paper, designing a neuro-fuzzy controller for generalized unified power flow controller (GUPFC) to improve transient stability has been investigated. For this purpose, a controllable compensator has been designed by using Lyapunov stability criterion to increase transient stability margin and damp transient oscillation in such systems. Since transient energy function of system is a suitable tool for investigating the stability issue, optimization of GUPFC energy function has been noticed in order to reach the highest margin of transient stability. This idea is the basis of producing required teaching information in ANFIS network and can be used as a GUPFC controller. In this paper, the impact of GUPFC on single machine system, infinite bus (SMIB) and 9-bus system (Anderson and Fouad, 1977) has been studied by using proposed method. Moreover, by simulating the other FACTS devices such as UPFC and IPFC, the priority of GUPFC was proved.

Keywords- Generalized unified power flow controller (GUPFC), transient stability, Lyapunov energy function, critical clearing time (CCT), neuro-fuzzy control.

طراحی کنترل کننده فازی - عصبی برای کنترل کننده یکپارچه عبور توان

تکامل یافته بر اساس ماکزیمم سازی تابع انرژی لیاپانوف جهت بهبود پایداری گذرا

عبدالرضا نوری شیرازی، بابک مظفری، سودابه سلیمانی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران، ایران

a_noorishirazi@iaounour.ac.ir, mozafari@srbiau.ac.ir, s.soleymani@srbiau.ac.ir

* نشانی نویسنده مسئول: بابک مظفری، تهران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، تهران، ایران.

چکیده- در این مقاله طراحی یک کنترل کننده عصبی- فازی برای GUPFC جهت بهبود پایداری گذرا تحت بر سر سی قرار گرفته است. برای این جبران کننده کنترل کننده ای طراحی شده که با برآورده کردن معیار پایداری لیاپانوف، باعث افزایش حاشیه پایداری گذرا و کاهش نوسانات گذرا در سیستم های فوق گردیده است. با توجه به این که تابع انرژی گذرای سیستم ابزار مناسبی برای بررسی مسئله پایداری است، بهینه سازی تابع انرژی GUPFC به منظور دستیابی به بیشترین حاشیه پایداری گذرا مدنظر قرار گرفته است. این ایده، اساس تولید اطلاعات آموزش مورد نیاز در شبکه ی ANFIS به عنوان کنترل کننده ی GUPFC قرار گرفته است. مطالعه ی چگونگی تأثیر GUPFC در نیل به هدف، با پیاده سازی روش پیشنهادی بر روی سیستم تک ماشینه - شین بینهایت (SMIB) و سیستم ۹ باس انجام شده است. همچنین با شبیه سازی دیگر ادوات FACTS از جمله UPFC و IPFC بر تری GUPFC با مقایسه ی نتایج نشان داده شده است.

واژه های کلیدی: کنترل کننده یکپارچه عبور توان تکامل یافته، پایداری گذرا، تابع انرژی لیاپانوف، زمان بحرانی رفع خطا، کنترل فازی عصبی

۱- مقدمه

که بدون احداث خطوط جدید بتوان از ظرفیت واقعی سیستم انتقال استفاده کرد. ویژگی ممتاز این عناصر افزایش سطح انتقال خطوط تا حد حرارتی آنها بدون کاهش امنیت و قابلیت اطمینان شبکه می باشد و دیگر ویژگی این ادوات این است که با کمک گرفتن از الکترونیک قدرت می توان سیستم های کنترلی قدیمی که قبلاً خیلی کاربرد داشت را کنار گذاشته و سیستم هایی را بسازیم که ارزان تر، قابلیت اطمینان بالاتر، و هم جای کمتری را اشغال کنند. این ادوات برای تقویت کنترل پذیری و توسعه ظرفیت انتقال شبکه ها بکار برده می شوند.

کنترل کننده یکپارچه عبور توان تکامل یافته توان (GUPFC)، ترکیبی است از یک جبران ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM) و n عدد جبران ساز سری استاتیکی (SSSC) که از طریق یک رابط

با رشد روزافزون مصرف انرژی، سیستم های انتقال انرژی با بحران محدودیت انتقال توان مواجه شده اند. این محدودیت ها عملاً به خاطر حفظ پایداری و تأمین سطح مجاز ولتاژ به وجود آمده است. بنابراین ظرفیت بهره برداری عملی خطوط انتقال بسیار کمتر از ظرفیت واقعی خطوط که همان حد حرارتی آنهاست، می باشد. این امر موجب عدم بهره برداری بهینه از سیستم های انتقال انرژی خواهد شد. یکی از راه های افزایش ظرفیت انتقال توان، احداث خطوط جدید است که این امر هم چندان ساده نبوده و مشکلات فراوانی را به همراه خواهد داشت.

با پیشرفت صنعت نیمه هادی ها و استفاده آنها در سیستم قدرت، مفهوم سیستم های انتقال انرژی انعطاف پذیر (FACTS) مطرح شد

کمینه می‌کند، به عبارت دیگر آنالیز به وسیله ادوات FACTS به عمل آمده است. IPFC و GUPFC بدون و همراه پواسون تورم صفر (ZIP) بار مدل‌های بازار و مقایسه نتایج ارائه شده در [۱۰]، به کارگیری کنترل کننده‌های UPFC و GUPFC برای به حداکثر رساندن قابلیت انتقال مفید در [۱۱]، بهبود قانون فازی مبتنی بر GUPFC در [۱۲]، همچنین در مقاله [۱۳] اصل راه کار کنترلی پیشنهادی مبتنی بر یک جستجو عددی برای ماکزیمم مشتق زمانی بخش پتانسیلی تابع انرژی برای یک سیستم الکتریکی قدرت شامل GUPFC ها آمده است. با پیگیری این اصل، GUPFC در قالبی از پارامترهای قابل کنترل ثابت-بخشی کنترل شده‌اند که راه کار کنترلی برای تنظیم پارامترهای کنترلی GUPFC در مثالی از میرایی نوسانات نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهند که مقادیر ولتاژهای تزریقی سری GUPFC و مقادیر جریان موازی می‌بایست برای مقادیر ماکزیمم تنظیم شوند که تنها زاویه ولتاژهای تزریقی سری به میزان کمی به اندازه ۱۸۰ درجه تغییر می‌کنند. بنابراین یک همانندی با راه کارهای کنترلی پیشنهادی bang-bang برای برخی از دیگر ادوات FACTS را نشان می‌دهد. همان گونه که از نتایج می‌توان دید، یک GUPFC می‌تواند یک وسیله کارآمد برای بهبود پایداری گذرا و میرایی نوسانات باشد. به هر حال، کنترل مناسب یک پیش شرط برای این قضیه می‌باشد. مقایسه UPFC و GUPFC برای بهبود کیفیت توان در [۱۴] و تأثیر GUPFC در پایداری سیگنال کوچک سیستم‌های قدرت در [۱۵] اشاره شده است. در مرجع [۱۶] به طراحی کنترل کننده‌ی ANFIS برای محاسبه‌ی تابع انرژی لیاپانوف برای میل به هدف بهبود پایداری گذرا و رسیدن به بیشترین حاشیه پایداری گذرا به وسیله بهینه سازی تابع انرژی IPFC و کنترل پارامترهای IPFC با هدف تولید توان محاسبه شده، با کنترل هوشمند IPFC و همچنین در مرجع [۱۷]، به طراحی یک کنترل کننده عصبی- فازی مبتنی بر تابع انرژی گذرا در جهت بهبود پایداری گذرا پرداخته شده است. در مقاله [۱۸] به ارزیابی پایداری گذرا با رویکرد خانواده پایداری گذرا پرداخته شده است. تحلیل پایداری گذرای به شدت غیرخطی پس از خطای دینامیک یکی از بخش‌های بسیار چالش برانگیز محاسباتی برای ارزیابی امنیت دینامیکی می‌باشد. این مقاله یک رویکرد جدید را برای ارزیابی پایداری گذرای سیستم پیشنهاد می‌کند. رویکرد جدید ایده روش‌های انرژی را تعمیم داده و مفهوم تابع انرژی را به خانواده توابع لیاپانوف (LFF) کلی تر که به وسیله تکنیک برنامه نویسی نیمه معین ساخته شده، را گسترش داده است. برخلاف تابع انرژی مرسوم و متغیرهایش، توابع لیاپانوف ساخته شده همواره فقط در یک همسایگی محدود از نقطه تعادل کاهش می‌یابند. [۱۹]

DC به هم جفت شده‌اند. این تجهیز نخستین بار توسط فردانش و همکاران در سال ۲۰۰۰ میلادی معرفی شده است. این مقاله مفهوم جدیدی را از میدل منبع ولتاژ (SVC) که دارای چندین کانورتور (سه یا بیشتر از سه) می‌باشد مبتنی بر ادوات FACTS به عنوان کنترل زیر شبکه DC معرفی می‌کند. زیر شبکه کنترل به عنوان یک سیستم انتقال DC چند ترمیناله با به کارگیری تعدادی کانورتور سری و شنت متصل به هم و از لحاظ توان AC که برای قابلیت کنترل نهایی در سیستم قدرت AC می‌باشد، تعبیه شده‌اند [۱]. یک سال بعد، ژانگ و همکاران در [۲] به مدلسازی GUPFC در مطالعات پخش بار بهینه پرداختند، در این مقاله یکی از مفاهیم جدید کنترلر GUPFC یا UPFC چند خطه تحت بررسی قرار گرفته، که توانایی کنترل ولتاژ باس و پخش توان بیشتر از یک خط، حتی یک زیر شبکه را دارا می‌باشد، که GUPFC ها قابلیت کنترلی قوی تری از UPFC ها را دارا می‌باشند علی‌رغم آنکه تعداد مقالات کمی به مطالعه این تجهیز پرداختند. بافاصله سه سال پس از معرفی تجهیز، سان و همکاران مقاله‌ای در مورد کاربرد GUPFC در شبکه Sichuan چین منتشر کردند. این مقاله کاربرد GUPFC در یک شبکه برق قدرت واقعی برای پخش توان و همچنین کنترل ولتاژ را بررسی می‌کند. با استفاده از یک GUPFC چهار مبدله در سیستم برق Sichuan چین، توزیع پخش توان این سیستم منطقی تر شده، و سطح پایداری گذرای کل سیستم نیز همچنین افزایش یافته است. علاوه بر این، یک کنترل کننده جدید برای این GUPFC چهار مبدله پیشنهاد شده و با شبیه سازی کامل برای نشان دادن کارایی آن مدل شده است [۳]. مدلسازی GUPFC و IPFC در مطالعات پخش بار نیوتونی و به کارگیری الگوریتم پیشنهادی در شبکه ۳۰ شینه و ۱۱۸ شینه IEEE از دیگر مطالعات انجام شده درباره این تجهیز است که در سال ۲۰۰۳ ارائه شده است. از دیگر موضوعات بررسی شده در مورد GUPFC می‌توان به طراحی کنترل کننده‌ی جبران ساز [۴]، نقش جبران ساز در میراسازی نوسانات توان [۵]، نقش جبران ساز در افزایش قابلیت انتقال توان در دسترس (ATC) و مکان‌یابی GUPFC برای رفع مشکل پرشدگی خطوط [۶]، بهینه سازی پخش توان [۷]، کنترل کننده پخش توان [۸]، کامل کردن مطالعات پخش توان [۹] اشاره نمود. در [۹] مقایسه IPFC و GUPFC برای مدیریت پرشدگی خطوط برق مورد مطالعه صورت گرفته است. نتایج بدست آمده با امپدانس ثابت، جریان ثابت و بار توان ثابت (مدل پواسون تورم صفر) همچنین با نتایج بدست آمده با بار توان ثابت (P,Q) در همه‌ی باس ها مقایسه شده است. یک تابع هدف، هزینه ازدحام را بر اساس تابع پیشنهادی ارسال شده به وسیله هر کمپانی مولد برق برای سیستم مستقل اپراتور (ISO)

ماکزیمم در هنگام بروز خطا (خطای اتصال کوتاه سه فاز) به منظور بهبود پایداری گذرا و افزایش زمان بحرانی رفع خطا (CCT) به سیستم قدرت توسط GUPFC تزریق خواهد شد. سیستم های مورد استفاده در این مقاله سیستم تک ماشینه و سیستم ۹ باسه استاندارد IEEE می باشد. بنابراین نوآوری های انجام شده را میتوان به شرح زیر خلاصه نمود:

۱- تعیین تابع انرژی GUPFC.

