

نقش جبران‌ساز ترکیبی در بهبود انتقال انرژی سیستم‌های قدرت با استفاده از روشهای کنترل فازی و کنترل فازی - عصبی تطبیقی

روشنک رضائی پور^{۱*}، مهدی صبری^۲، احد کاظمی^۳

^۱ گروه برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران؛ rezaeipour@iaut.ac.ir

^۲ گروه برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران؛ stu.mahdi.sabri@iaut.ac.ir

^۳ گروه برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران؛ kazemi@iust.ac.ir

چکیده

با ورود جبران‌سازهای ترکیبی امکان بهبود انتقال انرژی با کمترین هزینه سرمایه‌گذاری و نیز کنترل سریع مشکلات سیستم قدرت فراهم شده است. در این مقاله از روش هوشمند مینی بر کنترل کننده فازی - عصبی تطبیقی (ANFIS) برای کنترل عنصر ترکیبی جدید تحت عنوان کنترل کننده ترکیبی توان چرخشی برای کنترل متغیرهای این عنصر استفاده می‌شود. روش کنترلی پیشنهادی، با در نظر گرفتن هزینه سوخت کل، تلفات توان و بارپذیری سیستم به عنوان توابع هدف در یک سیستم استاندارد ۱۴ شینه IEEE، با استفاده از نرم افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌شود. به منظور بررسی کارایی روش مورد نظر در کنترل کننده ترکیبی توان چرخشی، نتایج شبیه سازی بدست آمده برای دو حالت هوشمند (فازی تنها و فازی-عصبی تطبیقی) با نتایج مدل تریقی توان به همراه پخش بار بهینه (OPF) از لحاظ اقتصادی و فنی مقایسه می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی، نقش موثر روش هوشمند را در کنترل توان سیستم‌های قدرت نشان می‌دهد.

کلید واژه

کنترل کننده ترکیبی توان چرخشی، Fuzzy ANFIS، پخش بار بهینه

مقدمه

شونده تریستوری (TSSC) که به آن کنترل کننده ترکیبی توان (HFC) گفته می‌شود [۴] و (ب) ترکیب UPFC و PST که به آن کنترل کننده بهینه یکپارچه توان (OUPFC) گفته می‌شود [۵] می‌باشد. با توجه به اینکه جابجاگر فاز موجود در HFC در حالت دینامیکی عملکردی ندارد لذا می‌توان آن را با یک ترانسفورماتور جابجاگر فاز چرخشی (RPST) جایگزین نمود. این عنصر جدید FACTS تحت عنوان کنترل کننده ترکیبی توان چرخشی (RHFC) در سال ۲۰۱۱ معرفی شده است [۶ و ۷]. تحقیقات در مورد استفاده از روش های هوشمند برای کنترل ادوات FACTS

یکی از ضروریات شبکه های قدرت، انتقال توان با کمترین تلفات ممکن و همچنین کنترل توان انتقالی در خطوط مختلف برای بهبود پایداری سیستم می‌باشد. رسیدن به این هدف نیازمند برنامه ریزی و عملکرد مناسب در سیستم قدرت است [۱]. با استفاده از ادوات FACTS این امکان فراهم می‌شود که توان‌های عبوری از خطوط انتقال انرژی را تا حد زیادی تحت کنترل در آورد [۲ و ۳]. تحقیقات گسترده‌ای بر روی این عناصر انجام شده و تاکنون ادوات مختلفی معرفی شده است. ساختارهای جدید ادوات FACTS ترکیبی شامل: (الف) ترکیب PST و خازن سری سوئیچ

¹ Thyristor Switched Series Capacitor

² Hybrid Flow Controller

³ Optimal Unified Power Flow Controller

⁴ Rotary Phase Shifting Transformer

⁵ Rotary Hybrid Flow Controller

ساختار RHFC

RHFC از نظر ساختار ترکیبی از کنترل کننده های توان موجود بشرح زیر است:

- الف- یک ترانسفورماتور جابجاگر فاز چرخشی (RPST) که می تواند ولتاژی عمودی به صورت پیش فاز/پس فاز تزریق نماید.
- ب- چندین مازول اتصال خازن سری سوئیچ شونده تریستوری (TSSC) که یک راکتانس خازنی سری متغیر به صورت مراحل گسسته و برای تنظیم راکتانس سری خط اضافه می نماید.
- ج- چندین مازول اتصال راکتور سری سوئیچ شونده تریستوری (TSSR) که یک راکتانس سلفی سری متغیر به صورت مراحل گسسته و به منظور جلوگیری از اضافه بار اضافه می نماید.
- د- یک خازن موازی با کلیدهای مکانیکی (MSC) برای جبران توان راکتیو.