۲- طراحی کنترل کننده ی عصبی-فازی به منظور استخراج ماکزیمم توان.

۳- افزایش زمان بحرانی رفع خطا در اثر بروز شدیدترین خطای سیستم قدرت (خطای اتصال کوتاه سه فاز).

۴- استفاده از دو سیستم تست به منظور تایید سیستم کنترل پیشنهادی.

۲- مدل سیستم

۱-۲- کنترل کننده یکپارچه عبور توان تکامل یافته

در چارچوب مفاهیم سنتی انتقال توان، GUPFC قادر به کنترل همزمان یا انتخابی تمام پارامترهای مؤثر بر پخش توان در خط انتقال (یعنی: ولتاژ، امپدانس و زاویه فاز) است و این قابلیت منحصر به فرد با قید "یکپارچه" در نام آن معنی یافته است. علاوه بر آن می تواند به صورت مستقل، سیلان هر دو توان واقعی و راکتیو را در خط کنترل کند. در همهی کنترل کننده هایی که در بخش های قبلی مورد بحث قرار گرفتند، کنترل توان حقیقی به همراه تغییرات مشابه در توان راکتیو است، یعنی سیلان افزایش یافته توان حقیقی، منجر به افزایش توان راکتیو خط نیز می شود [۲]. ساده ترین نوع این جبران ساز یک کنترل کننده ی سه میدلی است که یک میدل موازی و دو میدل سری برای دو خط انتقال تشکیل شده است. [۱] به بیان قابلیت GUPFC در توسعه مفهوم کنترل ولتاژ و توان در مقایسه با ادوات شناخته شده ای چون IPFC و UPFC و قابلیت کنترل ولتاژ شینه به صورت مستقل از قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو در دو خط انتقالی که بر روی آن نصب شده، اشاره می نماید. بدین ترتیب این ترکیب قادر به کنترل همزمان پنج کمیت ولتاژ شینه و توان اکتیو و راکتیو از دو خط انتقال است.

GUPFC یک منبع ولتاژ سنکرون تکامل یافته است که در فرکانس مؤلفه ی اصلی (سیستم قدرت)، با فازور ولتاژ V_T ($V_T \leq V_{Tmax}$) و زاویه های φ_{T1} ، φ_{T2} ($0 \leq \varphi_T \leq 2\pi$)، نمایش داده می شود و به صورت سری-موازی با خطوط انتقال قرار می گیرد.

سیستم های هوشمند در کنترل ادوات FACTS همانند دیگر کاربردهای آن به سرعت مورد توجه قرار گرفته است. از جمله می توان به استفاده از کنترل فازی UPFC با هدف بهبود پایداری گذرا اشاره نمود. در مرجع [۲۰] با طراحی دو کنترل کننده ی فازی یکی برای محاسبه ی توان لازم برای میل به هدف بهبود پایداری گذرا و دیگری برای کنترل پارامترهای UPFC با هدف تولید توان محاسبه شده، به کنترل هوشمند UPFC پرداخته شده است.

در برخی مقالات نیز به کاربرد شبکه های عصبی در کنترل ادوات FACTS از جمله UPFC پرداخته شده است [۲۱]. کنترل UPFC با شبکه عصبی بر پایه ی قضیه ی لیاپانوف به منظور بهبود پایداری گذرای سیستم قدرت در [۲۲] مدنظر قرار گرفته است. در مرجع [۲۳]، سه ابزار SSSC، STATCOM و UPFC که با کنترل کننده ی RBFN کنترل شده و همچنین عملکرد آن ها در بهبود پایداری گذرا مورد مقایسه قرار گرفته است.

با مطرح شدن روش های متنوع کنترل فازی-عصبی، کاربرد آن به مباحث مختلف قدرت نیز راه یافته است. از جمله روش های عصبی-فازی، ANFIS است که اولین بار در سال ۱۹۹۳ در مقاله ای پیشنهاد و به تفصیل شرح داده شد [۲۴]. با وجود کارآمدی این روش کنترلی و محاسن قابل توجه آن، در حوزه ی سیستم های قدرت کم استفاده مانده است. کاربرد ANFIS در کنترل UPFC در مرجع [۲۵] با هدف میراسازی نوسانات فرکانس پایین مدنظر قرار گرفته است. در این مرجع از روش هیبرید به منظور آموزش کنترل کننده ANFIS استفاده شده و بر پایه مدل خطی شده Hefron-Philips سیستم قدرت با وجود UPFC، عملکرد آن در میراسازی نوسانات در شرایط مختلف بررسی و برتری کنترل کننده ANFIS بر کنترل کننده با بهره ثابت به اثبات رسیده است. دیگر روش های فازی-عصبی در برخی مراجع از جمله [۲۶] مورد توجه قرار گرفته است. در این مقاله ابتدا به ارائه مدل و فرموله کردن مسئله پرداخته شده است. همچنین به اصول اساسی عملکرد به همراه ساختمان داخلی و قابلیت های کنترل GUPFC اشاره شده است. پس از آن درباره مدل ریاضی و روابطی که در طی حل مسئله مبنای کار بوده، بحث شده است. سپس استراتژی کنترل شامل شیوه ی به کارگیری روش عصبی-فازی و چگونگی میل به هدف بهبود پایداری گذرا توضیح داده شده است. در پایان نیز با ارائه ی نمودارها و جداولی، تحقق هدف پایداری گذرا از طریق جبران سازی سیستم با GUPFC کنترل شده با کنترل کننده ی ANFIS به اثبات رسیده است.

در این مقاله برای نخستین بار تابع انرژی GUPFC بدست می آید، سپس با استفاده از کنترل کننده ی عصبی-فازی، انرژی

منفی توان حقیقی ظاهر می شود، به توان DC تبدیل می گردد.

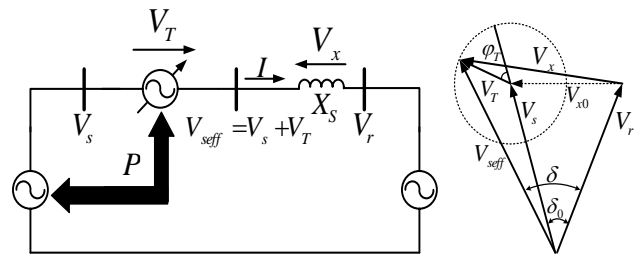
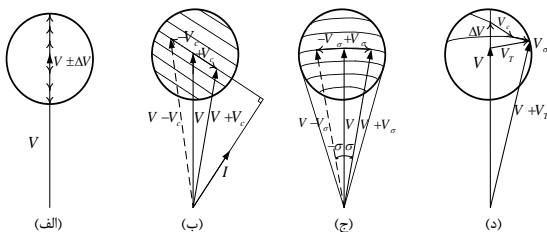
با استفاده از نمایش فازوری، عملکردهای اصلی کنترل سیلان توسط GUPFC در شکل ۳ نشان داده شده اند. تنظیم ولتاژ از طریق تزریق ولتاژ با تغییرات پیوسته‌ی هم فاز و غیر هم فاز، برای رشد ولتاژ به صورت $(V_T = \pm \Delta V (\phi_{TW} = 0))$ در شکل ۳-الف نشان داده شده است که از نظر عملی مشابه یک تپ چنجر ترانسفورماتور با بی نهایت پلکان کوچک است.

جبران سازی راکتیو سری در شکل ۳-ب نشان داده شده که در آن ولتاژ $V_T = V_c$ با زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به جریان I تزریق شده است. از لحاظ عملکرد این امر مشابه جبران سازی سری خازنی و القایی خط است که برای SSSC به دست می آید. ولتاژ جبران سازی تزریق شده‌ی سری، در صورت تمایل می تواند مستقل از تغییرات جریان خط ثابت نگه داشته شود، یا می تواند متناسب با جریان خط تغییر کند تا توسط یک خازن سری یا راکتیو، عمل جبران سازی خط را تقلید نماید.

تنظیم زاویه فاز (جابه جایی فاز) در شکل ۳-ج نشان داده شده که در آن ولتاژ $V_T = V_\sigma$ که دارای تناسب زاویه‌ای با V_s است، تزریق می شود تا جابه جایی فاز مطلوب σ (با تقدم یا تاخر) بدون هیچ گونه تغییر در مقدار به دست آید. بنابراین GUPFC می تواند به عنوان یک تنظیم کننده‌ی زاویه فاز (PAR) کامل عمل و توان راکتیو مربوط به کنترل زاویه‌ی انتقال را نیز از طریق تولید داخلی توان راکتیو تأمین کند.

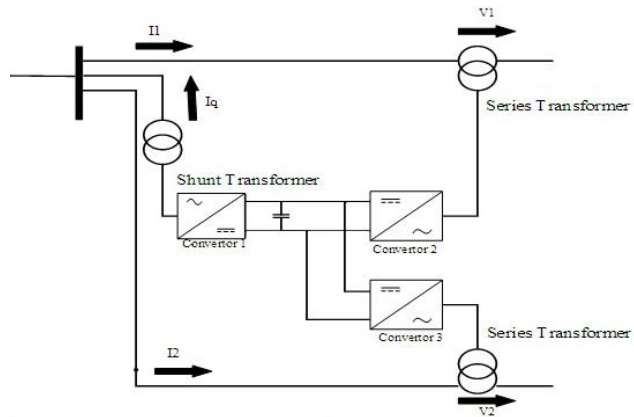
کنترل سیلان توان با چند کارکرد، که در آن تنظیم ولتاژ ترمینال، جبران سازی خازنی سری خط و جابه جایی فاز، به طور هم زمان انجام می شوند، در شکل ۳-د نشان داده شده است؛ مطابق آن داریم:

$V_T = \Delta V + V_c + V_\sigma$. این قابلیت عملکرد، منحصر به GUPFC است. هیچ دستگاه متداولی به طور منفرد دارای این قابلیت عملکرد نیست. محدوده‌ی گسترده‌ی کنترل توان انتقال یافته که مستقل از زاویه‌ی انتقال δ بوده نه تنها نشان دهنده‌ی قابلیت برتر GUPFC در کاربردهای سیلان توان است، بلکه ظرفیت توانمندی را نیز برای بهبود پایداری حالت گذرا و میرایی نوسان توان عرضه می نماید [۱ و ۲].



شکل ۱: نمایش مفهومی GUPFC در یک سیستم قدرت دو ماشینه [۲]

در اجراهای عملی که امروزه انجام می شود، GUPFC از سه کانورتر منبع ولتاژی، به صورتی که در شکل ۲ نشان داده شده، تشکیل شده است. این کانورترهای پشت به پشت که در شکل ۲، کانورتر ۱ به موازات کانورتر ۲ و کانورتر ۳ نام گذاری شده است، از یک رابط مشترک DC که توسط یک خازن ذخیره DC تأمین می شود، استفاده می کنند.



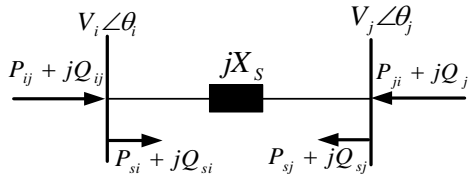
شکل ۲: پیکربندی ساده GUPFC به وسیله‌ی دو کانورتر سری و یک کانورتور موازی منبع ولتاژی پشت به پشت [۲]

همان گونه که قبلاً اشاره شد، این آرایش به عنوان یک کانورتر قدرت AC به AC عمل می کند که در آن توان حقیقی می تواند آزادانه در هر جهتی بین ترمینال های AC در کانورتر سیلان یابد. همچنین هر کانورتر می تواند به طور مستقل توان راکتیو را در ترمینال خروجی AC تولید (یا جذب) کند. کانورتر ۲ و کانورتر ۳، عملکرد اصلی GUPFC را با تزریق ولتاژ V_T که مقدار قابل کنترل V_T و زاویه های فاز ϕ_{T1}, ϕ_{T2} را دارا می باشد، به صورت سری با خط از طریق یک ترانسفورماتور الحاقی میسر می سازند. این ولتاژ تزریقی در اصل به عنوان یک منبع ولتاژ AC سنکرون عمل می کند. جریان خط انتقال با سیلان از درون این منبع ولتاژ منجر به مبادله توان راکتیو و حقیقی بین آن و سیستم AC می شود. توان راکتیو مبادله شده در ترمینال AC (یعنی در ترمینال ترانسفورماتور الحاقی سری)، به صورت داخلی توسط کانورتر تولید می شود. توان حقیقی مبادله شده در ترمینال AC که در رابط AC به صورت درخواست مثبت یا

مدل مشابه مدل تزریقی SSSC است که می‌توان با افزودن شاخه‌ی موازی، روابط مربوط به GUPFC را استخراج نمود.

$$P_{si} = \frac{V_i V_T}{X_S} \sin(\varphi_T) + V_i \cdot I_T \quad (1)$$

$$P_{sj} = -\frac{V_j V_T}{X_S} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (2)$$



شکل ۶: مدل توان‌های تزریقی GUPFC [۱۷]

$$Q_{si} = \frac{V_i V_T}{X_S} \cos(\varphi_T) + V_i \cdot I_q \quad (3)$$

$$Q_{sj} = -\frac{V_j V_T}{X_S} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (4)$$

که در آن $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ می‌باشد (مطابق شکل ۵ و ۶).

حال می‌توان با توجه به شرط تعادل توان حقیقی بین شاخه‌ی سری و موازی ($P_{si} + P_{sj} = 0$) که اثبات آن در مرجع [۱۷] آمده و منجر به تثبیت ولتاژ رابط DC می‌شود، مدل‌سازی را انجام داد. به این ترتیب، روابط اساسی مربوط به GUPFC که در مراحل بعدی و در طی عملیات کنترل به آن نیاز است، استخراج می‌شود.

۳- تابع انرژی

در مراجع [۲۷] و [۲۸] نشان داده شده که در صورتی که GUPFC ماکزیمم مقدار V_T و I_q را بسته به مقادیر نامی اختیار کند، بیشترین حاشیه‌ی پایداری گذرا قابل حصول خواهد بود. بنابراین چنانچه V_T و I_q در بیشترین حد تنظیم و φ_T ثابت باشد تابع انرژی لیاپانوف GUPFC برای نوسان اول قابل تعریف است. واضح است که به کارگیری GUPFC با پارامترهای ثابت، نقش چندانی در بهبود پایداری گذرا ایفا نخواهد کرد، اما مرجع [۲۷] ثابت کرده است چنانچه پارامترهای GUPFC به صورت قطعه‌ای ثابت^۱ نیز کنترل گردد، تعریف تابع انرژی صحیح است.

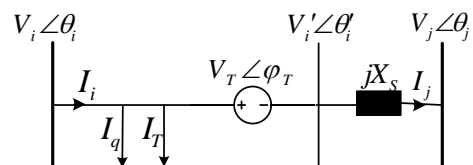
اصول لازم برای اعمال روش تابع انرژی گذرا برای تحلیل پایداری گذرا سیستم قدرت، به طور مفهومی مشابه اصول حاکم بر توپ غلتان در کاسه است. در آغاز سیستم قدرت در یک نقطه تعادل پایدار عمل می‌کند، اگر خطایی رخ دهد، نقطه تعادل دچار اغتشاش می‌شود و ماشین‌های سنکرون شتاب می‌گیرند. در طول زمان خطا، انرژی جنبشی و پتانسیل زیاد می‌شود و از نقطه SEP دور می‌شود. بعد از رفع خطا، سیستم باید توانایی جذب انرژی پتانسیل را داشته باشد. شکل (۷) به خوبی این مطلب را نشان می‌دهد. بعد

شکل ۳: دیاگرام‌های فازوری نشان‌دهنده‌ی قابلیت‌های کنترل انتقال متداول توسط GUPFC [۱]

در یک سیستم بی‌اتلاف، می‌توان GUPFC را با یک منبع ولتاژ سری شده با راکتانس X_S که مربوط به ترانسفورماتور آن است به همراه یک منبع جریان با اتصال موازی نمایش داد. این نمایش در شکل ۴ نشان داده شده است. در این نمایش، GUPFC بین دو شین i و j قرار گرفته است. جریان I_T هم‌فاز با V_i و نمایشی از توان حقیقی مبادله شده بین شاخه‌ی سری و موازی می‌باشد. این توان، همان توانی است که توسط شاخه‌ی سری به شبکه‌ی قدرت تزریق می‌گردد. I_q نمایش شاخه‌ی راکتیو موازی است که مستقل از ولتاژ V_i است.

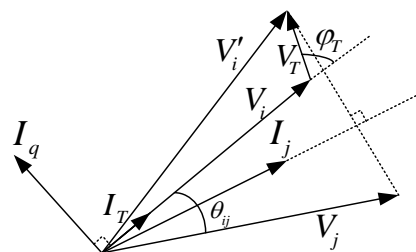
۲-۲- مدل تزریقی GUPFC

پارامترهای کنترلی (قابل کنترل) GUPFC عبارتند از: اندازه‌ی ولتاژ شاخه‌ی سری (V_T)، زاویه‌های ولتاژ شاخه‌ی سری ($\varphi_{T1}, \varphi_{T2}$) نسبت به ولتاژ باس V_i و جریان راکتیو موازی (I_q). جریان اکتیو I_T بستگی به توان حقیقی دارد که شاخه‌ی سری به شبکه تزریق خواهد کرد. به بیان دیگر، مقدار آن همان‌طور که در ادامه خواهد آمد، به گونه‌ای تعیین می‌شود که تعادل توان حقیقی بین شاخه‌ی سری و موازی برقرار گردد.



شکل ۴: مدل پایه‌ای GUPFC [۱۷]

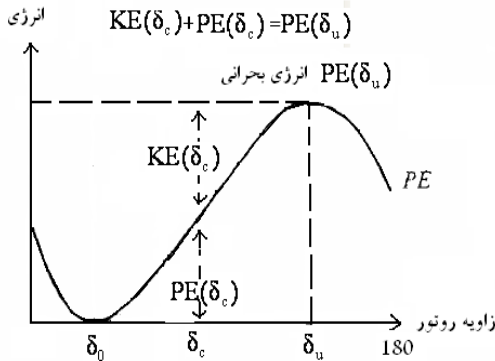
دیاگرام فازوری GUPFC با نمایش شاخه‌ی سری و موازی آن به صورت اندازه و زاویه‌های ولتاژ شاخه‌ی سری (V_T)، $(\varphi_{T1}, \varphi_{T2})$ و جریان شاخه‌ی موازی (I_q و I_T) به همراه بردارهای ولتاژ و جریان شبکه در شکل ۵ آمده است.



شکل ۵: دیاگرام فازوری

در شکل ۶، توان تزریقی شاخه‌ی سری نشان داده شده است. این

تنظیم کند. V_k انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی سطح انرژی پتانسیل، از دست داده و انرژی پتانسیل افزایش می یابد. برای اجتناب از ناپایداری لازم است که سیستم توانایی جذب انرژی پتانسیل بعد از بروز اغتشاش در شبکه را داشته باشد.



شکل ۷: منحنی زاویه- انرژی در صورت اغتشاش در سیستم

$$V_{p1}(\vec{\phi}, V) = -\sum_{i=1}^m P_{mi} \vec{\phi}_i + \sum_{i=m+1}^{m+N} \int \frac{Q(V_i)}{V_i} dV_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{m+N} \sum_{j=1}^{m+N} B_{ij} V_i V_j \cos \vec{\phi}_{ij} \quad (9)$$

در اینجا، P_{mi} انرژی مکانیکی ورودی ماشین i -ام، $Q(V_i)$ بخش راکتیو وابسته به ولتاژ شین i و B_{ij} سوسپتانس در ماتریس ادمیتانس افزایش داده شده است.

اگر توان حقیقی تزریقی GUPFC یعنی P_{sj} و P_{si} در θ_j و θ_i ضرب و حاصل آن ها جمع گردد، به دست می آید:

$$P_{si} \theta_{ij} = \frac{V_i V_T}{X_S} \sin(\theta_{ij} + \varphi_T) \theta_{ij} \quad (10)$$

حال رابطه ی (۳) در \dot{V}_i ضرب و بر V_i تقسیم، و رابطه ی (۳) در \dot{V}_j ضرب و بر V_j تقسیم می شود:

$$\frac{Q_{si}}{V_i} \dot{V}_i = \frac{\dot{V}_i V_T}{X_S} \cos(\varphi_T) + \dot{V}_i \cdot I_q \quad (11)$$

$$\frac{Q_{sj}}{V_j} \dot{V}_j = -\frac{\dot{V}_j V_T}{X_S} \cos(\theta_{ij} + \varphi_T) \quad (12)$$

از حاصل جمع روابط (۱۰) تا (۱۲)، نتیجه ی زیر حاصل می گردد:

$$\frac{V_{Tw}}{X_{Sw}} \cdot [V_j \sin(\theta_{ijw} + \varphi_{Tw}) \dot{\theta}_{ijw} + \dot{V}_i \cos(\varphi_{Tw}) - \dot{V}_j \cos(\theta_{ijw} + \varphi_{Tw})] + \dot{V}_i \cdot I_q \quad (13)$$

حال بایستی انتگرال این رابطه مورد محاسبه قرار گیرد. اما روند یکسانی برای محاسبه ی انتگرال های این چنین وجود ندارد. برای هر یک از ادوات FACTS بسته به استراتژی کنترلی، روشی برای حل آن برگزیده می شود. در اینجا در صورتی که I_q و V_T در ماکزیمم مقدار تنظیم شود و φ_T به صورت قطعه ای ثابت باشند می توان رابطه ی

از رفع خطا، سیستم انرژی جنبشی خود را مشابه توپ غلتان روی سطح انرژی پتانسیل، از دست داده و انرژی پتانسیل افزایش می یابد. برای اجتناب از ناپایداری لازم است که سیستم توانایی جذب انرژی پتانسیل بعد از بروز اغتشاش در شبکه را داشته باشد.

در این تحقیق جبران کننده GUPFC طوری کنترل خواهد شد که توانایی جذب انرژی پتانسیل را در سیستم بعد از خطا افزایش دهد، در نتیجه پایداری سیستم بهبود یابد.

پس از آشنایی با مفهوم پایداری در سیستم های غیرخطی با استفاده از تابع لیاپانوف، می توان نشان داد [۳] که تابع انرژی لیاپانوف در سیستم تک ماشینه و چند ماشینه به صورت معادلات (۵) و (۶) زیر است.

$$V(\delta, \omega) = \frac{1}{2} M(\omega - \omega_s)^2 + P_{\max} [\cos(\delta) - \cos(\delta^s)] + (\delta - \delta^s) P_{\max} \sin \delta^s \quad (5)$$

$$V(\delta, \omega) = \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} M_i (\omega_i - \omega_s)^2 + \sum_{i=1}^n P_{mi} (\delta_i - \delta_i^s) + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n C_{ij} [\cos(\delta_{ij}) - \cos(\delta_{ij}^s)] \quad (6)$$

در سیستم چند ماشینه نیز تعبیر فیزیکی مشابه از تابع لیاپانوف فوق بدست آمد. در واقع تابع لیاپانوف جمع جبری تمام انرژی های جنبشی و پتانسیل موجود در سیستم است.