MSC به علت ثابت زمانی زیاد فقط بر توان عبوری حالت ماندگار مؤثر است، در صورتی که مازول های TSSC و TSSR و همچنین RPST می توانند هر دو توان عبوری حالت ماندگار و دینامیکی را کنترل نمایند [۱۴]. سیستم های TSSC، TSSR یک RHFC بصورت الکترونیکی سوئیچ شده و به اندازه کافی جهت پاسخ به دینامیک های سیستم و مهیا نمودن کنترل توان دینامیکی، سریع می باشند.

ساختار RHFC در شکل ۱ نشان داده شده است [۶]. RPST بخش اصلی RHFC است که به نظر می رسد عملکرد دینامیکی RHFC را بهبود می دهد و همچنین ناحیه کنترلی آن را گسترش می دهد، چرا که امکان کنترل پیوسته فاز ولتاژ تزریق شده فراهم می شود، بعلاوه پاسخ جابجاگر فاز چرخشی از جابجاگر فاز معمولی سریع تر است.

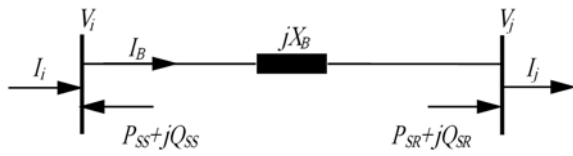
همانطور که در شکل ۲ نشان داده شده است، RPST مانند ماشین القایی، دارای روتور و استاتور با سیم پیچ های سه فاز، که نسبت به هم α درجه جابجایی دارند، می باشد. نکته قابل توجه این است که هرچه تعداد قطب های ماشین بیشتر باشد، با چرخش کمتر روتور می توان کنترل بیشتری روی انتقال توان اعمال کرد.

به دو بخش عمده تقسیم می شوند: بخش اول استفاده از روش های کنترل هوشمند در مدار الکترونیک قدرت ادوات FACTS می باشد و بیشتر کنترل زوایای آتش و هدایت تریستورها و یا مبدل های استاتیکی را در بر می گیرد. بخش دوم مربوط به پیاده سازی روش هوشمند در مدل پخش بار سیستم های قدرت است. اعمال این روش پس از آن که معادلات و محاسبات مربوط به ادوات FACTS در پخش بار سیستم وارد شد انجام می گیرد. به عبارت دیگر، کنترل عنصر FACTS بصورت مستقیم توسط کنترلر هوشمند صورت نمی گیرد و در واقع سیستم قدرت دارای عنصر FACTS در مدل پخش بار، بصورت کلی وارد می شود و سپس مدل پخش بار به صورت هوشمند کنترل می شود. مدل تزریق توان این امکان را بوجود می آورد تا پارامترهای کنترلی ادوات FACTS علاوه بر وارد شدن به محاسبات پخش بار سیستم قدرت، به صورت مستقیم توسط کنترلر هوشمند کنترل گردند، که در این مقاله این روش هدف اصلی می باشد. در سه دهه اخیر، از روش هوشمند منطق فازی برای حل مسائل مختلف سیستم قدرت نظیر قابلیت اطمینان، امنیت، پایداری و برنامه ریزی سیستم استفاده شده است [۸ و ۹]. در [۱۰] هدف اصلی از کاربرد تئوری مجموعه های فازی توسعه و گسترش پارامترهای ورودی مدل پخش بار سیستم قدرت است. در مرجع [۱۱] در حل مساله پخش بار به طور سریع، منطق فازی به کار رفته است که روش پخش بار فازی پیشنهادی در این مرجع نیاز به پاسخ تکراری مجموعه معادلات پخش بار از طریق کنترل منطق فازی به جای بکار بردن روش نیوتن-رافسون کلاسیک دارد. در [۱۲] و [۱۳] کنترل کننده تطبیقی PID فازی مبتنی بر شبکه عصبی برای ادوات FACTS طراحی می شود.