از تابع انرژی سیستم در رابطه (۵) و (۶) مشاهده می شود که مقدار این تابع در نقطه تعادل پایدار نهایی برابر صفر است.

برای استخراج تابع انرژی سیستم با GUPFC از روش SPEF استفاده می شود [۲۹]. همان طور که قبلاً شرح داده شد مدل کلاسیک برای ژنراتور در نظر گرفته می شود. بارها نیز به صورت ادمیتانس ثابت مدل می شوند. تابع انرژی کل سیستم شامل N شین و m ژنراتور به صورت زیر نوشته می شود:

$$V(\vec{\omega}, \vec{\phi}, v) = V_k(\vec{\omega}) + V_{p1}(\vec{\phi}, v) + V_{p2}(\vec{\phi}) + K \quad (7)$$

که در آن:

$$\vec{\phi} = [\vec{\delta}^T, \vec{\theta}^T]^T \quad (8)$$

δ : برداری متشکل از زوایای روتور m ژنراتور؛

θ : برداری متشکل از زوایای ولتاژ N شین؛

ω : برداری متشکل از سرعت های روتور m ژنراتور؛

v : برداری متشکل از اندازه ی ولتاژ N شین می باشد؛

علامت تیلدا بر روی متغیرها برای نمایش متغیرها نسبت به مرجع COA (Center Of Angle) نوشته شده است. K ، ثابتی اختیاری است که معمولاً به گونه ای تنظیم می شود که مبدأ معادله را در صفر

(۱۳) را به صورت زیر نمایش داد:

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{V_{TW}}{X_{TSW}} (V_i \cos(\varphi_{TW}) - V_j \cos(\theta_{ijw} + \varphi_{TW})) \right] + V_i \cdot I_q \quad (14)$$

اکنون می توان تابع انرژی لیاپانوف GUPFC را به صورت تابعی صریح با فرم $V_{GUPFC} = f(\mathbf{V}_i, \mathbf{V}_j)$ با انتگرال گیری از رابطه ی (۱۴) به دست آورد. بنابراین انرژی پتانسیل GUPFC به صورت زیر حاصل می گردد:

$$V_{GUPFC} = \sum_{w=1}^n \left[\frac{V_{TW}}{X_{TSW}} (V_i \cdot \cos(\varphi_{TW}) - V_j \cdot \cos(\theta_{ijw} + \varphi_{TW})) \right] + I_q \cdot V_i \quad (15)$$

این تابع انرژی حاصل جمع توان های راکتیو Q_{sj} و Q_{si} مطابق شکل ۶ و نمایانگر کل توان تزریقی راکتیو به سیستم توسط GUPFC است. با مقایسه ی تابع انرژی GUPFC با دیگر ادوات FACTS، این نکته که تابع انرژی کلیه ی ادوات FACTS به صورتی به توان راکتیو آن ها مرتبط است، روشن می گردد. در مواردی که ادوات FACTS از آن دسته ای هستند که به صورت منبع ولتاژ یا جریان عمل نمی کنند مانند SVC و CSC و ترانسفورماتورهای جابجا کننده فاز، در طی بهره برداری از آن ها از نقطه نظر سیستم، تابع انرژی نصف حاصل جمع توان های راکتیو آن ها است:

$$V_{(SVC,CSC,PST)} = \frac{Q_{si} + Q_{sj}}{2} \quad (16)$$

در مورد UPFC و SSSC و GUPFC تابع انرژی مجموع توان های راکتیو است [27]:

$$V_{(GUPFC,SSSC,UPFC)} = Q_{si} + Q_{sj} \quad (17)$$

بنابر دو رابطه ی بالا، استخراج تابع انرژی از مجموع توان های راکتیو قاعده ای نیست که بتوان برای تمام ادوات FACTS به طور یکسان مورد استفاده قرار داد.

با استخراج تابع انرژی GUPFC، می توان آن را به تابع انرژی کل شبکه یعنی رابطه ی (۷) افزود، بنابراین [27]:

$$V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, v) = V_k(\tilde{\omega}) + V_{p1}(\tilde{\phi}, v) + V_{p2}(\tilde{\phi}) + V_{GUPFC}(\tilde{\phi}) + K \quad (18)$$

همانطور که گفته شد، تابع انرژی لیاپانوف جمع جبری تمام انرژی های جنبشی و پتانسیل موجود در سیستم است.

در سیستم های قدرت، مجموع انرژی جنبشی و پتانسیل سیستم که همواره مثبت است به عنوان تابع معین مثبت در نظر گرفته می شود. و برای اینکه شرط پایداری لیاپانوف برقرار باشد بایستی مشتق تابع انرژی سیستم منفی باشد.

اگر مشتق تابع مثبت معین $V(\tilde{\omega}, \tilde{\phi}, v)$ منفی معین شود، می توان گفت که سیستم پایدار است.

لزوماً یک تابع لیاپانوف در همه فضای حالت دارای مشتق منفی نیست بلکه فقط در یک ناحیه خاص (حول وحوش مبداء) منفی معین است. این ناحیه خاص ناحیه همگرایی است.

در این تحقیق کنترل کننده برای GUPFC در سیستم تک ماشینه و چند ماشینه طوری طراحی می شود که معیار پایداری لیاپانوف را برآورده نماید. در صورتی که بیش از یک GUPFC در شبکه وجود داشت، به همین ترتیب برای هر کدام تابع انرژی تعریف و به تابع انرژی کل شبکه افزوده می شود.

۴- روش کنترل

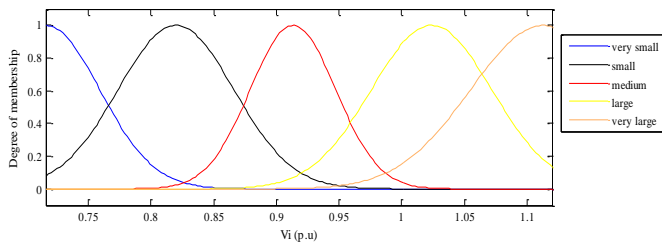
با فراهم آمدن امکان آموزش توسط شبکه ی عصبی تطبیقی، پروسه ی مدل سازی فازی می تواند از طریق مجموعه اطلاعاتی که به عنوان داده های آموزش آماده شده است، پارامترهای توابع عضویت خود را به گونه ای تعیین کند که سیستم استنتاج فازی بتواند اطلاعات ورودی-خروجی داده شده را دنبال کند. تصحیح و تطبیق این پارامترها با روش شیب گرادیان ممکن می شود. پس از این که بردار شیب گرادیان به دست آمد بایستی با به کارگیری یکی از روش های بهینه سازی، پارامترها به گونه ای تطبیق داده شود که خطا کاهش یابد.

ANFIS می تواند یکی از روش های پس انتشار خطا و یا ترکیب آن با تخمین حداقل مربعات خطا که روش Hybrid نام دارد برای تخمین پارامترهای توابع عضویت به کار گیرد. در این جا روش هیبرید انتخاب شده است.

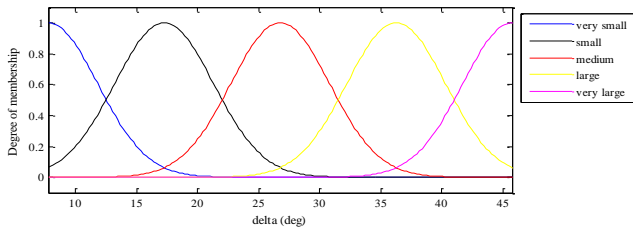
همان طور که قبلاً اشاره شد، در صورتی که هدف بهبود پایداری گذرا باشد، بایستی دو پارامتر کنترلی V_T و I_q در ماکزیمم مقدار متناسب با مقادیر نامی انتخابی تنظیم شوند؛ به بیان دیگر پس از انتخاب توان و ولتاژ نامی GUPFC، ۲ پارامتر از ۴ پارامتر کنترلی معلوم خواهد بود. پس تنها پارامتر φ_{T1} و φ_{T2} باقی می ماند. از سوی دیگر، هرچه GUPFC انرژی بیشتری به شبکه تزریق کند، حاشیه ی امنیت پایداری گذرا بیشتر خواهد بود. بنابراین می توان از تابع انرژی GUPFC به منظور کنترل بهینه ی GUPFC با هدف پایداری گذرا استفاده کرد. به این ترتیب که φ_{T1} و φ_{T2} به گونه ای تعیین شود که تابع انرژی GUPFC در رابطه ی (۱۳) ماکزیمم شود. در این صورت می توان مطمئن شد که GUPFC بیشترین انرژی را به شبکه تزریق و در نتیجه بیشترین حاشیه امنیت پایداری گذرا حاصل شده است.

این رویکرد اساس تولید اطلاعات مورد نیاز برای شبکه ی ANFIS می باشد، به این ترتیب که مقادیر مختلف δ و V_i که از اجرای سیستم شبیه سازی شده در حالات مختلف با مکان و مدت خطاهای متفاوت

این سیستم به منظور آموزش شبکه با استفاده از داده های ورودی- خروجی استفاده می شود.



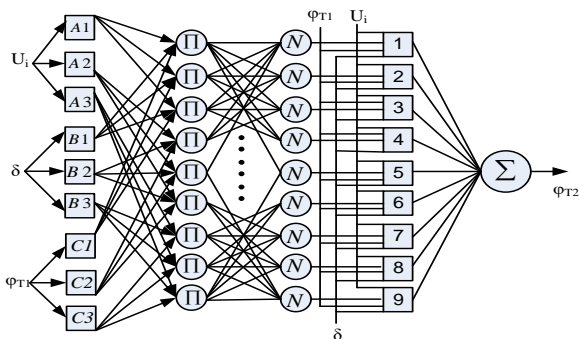
(الف)



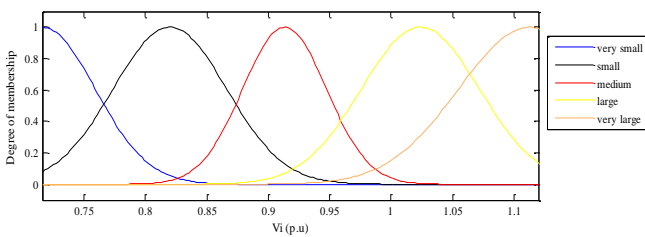
(ب)

شکل ۹: توابع عضویت الف) ولتاژ و ب) زاویه ولتاژ برای محاسبه φ_{T1}

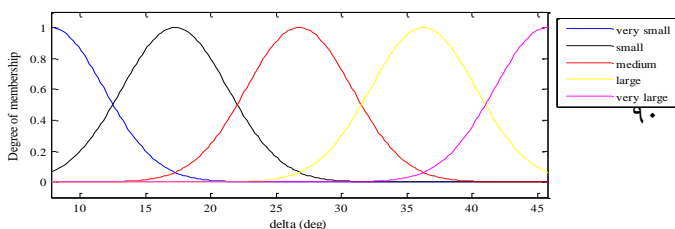
شکل ۹ نشان دهنده توابع عضویت برای ولتاژ و زاویه ولتاژ می باشند. سپس با استفاده از مقادیر U_i , θ_i و φ_{T1} می توان φ_{T2} را نیز محاسبه نمود.



شکل ۱۰: ساختار شبکه ANFIS برای محاسبه φ_{T2}

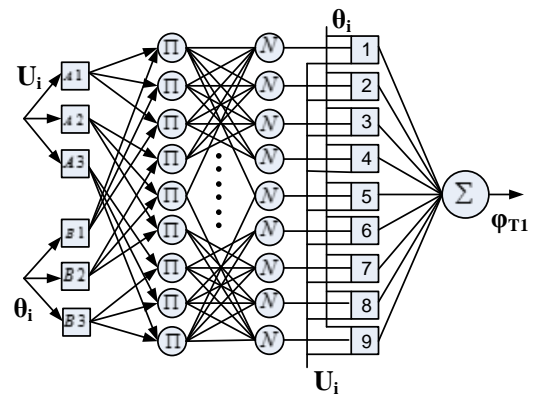


(الف)



به دست آمده در تابع انرژی GUPFC رابطه ی (۱۳) جایگزین و مقدار φ_{T2} و φ_{T1} به گونه ای تعیین می شود که V_{GUPFC} ماکزیمم شود. این عمل، اطلاعات آموزش مورد نیاز را تولید می کند. تعداد داده های آموزش در حدود ۳۰۰۰ داده و تعداد داده های آزمایش در حدود ۵۰ داده می باشد که از ۵۰ الگوی متفاوت حاصل شده است. شبکه ی ANFIS با این اطلاعات آموزش دیده و در شبکه قرار می گیرد. هنگامی که خطا اتفاق می افتد، بلافاصله پس از رفع خطا، GUPFC وارد شبکه می شود؛ مقادیر δ و V_i اندازه گیری و وارد کنترل کننده ی ANFIS می گردند؛ خروجی آن بر اساس شبکه ی آموزش دیده و تنظیم شده، φ_{T2} و φ_{T1} خواهد بود که با هدف بهبود پایداری گذرا تولید شده است. مقدار I_T نیز با توجه به شرط تعادل توان حقیقی تولید و در نتیجه کلیه ی پارامترهای GUPFC تعیین گشته است.

ساختار شبکه ANFIS در شکل ۸ آورده شده است.



شکل ۸: ساختار شبکه ANFIS برای محاسبه φ_{T1}

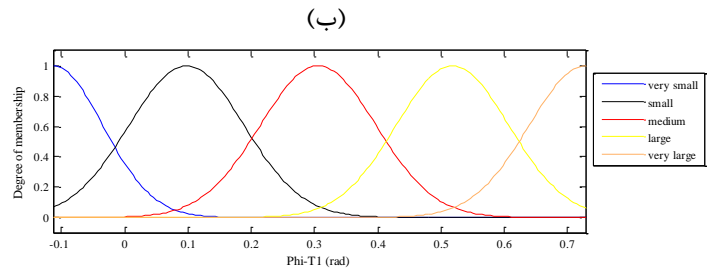
هر لایه ی این ساختار وظیفه ی خاصی دارد. در این جا مرور بسیار مختصر عملکرد لایه ها به ترتیب آورده شده است:

- ۱- محاسبه ی درجه عضویت مربوط به هر کدام از متغیرهای ورودی
- ۲- محاسبه ی درجه عضویت مربوط به متغیرهای مختلف
- ۳- محاسبه ی درجه عضویت نرمالیزه شده
- ۴- محاسبه ی نتیجه ی هر قانون فازی استنتاج شده
- ۵- محاسبه ی نتیجه ی قوانین فازی

به دلیل استفاده از روش هیبرید، عملکرد هر گره باید متمایز باشد، بنابراین از روش تاکاگی-سوگنو و کانگ (TSK) استفاده شده است.

ورودی های کنترل کننده ی ANFIS دو متغیر U_i و θ_i می باشند. همچنین پارامترهای توابع عضویت فازی با استفاده از یک الگوریتم یادگیری تنظیم می شوند و از قابلیت یادگیری شبکه های عصبی د

X_q (p.u)	۰/۶	K_F	۰/۰۵
X'_d (p.u)	۰/۳۱۴	T_F (sec)	۰/۳۵
T'_{do} (sec)	۶/۵۵	K_D	۲
K_A	۴۰۰	X_T (p.u)	۰/۰۷
T_A (sec)	۰/۰۵	X_L (p.u)	۰/۶۵



(ج)

توان مبنای سیستم ۱۰۰ MVA و ولتاژ ۲۳۰ kV در نظر گرفته شده است. پارامترهای p.u مربوط به ترانسفورماتور است. پارامترهای p.u مربوط به GUPFC نیز بر اساس توان و ولتاژ مبنای سیستم و ۰/۱ p.u در نظر گرفته شده است.

معادله نوسان الکتریکی ماشین سنکرون را می توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{2H}{\omega_s} \omega_{p.u.}(t) \frac{d^2 \delta(t)}{dt^2} + D \dot{\omega}_{p.u.}(t) \frac{d \delta(t)}{dt} = P_{m p.u.}(t) - P_{e p.u.}(t) \quad (19)$$

که در این معادله:

H : ثابت اینرسی ماشین بر حسب Joule/VA و یا Per Unit - Second

ω_s : سرعت زاویه ای سنکرون ماشین.

$\omega_{p.u.}(t)$: سرعت زاویه ای لحظه ای در مقیاس Per Unit

$\delta(t)$: زاویه الکتریکی لحظه ای روتور.

D : ضریب میرایی سیستم.

$P_{m p.u.}(t)$: توان مکانیکی لحظه ای ماشین در مقیاس Per Unit

$P_{e p.u.}(t)$: توان الکتریکی لحظه ای ماشین در مقیاس Per Unit می باشند.

معادله (۱۹)، معادله نوسان پریونیت نامیده می شود و این معادله معادله اصلی است که وضعیت دینامیکی روتور را در معادلات پایداری گذرا تعیین می کند.

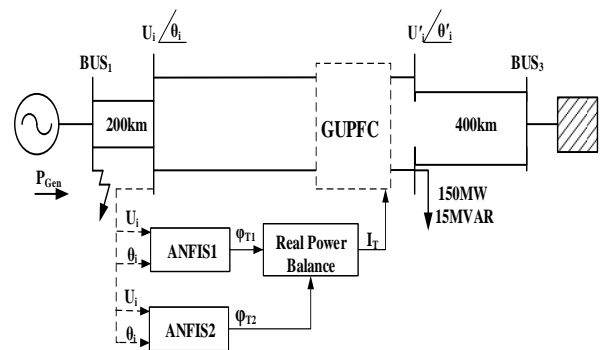
سرعت زاویه ای لحظه ای در حالت های گذرا در حدود سرعت

شکل ۱۱: توابع عضویت الف) ولتاژ ب) زاویه ولتاژ و ج) Φ_{T1} برای محاسبه Φ_{T2}

۵- شبیه سازی

۵-۱- سیستم تک ماشینه

یک سیستم تک ماشینه با GUPFC در شکل ۱۱ آورده شده است.

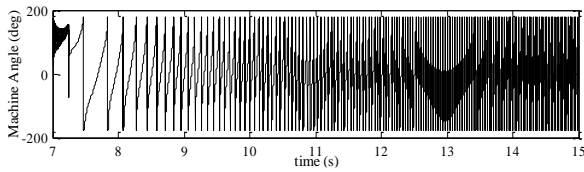


شکل ۱۲: یک سیستم تک ماشینه با GUPFC [۲]

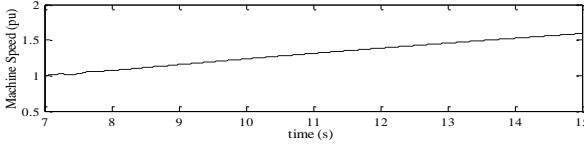
پارامترهای سیستم تک ماشینه در جدول ۱ آمده است .

جدول ۱: پارامترهای سیستم تک ماشینه

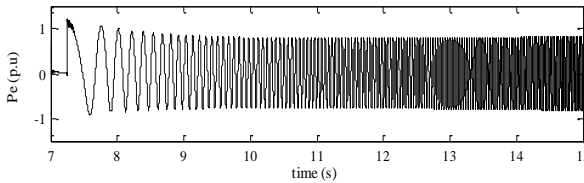
مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
-۰/۲۴۳	K_E	۳/۱۲	H (MJ/MVA)
۰/۹۵	T_E (sec)	۱/۰۱۴	X_d (p.u)



(الف)

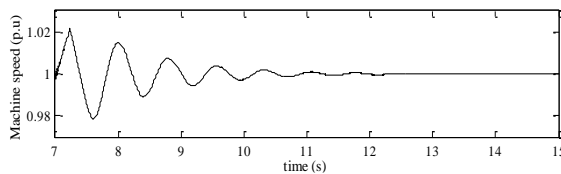


(ب)

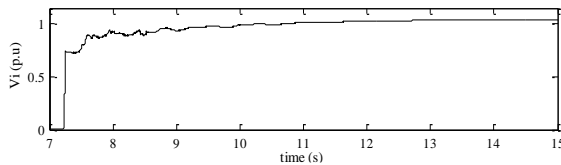


(ج)

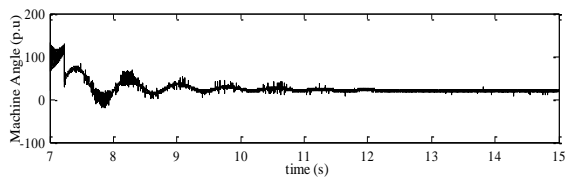
شکل ۱۳: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۴۰ میلی ثانیه در حالت بدون جبران



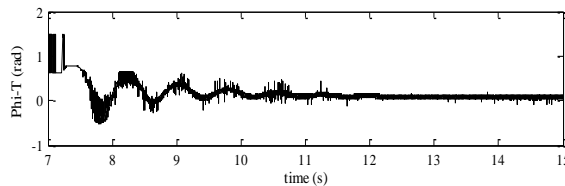
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۱۴: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۴۰ میلی ثانیه در حالت بدون جبران

سنکرون تغییر می کند، لذا تقریب $\omega_{p.u.}(t) = 1$ تقریبی مناسب است که به سادگی معادلات دینامیک سیستم کمک می کند. با توجه به تعریف سرعت زاویه ای لحظه ای روتور خواهیم داشت:

$$\frac{d\delta(t)}{dt} = \omega(t) - \omega_s \quad (20)$$

با جایگذاری این معادله در معادله (۱۹)، معادله نوسان به صورت معادله درجه اول زیر در می آید:

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d\omega(t)}{dt} = P_{m.p.u.}(t) - P_{e.p.u.}(t) - D\omega(t) \quad (21)$$

بررسی پایداری گذرا در طی نوسان اول صورت می گیرد و در طی این دوره، زمان بحرانی رفع خطا (CCT^2) ارزیابی می شود. منظور از زمان بحرانی رفع خطا آخرین فرصتی است که برای رفع اغتشاش روی داده در سیستم در دست است. بدیهی است در صورت ماندگاری خطا پس از این زمان، سیستم ناپایدار خواهد شد. برای یافتن زمان بحرانی رفع خطا، از روش مرحله به مرحله ۲ استفاده شده است. به این ترتیب که زمان خطا را به تدریج افزایش داده تا آخرین زمانی که پس از آن، سیستم ناپایدار خواهد شد به دست آید. خطای سه فاز که بدترین و معمول ترین خطا در سیستم های قدرت عملی است برای کلیه شبیه سازی ها در نظر گرفته شده است. مکان خطا در وسط خط L۲ در نظر گرفته شده است. با این روش زمان بحرانی رفع خطا برای سیستم SMIB در حالتی که هیچ جبران سازی انجام نشده، ۲۱۶ میلی ثانیه به دست آمده است.

حال روش فوق برای محاسبه ی زمان بحرانی رفع خطا مجدداً تکرار می شود با این تفاوت که GUPFC در شبکه جایگذاری شده است. با فرض اینکه GUPFC با حداکثر مقادیر نامی یعنی اندازه ی ولتاژ سری $0.4 p.u$ و اندازه ی جریان موازی $0.1 p.u$ در شبکه قرار گرفته باشد، زمان بحرانی رفع خطا ۲۹۵ میلی ثانیه به دست می آید که افزایشی حدود ۳۶٪ در CCT را نتیجه می دهد.