در این مقاله، طراحی کنترل کننده فازی-عصبی تطبیقی (ANFIS) و روش فازی با در نظر گرفتن هزینه سوخت کل، تلفات توان و بارپذیری سیستم به عنوان توابع هدف در یک سیستم استاندارد ۱۴ شینه IEEE، با استفاده از نرم افزار MATLAB انجام می گیرد. روش فازی می تواند به عنوان یک ابزار، در بهبود ارتباط روابط پیچیده ریاضی و دانش انسانی نقش موثری در بهبود متغیرهای RHFC به صورت مستقیم داشته باشد که از مزایای این روش به شمار می رود.

به منظور بررسی کارایی روش مورد نظر، نتایج شبیه سازی بدست آمده با نتایج مدل OPF در مرجع [۱۴] از لحاظ فنی و اقتصادی مقایسه می گردد.

⁶ Adaptive Nero-Fuzzy Inference System



شکل ۳. مدل تزریق توان RHFC

معادلات بدست آمده در مرجع [۶] برای مدل سازی تزریق

توان، بصورت زیر می باشد:

$$P_{SS} = \frac{|V_i| |V_j|}{X_{ij}} \left(-(1+k \cos \beta) \sin(\theta_i - \theta_j) - k \sin \beta \cos(\theta_i - \theta_j) \right) \quad (2)$$

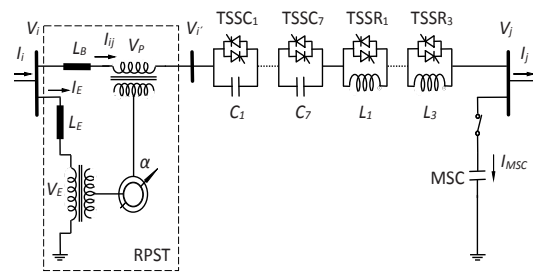
$$Q_{SS} = \frac{|V_i|}{X_{ij}} \left(|V_j| (1+k \cos \beta) \cos(\theta_i - \theta_j) + \frac{|V_i| |V_j|}{X_B} \sin(\theta_i - \theta_j) \right) \quad (3)$$

$$+ \frac{|V_i|}{X_{ij}} \left(-k \sin \beta |V_j| \sin(\theta_i - \theta_j) \right) - \frac{|V_i|}{X_{ij}} \left(|V_i| (1+2k \cos \beta + k^2) + \frac{|V_i|}{X_B} \left(|V_i| - |V_j| \cos(\theta_i - \theta_j) \right) \right)$$

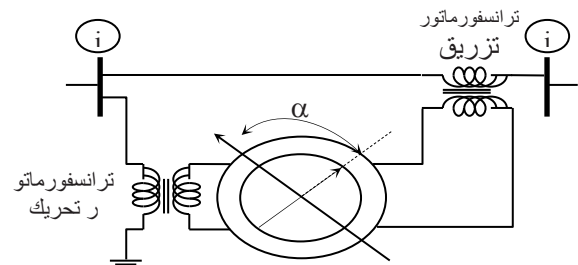
با توجه به شکل ۳، ولتاژ تزریق شده توسط ترانسفورماتور تزریق عمود بر ولتاژ ترانسفورماتور تحریک است. همچنین، در اثر تزریق ولتاژ، فقط زاویه فاز ولتاژ شین تحت تاثیر قرار می گیرد. با استفاده از معادلات ولتاژ کیرشهف، جریان تزریقی به شین i محاسبه می گردد. جریان تزریقی نیز توان مختلط SSS را به شین i تزریق می کند که به ترتیب شامل توان اکتیو و راکتیو تزریقی هست که در معادلات ۲ و ۳ آورده شده است.

$$P_{SR} = -P_{SS} \quad (4)$$

$$Q_{SR} = \frac{|V_j|}{X_{ij}} \left(|V_i| (1+k \cos \beta) \cos(\theta_i - \theta_j) + \frac{|V_j|}{X_{ij}} \left(-k \sin \beta |V_i| \sin(\theta_i - \theta_j) - |V_j| \right) + \frac{|V_j|}{X_B} \left(|V_j| - |V_i| \cos(\theta_i - \theta_j) \right) + \frac{|V_j|^2}{X_{MSC}} \right) \quad (5)$$



شکل ۱. ساختار RHFC



شکل ۲. جایگزین فاز چرخشی

رابطه بین ولتاژهای استاتور و روتور به صورت زیر است:

$$u_s = u_r e^{j\alpha} \quad (1)$$

که در آن $\alpha = \alpha_{elec} = p\alpha_{mech}$ و p تعداد قطبهای ماشین است.