شکل (۱۲) سیستمی که با خطای سه فاز مواجه شده در حالی که GUPFC وظیفه ی جبران سازی را انجام نداده را نشان می دهد. نتایج با فرض اینکه خطا حدود ۲۴۰ میلی ثانیه به طول انجامیده باشد به دست آمده است. پس از استخراج نتایج، لحظه ی بروز خطا به صفر منتقل شده تا از تکرار شکل ها در حالت عملکرد دائم قبل از خطا جلوگیری شود.

با مقایسه GUPFC با دیگر ادوات FACTS در سیستم تک‌ماشینه، کارایی آن به اثبات رسیده است. با اعمال $I_q = 0$ ، به عبارت دیگر با حذف شاخه‌ی موازی، عملکرد GUPFC مشابه IPFC خواهد بود. در این حالت زمان بحرانی رفع خطا برای سیستم تک‌ماشینه، ۲۶۹ میلی‌ثانیه به دست آمده است. حال اگر $V_{T1} = 0$ و $V_{T2} = 0$ تنظیم گردد، به عبارت دیگر با حذف شاخه‌های سری، GUPFC مشابه STATCOM عمل می‌کند. در این حالت نیز زمان بحرانی رفع خطا ۲۴۳ میلی‌ثانیه می‌باشد. نتایج این بحث به همراه تنظیم مقادیر شاخه‌ی سری و موازی GUPFC در ۳ حالت در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲: مقایسه‌ی زمان بحرانی رفع خطا در حالت مختلف

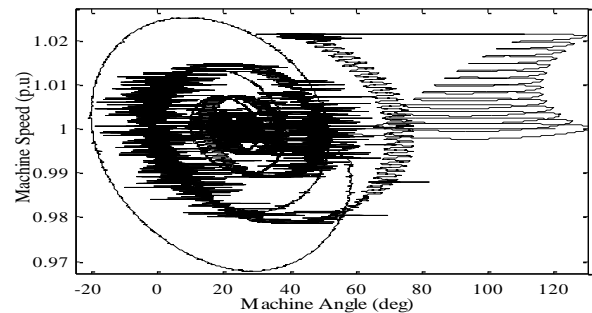
زمان بحران رفع خطا (ms)	I_q (p.u.)	V_{T2} (p.u.)	V_{T1} (p.u.)	
۲۱۶	۰	۰	۰	بدون جبران‌سازی
۲۸۱	۰٫۱	۰٫۲	۰٫۲	با وجود GUPFC
۲۹۲	۰٫۱	۰٫۳	۰٫۳	
۲۹۵	۰٫۱	۰٫۴	۰٫۴	
۲۴۶	۰٫۱	۰	۰٫۴	با وجود UPFC
۲۶۹	۰	۰٫۴	۰٫۴	با وجود IPFC
۲۴۳	۰٫۱	۰	۰	با وجود STATCOM

شکل زیر نیز نمایشی از مقایسه‌ی GUPFC با UPFC و IPFC است. زمان رفع خطا ۲۴۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته شده و منحنی نوسان ماشین برای هر سه ابزار استخراج شده است. با وجود اینکه با هر سه آن‌ها، سیستم پایدار شده (این در حالی است که ۲۴۰ میلی‌ثانیه بیش از زمان بحرانی رفع خطای سیستم بدون جبران است)، اما عملکرد بهتر GUPFC در همین شکل نیز قابل نتیجه‌گیری است؛ چرا که به دلیل پیک زاویه‌ی کوچکتر در نوسان اول از حاشیه‌ی پایداری بالاتری برخوردار است. از سوی دیگر پس از نوسان اول نیز به دلیل میرایی بهتر نوسانات از عملکرد بهتری برخوردار است.

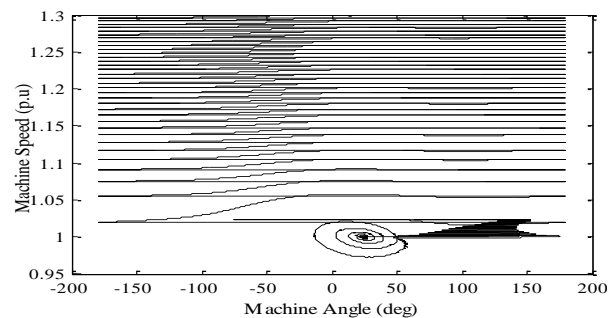
میلی‌ثانیه با جبران‌سازی با GUPFC

سری شکل‌های (۱۳) سیستم را بدون وجود GUPFC و شکل‌های (۱۴) با وجود GUPFC نشان می‌دهد. این شکل‌ها تأثیر GUPFC را در پایداری سیستم به اثبات می‌رساند.

تحلیل صفحه‌ی فازی، یک روش گرافیکی برای مطالعه‌ی سیستم‌های مرتبه‌ی دوم است. ایده‌ی اصلی این روش ایجاد مسیرهای حرکتی برحسب شرایط اولیه‌ی متفاوت در فضای حالت مرتبه‌ی دوم سیستم دینامیکی و سپس بررسی ویژگی‌های کیفی این مسیرهاست. به دلیل گرافیکی بودن، این روش ابزار مناسبی برای مشاهده‌ی رفتار سیستم فراهم می‌آورد. در شکل (۱۵) نمودار صفحه‌ی فاز سیستم در دو حالت با جبران‌ساز و بدون آن نمایش داده شده است. محور افقی زاویه‌ی ماشین و محور عمودی سرعت آن است. این اشکال نیز به وضوح توانایی GUPFC را در پایداری سیستم ناپایدار اثبات می‌نماید. در اینجا خروجی از لحظه‌ی پس از رفع خطا نشان داده شده است. از شکل قسمت (الف) همگرایی سیستم به نقطه کار اولیه پس از چند نوسان قابل مشاهده است. این در حالی است که در قسمت (ب) سیستم ناپایدار شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۱۵: نمودار صفحه فاز سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۴۰ میلی‌ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران (الف) با وجود GUPFC (ب) بدون GUPFC

H	۳۳/۶۴	۶/۴	۳/۰۱
X_d (p.u)	۰/۱۴۶۰	۰/۸۹۵۸	۱/۳۱۲۵
X'_d (p.u)	۰/۰۶۰۸	۰/۱۱۹۸	۰/۱۸۱۳
X_q (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۸۶۴۵	۱/۲۵۷۸
X'_q (p.u)	۰/۰۹۶۹	۰/۱۹۶۹	۰/۲۵
T_{do} (sec)	۸/۹۶	۶	۵/۸۹
T'_{qo} (sec)	۰	۰/۵۳۵	۰/۶
X_i (p.u)	۰/۰۳۳۶	۰/۰۵۲۱	۰/۰۷۴۲

توان مبنای سیستم ۱۰۰ MVA در نظر گرفته شده است. X_1 راکتانس نشی ژنراتور است.

برای مطالعه سیستم، ابتدا محاسبات پخش بار انجام می‌گیرد. همچنین بایستی در سه حالت ماتریس ادمیتانس شبکه محاسبه شود:

پیش از بروز اختلال

در طول اختلال

پس از اختلال

ماتریس‌های ادمیتانس کاهش یافته:

پیش از بروز اختلال در شبکه:

$$Y_{Rpf} = \begin{bmatrix} 0.8455 - 2.9883i & 0.2871 + 1.5129i & 0.2096 + 1.2256i \\ 0.2871 + 1.5129i & 0.4200 - 2.7239 & 0.2133 + 1.0879i \\ 0.2096 + 1.2256i & 0.2133 + 1.0879 & 0.2770 - 2.3681i \end{bmatrix} \quad (20)$$

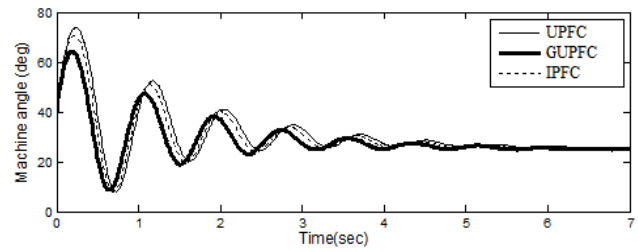
در طول اختلال:

$$Y_{Rdf} = \begin{bmatrix} 0.6568 - 3.8160i & 0 & 0.0701 + 0.6306i \\ 0 & 0 - 5.4855i & 0 \\ 0.0701 + 0.6306i & 0 & 0.1740 - 2.7959i \end{bmatrix} \quad (21)$$

پس از اختلال در شبکه:

$$Y_{Raf} = \begin{bmatrix} 1.1386 - 2.2966i & 0.1290 + 0.7063i & 0.1824 + 1.0637i \\ 0.1290 + 0.7063i & 0.3745 - 2.0151i & 0.1921 + 1.2067i \\ 0.1824 + 1.0637i & 0.1921 + 1.2067i & 0.2691 - 2.3516i \end{bmatrix} \quad (22)$$

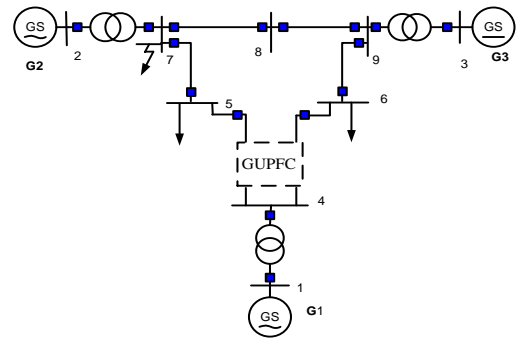
توصیف رفتار گذرای سیستم با بیان زوایای روتور ژنراتور برحسب



شکل ۱۶: مقایسه‌ی GUPFC با UPFC و IPFC در صورت اتصال کوتاهی به طول ۲۴۰ میلی‌ثانیه

۲-۵-۲- شبیه‌سازی سیستم چندماشینه

سیستم چند ماشینه‌ی انتخابی، سیستم ۹ باس، ۳ ماشین IEEE است که در شکل ۱۷ نمایش داده شده است. در سیستم چند ماشینه کلیه‌ی شین‌ها به‌غیر از شین‌های ژنراتورها حذف و سیستم کاهش داده می‌شود.



شکل ۱۷: سیستم ۹ باس IEEE [۲۷]

برای شبیه‌سازی جهت ساده‌سازی از مدل کلاسیک برای ژنراتورها، ادمیتانس ثابت برای بارها و توان‌های ورودی ثابت استفاده شده است.

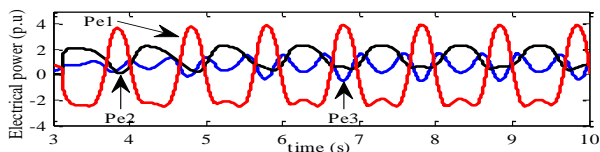
پارامترهای سیستم چندماشینه در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: پارامترهای سیستم چندماشینه

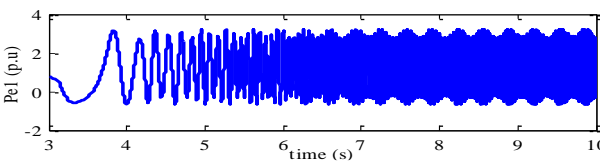
شماره‌ی ژنراتور	۱	۲	۳
نوع	آبی	بخار	بخار
توان نامی (MVA)	۲۴۷/۵	۱۹۲	۱۲۸
ولتاژ نامی (kV)	۱۶/۵	۱۸	۱۳/۸
ضریب توان	۱	۰/۸۵	۰/۸۵
سرعت (r/min)	۱۸۰	۳۶۰۰	۳۶۰۰

در قسمت قبل توضیح داده شد، با تغییر ماتریس ادمیتانس و محاسبه‌ی آن در سه بازه‌ی زمانی و بالطبع تغییرات توان مدل‌سازی می‌گردد. برای مطالعه‌ی GUPFC در شبکه، تأثیر آن مستقیماً بر توان‌های شبکه در نظر گرفته شده است. به این صورت که توان حقیقی تزریق شده توسط GUPFC بر توان‌های الکتریکی ژنراتورها تأثیر (به‌طور مستقیم به ژنراتوری که به آن متصل است، یعنی ژنراتور ۱ و غیرمستقیم بر دیگر ژنراتورها) و در نهایت بهبود عملکرد حاصل می‌گردد.

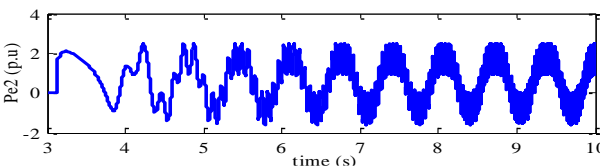
با در نظر گرفتن مقدار $0.2p.u.$ برای دامنه‌ی ولتاژ شاخه‌های سری و جریان $0.1p.u.$ برای شاخه‌ی موازی GUPFC، زمان بحرانی رفع خطا به 149 میلی‌ثانیه می‌رسد که حدود 27% افزایش CCT را نتیجه می‌دهد. برای مقایسه‌ی سیستمی که با خطایی با مدت‌زمان 149 میلی‌ثانیه مواجه شده در دو حالت با جبران‌سازی و بدون جبران‌سازی، متغیرهای سیستم در شکل (۱۹) آمده است. در اینجا نیز مشابه حالت تک ماشینه فرض شده است که سیستم به حالت ماندگار رسیده، سپس خطا اتفاق افتاده است. اما در ترسیم نتایج لحظه‌ی بروز خطا به صفر منتقل شده تا از تکرار حالت ماندگار جلوگیری به عمل آید.



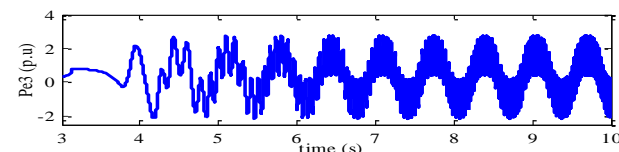
(الف)



(ب)



(ج)

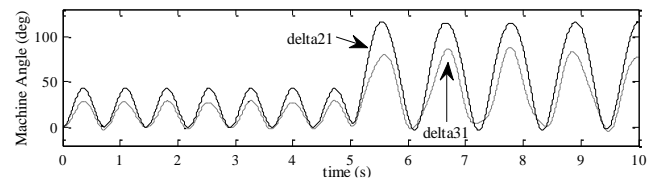


(د)

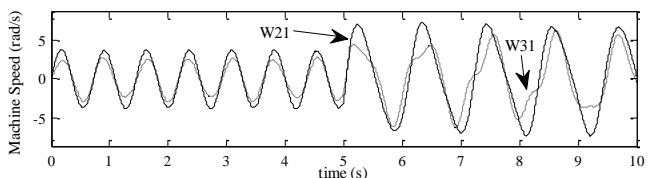
مرکز لختی کلیه‌ی ژنراتورها راحت‌تر است. به دلیل اینکه ژنراتور ۱ بزرگترین ژنراتور شبکه است می‌توان با دقت بسیار خوبی δ_{COA} را با δ_1 تقریب زد. بنابراین ژنراتور ۱ به‌عنوان ژنراتور مرجع انتخاب و متغیرهای δ و ω نسبت به آن سنجیده می‌شوند.

۵-۲-۱ عملکرد سیستم در صورت وقوع اختلال

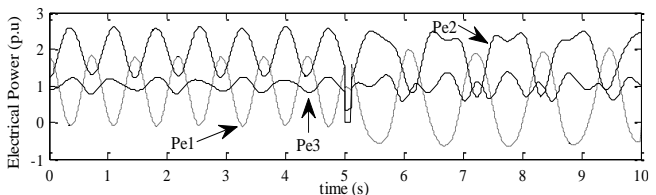
همانند حالت تک‌ماشینه با اعمال خطای سه‌فاز به سیستم که محل آن در شکل (۱۵) مشخص شده، با افزایش تدریجی مدت زمان خطا، زمان بحرانی رفع خطا محاسبه می‌شود. برای سیستم بدون جبران این زمان 117 میلی‌ثانیه به‌دست می‌آید. متغیرهای سیستم با فرض اعمال خطایی به مدت 110 میلی‌ثانیه در شکل (۱۸) آمده است. در اینجا رفع خطا با خارج شدن خط از شبکه همراه بوده، از این‌رو هم نوسانات پس از خطا و هم ماتریس ادمیتانس پس از خطا با پیش از آن متفاوت است.



(الف)



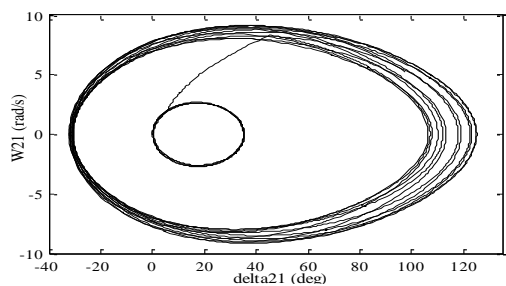
(ب)



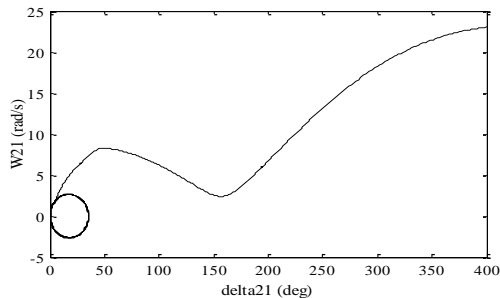
(ج)

شکل ۱۸: متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول 110 میلی‌ثانیه بدون جبران‌سازی

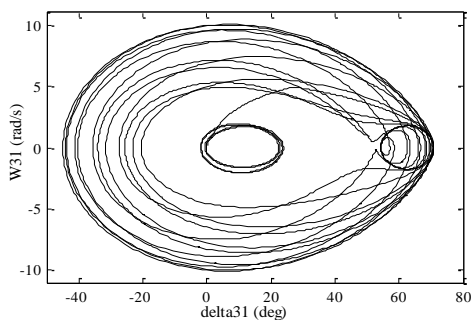
هنگامی که با به‌کارگیری GUPFC با هدف بهبود پایداری گذرا سیستم جبران‌سازی می‌شود بایستی تأثیر آن به‌گونه‌ای مدل‌سازی شود. بنابراین بر روی سیستم اصلی ۲ تغییر اتفاق می‌افتد؛ یکی بروز خطا و دیگری وارد شبکه شدن GUPFC. مورد اول همان‌طور که



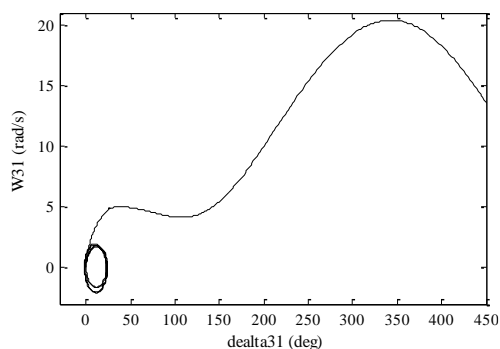
(الف)



(ب)



(ج)

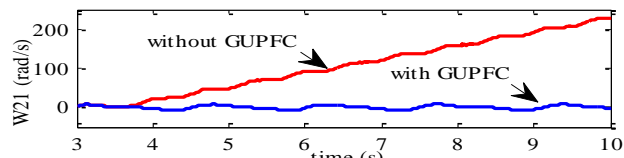


(د)

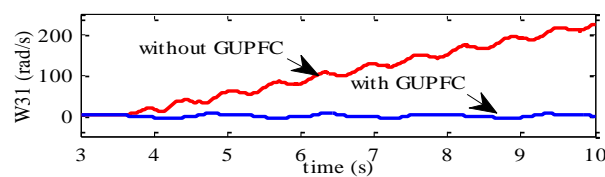
شکل ۲۱: نمودار صفحه فاز. (الف) و (ج) با جبران GUPFC (ب) و (د) بدون جبران

در شکل (۲۱) نمودار صفحه‌ی فاز سیستم در دو حالت با جبران‌ساز و بدون آن نمایش داده شده است. محور افقی زاویه‌ی ماشین و محور عمودی سرعت آن است. این اشکال نیز به‌وضوح توانایی GUPFC را در پایدارسازی سیستم ناپایدار اثبات می‌نماید. در اینجا خروجی از لحظه‌ی پس از رفع خطا نشان داده شده است. از شکل

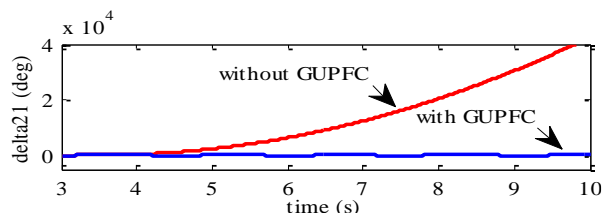
شکل ۱۹: مقایسه‌ی متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۱۴۹ میلی ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران (الف): توان ژنراتور ها با حضور GUPFC، (ب) (ج) و (د) توان ژنراتورها بدون حضور GUPFC



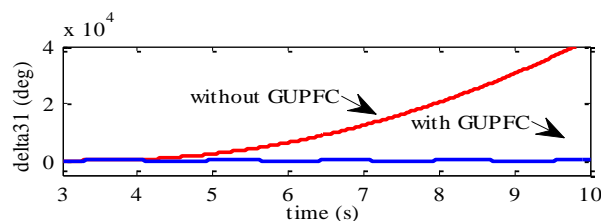
(الف)



(ب)



(ج)

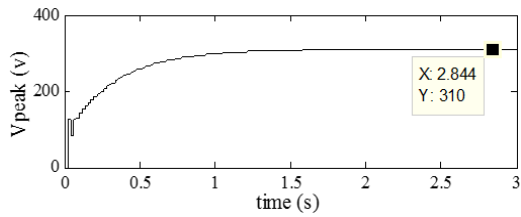


(د)

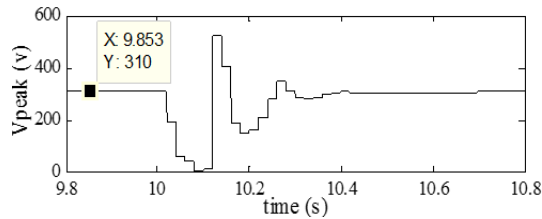
شکل ۲۰: مقایسه‌ی متغیرهای سیستم در صورت اتصال کوتاهی به طول ۱۴۹ میلی ثانیه در دو حالت با جبران و بدون جبران

شکل (۲۰) نیز به‌وضوح پایداری سیستم با جبران‌سازی را نسبت به بدون جبران نشان می‌دهد.

تثبیت ولتاژ با اتصال کوتاه سه فاز در لحظه اول و شکل (ب) تثبیت ولتاژ پس از اتصال کوتاه سه فاز در ثانیه دهم است.



(الف)



(ب)

شکل ۲۳: ولتاژ لینک DC (الف) تثبیت ولتاژ با اتصال کوتاه سه فاز در لحظه اول و (ب) تثبیت ولتاژ پس از اتصال کوتاه سه فاز در ثانیه دهم

همچنین در انتها با مقایسه GUPFC با دیگر ادوات FACTS در سیستم چند ماشینه، کارایی آن به اثبات رسیده است. با اعمال $I_q = 0$ ، به عبارت دیگر با حذف شاخه ی موازی، عملکرد GUPFC مشابه IPFC خواهد بود. در این حالت زمان بحرانی رفع خطا برای سیستم چندماشینه، ۱۳۹ میلی ثانیه به دست آمده است. حال اگر $V_{T1} = 0$ و $V_{T2} = 0$ تنظیم گردد، به عبارت دیگر با حذف شاخه های سری، GUPFC مشابه STATCOM عمل می کند. در این حالت نیز زمان بحرانی رفع خطا ۱۲۴ میلی ثانیه می باشد. نتایج این بحث به همراه تنظیم مقادیر شاخه ی سری و موازی GUPFC در ۳ حالت در جدول ۵ خلاصه شده است.

جدول ۵: مقایسه ی زمان بحرانی رفع خطا در حالت مختلف

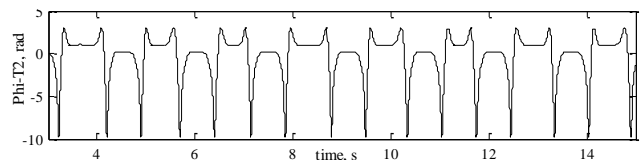
	V_{T1} (p.u)	V_{T2} (p.u)	I_q (p.u)	زمان بحرانی رفع خطا (ms)
بدون جبران سازی	۰	۰	۰	۱۱۷
با وجود GUPFC	۰/۲	۰/۲	۰/۱	۱۴۹
	۰/۳	۰/۳	۰/۱	۱۶۴

قسمت (الف) همگرایی سیستم به نقطه کار اولیه پس از چند نوسان قابل مشاهده است. این در حالی است که قسمت (ب) سیستم ناپایدار شده است. در صورت افزایش دامنه ی ولتاژ شاخه ی سری، افزایش بیشتری در CCT حاصل خواهد شد که نتایج در جدول ۴ خلاصه شده است. در همه ی حالت ها جریان شاخه ی موازی ۰/۱ p.u در نظر گرفته شده است.

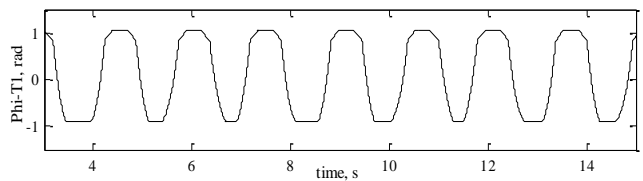
جدول ۴: مقایسه ی زمان بحرانی رفع خطا در حالات مختلف برای سیستم چندماشینه

V_{T1} (p.u) And V_{T2} (p.u)	CCT(ms)	میزان افزایش (%)
۰/۲	۱۴۹	۲۷/۳
۰/۳	۱۶۴	۴۱
۰/۴	۱۸۳	۵۶

روش کنترل GUPFC برای سیستم چند ماشینه نیز دقیقاً مانند تک ماشینه در نظر گرفته شده است تا کارایی آن برای سیستم چند ماشینه نیز اثبات گردد. به دلیل یکسان بودن روش از تکرار آن خودداری می شود. خروجی کنترل کننده که همان زاویه ی ولتاژ شاخه های سری GUPFC است در شکل (۲۲) نمایش داده شده است.



(الف)



(ب)

شکل ۲۲: زاویه ی ولتاژ شاخه های سری

به این ترتیب با توجه به بهبود قابل توجه زمان خطای بحرانی در سیستم چندماشینه، کارایی روش پیشنهادی اثبات می گردد. ولتاژ لینک DC بر اساس شکل (۲۳) تثبیت می شود. شکل (الف)

منابع:

- [1] B. Fardanesh; B. Shperling; E. Uzunovic; S. Zelingher; "Multi-converter FACTS devices: the generalized unified power flow controller (GUPFC)" 2000 Power Engineering Society Summer Meeting (Cat. No.00CH37134) Year: 2000, Volume: 2 Pages: 1020 - 1025 vol. 2
- [2] X. -P. Zhang; E. Handschin; M. Yao. "Modeling of the generalized unified power flow controller (GUPFC) in a nonlinear interior point OPF/PICA". 2001 Innovative Computing for Power - Electric Energy Meets the Market. 22nd IEEE Power Engineering Society. International Conference on Power Industry Computer Applications (Cat.No.01CH37195) Year: 2001 Pages: 283 - 286
- [3] Lin Sun; Shengwei Mei; Qiang Lu; Jin Ma. "Application of GUPFC in China's Sichuan power grid - modeling, control strategy and case study" 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting (IEEE Cat. No.03CH37491) Year: 2003, Volume: 1 Pages: 175 - 181 Vol. 1
- [4] X. -P. Zhang. "Modeling of the interline power flow controller and the generalised unified power flow controller in Newton power flow" IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution Year: 2003, Volume: 150, Issue: 3 Pages: 268 - 274
- [5] V. Azbe; R. Mihalic. "Damping of power-system oscillations with the application of a GUPFC" 2009 IEEE Bucharest Power Tech Year: 2009 Pages: 1 - 6
- [6] Ashwani Kumar; Charan Sekhar. "Congestion management based on demand management and impact of GUPFC" 2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation Year: 2012 Pages: 1 - 6
- [7] J. Brochu; P. Pelletier; F. Beaugard; G. Morin. "The interphase power controller: a new concept for managing power flow within AC networks" IEEE Transactions on Power Delivery Year: 1994, Volume: 9, Issue: 2 Pages: 833 - 841
- [8] Rakhmad Syafutra Lubis; Sasongko Pramono Hadi; Tumiran. "Modeling of the generalized unified power flow controller for optimal power flow" Proceedings of the 2011 International Conference on Electrical Engineering and Informatics Year: 2011 Pages: 1-6
- [9] Rakhmad Syafutra Lubis. "Modeling and simulation of generalized unified power flow controller (GUPFC)" 2011 2nd International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering Year: 2011 Pages: 207 - 213
- [10] Ashwani Kumar. "Comparison of IPFC and GUPFC for congestion management in deregulated electricity markets" 2014 9th International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS) Year: 2014 Pages: 1 - 7
- [11] Rakhmad Syafutra Lubis, Sasongko Pramono Hadi and Tumiran. "Using the UPFC and GUPFC Controllers to Maximize Available Transfer Capability (ATC)", International Journal on Electrical Engineering and Informatics - Volume 6, Number 2, June 2014
- [12] J. G. Singh, P. Teripathy, S. N. Singh and S. C. Srivastava; "Development of a fuzzy rule based generalized unified power flow

	۰/۴	۰/۴	۰/۱	۱۸۳
باوجود IPFC	۰/۴	۰	۰/۱	۱۳۹
باوجود UPFC	۰/۴	۰/۴	۰	۱۳۱
باوجود STATCOM	۰	۰	۰/۱	۱۲۴

نتایج فوق برتری GUPFC نسبت به UPFC و IPFC را اثبات می نماید که نتیجه ای کاملاً منطقی و قابل انتظار می باشد؛ چرا که UPFC و IPFC هر کدام یکی از کانورترهای GUPFC را دارند، در حالی که GUPFC هر دو کانورتر UPFC و IPFC را در درون خود داراست.

شایان ذکر است روش کنترل همه ادوات FACTS مورد استفاده از روش عصبی فازی می باشد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله بهبود پایداری گذرا با استفاده از GUPFC با کنترل کننده ANFIS مورد بررسی قرار گرفته است. GUPFC در مقایسه با سایر ادوات FACTS تأثیر بیشتری بر پایداری گذرا سیستم قدرت دارد زیرا شامل دو شاخه سری و یک شاخه موازی می باشد. در سیستم تک ماشین، زمانی که GUPFC استفاده می شود، CCT در حدود ۳۶ درصد بهبود می یابد.

اعمال روش پیشنهادی بر روی شبکه ۹ باسه نشان داد در صورتی که GUPFC با بیشترین توان وارد شبکه شود، افزایش حدود ۵۶ درصدی در زمان بحرانی رفع خطا خواهد شد که می توان از آن به عنوان تأثیری شگرف یاد کرد. به این ترتیب نیل به هدف بهبود پایداری گذرا با به کارگیری GUPFC با کنترل کننده عصبی- فازی و با تکیه بر روش تابع انرژی صورت پذیرفت.

- [21] H. Abootorabi Zarchi; E. Daryabeigi; Gh. R. Arab Markadeh; J. Soltani. "Emotional controller (BELBIC) based DTC for encoder less Synchronous Reluctance Motor drives" 2011 2nd Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference Year: 2011 Pages: 478 – 483
- [22] E. Daryabeigi; H. Sadeghi; G. R. Arab Markadeh; C. Lucas. "Speed control of brushless DC motors using emotional intelligent controller". IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society Year: 2010 Pages: 2920 – 2925
- [23] E. Daryabeigi; Gh. Arab markadeh; C. Lucas. "Simultaneously, speed and flux control of an induction motor, with brain emotional learning based intelligent controller (BELBIC)". 2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Year: 2009 Pages: 894 – 901
- [24] Ahmed M. El-Garhy, Mohamed E. El-Shimy. "BELBIC for MRAS with highly non-linear process". Alexandria Engineering Journal. Volume 54, Issue 1, March 2015, Pages 7–16
- [25] M. Sobha, R. S. kumar, S. George, "ANFIS based UPFC supplementary controller for damping low frequency oscillations in power systems", JES 2007 on-line: <http://journal.esrgroups.org/jes/>
- [26] S. M. Sadeghzadeh, M. Ansarian, "Transient Stability Improvement with Neuro- Fuzzy Control of FACTS Devices", 1st International Power and Energy Conf. PEC on 2006, pp. 297-302, Nov. 2006.
- [27] V. Azbe, U. Gabrijel, D. Povh, R. Mihalic, "The Energy Function of a General Multi machine System With a Unified Power Flow Controller", IEEE Trans. Power Systems, Vol. 20, No. 3, August 2005.
- [28] M. Chamia, "Thyristor- Controlled Series Capacitor Design and Field Test", EPRI Flexible AC Transmission System (FACTS) Conf., May 2013.
- [29] Th. V. Cutsem, M. Ribbens-Pavella, "Structure preserving direct methods for transient stability analysis of power systems", Proc. 24th Conf. on Decision and Control, pp 70-77, Dec. 2013.
- controller", EUROPEAN TRANSACTIONS ON ELECTRICAL POWER Euro. Trans. Electr. Power 2009; 19:702–717
- [13] V. Azbe; R. Mihalic. "Damping of power-system oscillations with the application of a GUPFC" 2009 IEEE Bucharest Power Tech Year: 2009 Pages: 1 – 6
- [14] D. Raja Reddy, Dr. B. Venkata Prasanth. "Comparison Of Distributed Power-Flow Controller (DPFC) And Generalized Unified Power Flow Controller (GUPFC) In Power Quality Improvement". INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN ELECTRICAL, ELECTRONICS, INSTRUMENTATION AND CONTROL ENGINEERING Vol. 3, Issue 4, April 2015
- [15] D.B. Valle, P.B. Araujo. "The influence of GUPFC FACTS device on small signal stability of the electrical power systems". Electrical Power and Energy Systems 65 (2015) 299–306
- [16] Ehsan jafari, Ali Marjanian, Soodabeh Solaymani and Ghazanfar Shahgholian. "Designing an Emotional Intelligent Controller for IPFC to Improve the Transient Stability Based on energy Function". J Electr Eng Technol Vol. 8, No. 3: 478-489, 2013
- [17] Ali Marjanian, Ehsan Jafari and Hasan Barati. "Designing of a TEF-based neuro-fuzzy controller for IPFC to improve the transient stability". Euro. Trans. Electr. Power (2012)
- [18] Thanh Long Vu; Konstantin Turitsyn. "Lyapunov Functions Family Approach to Transient Stability Assessment" IEEE Transactions on Power Systems Year: 2016, Volume: 31, Issue: 2 Pages: 1269–1277
- [19] M. H. E-Saify, A. M. El-Garhy and G. A. El-Sheikh. "Brain Emotional Learning Based Intelligent Decoupler for Nonlinear Multi-Input Multi-Output Distillation Columns". Mathematical Problems in Engineering Volume 2017
- [20] R. M. Milasi; C. Lucas; B. N. Araabi. "Intelligent modeling and control of washing machine using LLNF modeling and modified BELBIC" 2005 International Conference on Control and Automation Year: 2005, Volume: 2 Pages: 812 - 817 Vol. 2