مدل تزریق توان RHFC

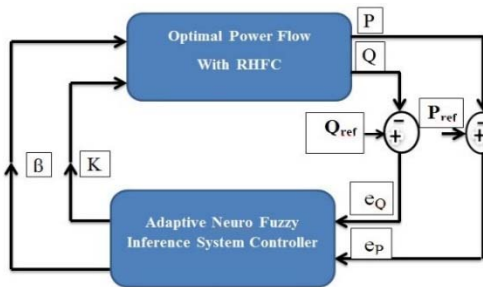
در این بخش مدل تزریق توان RHFC جهت استفاده در پخش بار بهینه بحث می شود. به طور کلی اگر یک عنصر RHFC در خطی بین دو شین i و j با امپدانس Z_{ij} قرار داشته باشد، مدل تزریق توان آن مطابق شکل ۳ خواهد بود. در بعضی موارد برای استخراج مدل تزریق توان اثر امپدانس خط را در توان های تزریقی وارد می کنند و لذا ارتباط بین دو شین قطع می شود. این موضوع باعث می شود که ماتریس ادmittانس پیچیده تر شود. در شبکه های بزرگ که ماتریس ادmittانس به خودی خود دارای عناصر صفر زیادی است ممکن است محاسبات ریاضی مشکل تر شود. از طرفی با حذف خط بین دو شین باید ماتریس ادmittانس نیز اصلاح شود. در نتیجه استفاده از مدل تزریق توان نه تنها موجب سهولت در پیاده سازی برنامه پخش بار بهینه می شود، بلکه تقارن ماتریس ادmittانس شبکه نیز حفظ می شود [۱۴ و ۱۶]. قابل ذکر است، که مدل تزریق توان و استخراج روابط مربوط به آن، برای مطالعات استاتیکی در همه ی جبرانسازها ضروری است.

جریان ترانسفورماتور تحریک از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_E = k e^{-j\beta} I_{ij} \quad (11)$$

$$k = T_{sh} T_{rt} T_{se} \quad (12)$$

$$\beta = \gamma + \sigma + \alpha \quad (13)$$



شکل ۴. استراتژی کنترل پیشنهادی RHFC با استفاده از کنترل کننده ANFIS

$$K_{MIN} \leq K \leq K_{MAX} \quad (14)$$

$$-\pi \leq \beta \leq \pi \quad (15)$$

در واقع نسبت تبدیل ولتاژ و زاویه شیفت فاز دو متغیر کنترل می باشند که برای اعمال محدودیت برای کنترل پخش بار سیستم قدرت وارد محاسبات پخش بار می شوند [۶]. اما در این تحقیق، پارامترهای K و β به عنوان متغیرهای کنترلی، به طور مستقیم و با استفاده از خطای توان توسط کنترل کننده فازی-عصبی به منظور دستیابی به مقدار توان انتقالی مطلوب تعیین می گردند. بدین منظور و برای طراحی کنترل کننده فازی، نیاز به مقدار خطای خروجی سیستم اصلی می باشد. سیستم اصلی مورد نظر در این تحقیق سیستم قدرت است.

تشکیل توابع عضویت

برای تشکیل توابع عضویت ورودی های کنترل کننده فازی، باید محدودیتی برای خطای توان اکتیو و راکتیو وجود داشته باشد. در این مقاله، برای تعیین چنین محدودیتی پاسخ های بدست آمده، پس از هر تکرار در محاسبات پخش بار، با مقدار مرجع مقایسه شده و مقدار حداقل و حداکثر بدست آمده به عنوان محدودیت خطای توان اکتیو و راکتیو در نظر گرفته می شود.

همانطور که در بخش قبل گفته شد، K و β دارای محدودیت هایی برای اعمال به محاسبات پخش بار می باشند. در طراحی سیستم فازی این قیود برای ایجاد تابع عضویت خروجی به کار برده می شود. بنابراین برای پارامترهای خروجی که همان پارامترهای کنترل می باشند نیز قیودی تعریف می گردد.

به همین ترتیب، با محاسبه جریان تزریقی به شین J توان مختلط S_{SSR} که به ترتیب شامل توان اکتیو و راکتیو تزریقی به شین J می باشد، طبق معادلات ۵ و ۴ بدست می آیند که در آن

$$X_{ij} = X_{se} + \frac{X_{sh} k^2}{T_{sh}^2} + X_{rt} T_{se}^2 + K_L X_L - K_C X_C + X_{line} \quad (6)$$

$$X_B = X_{se} + X_{line} \quad (7)$$

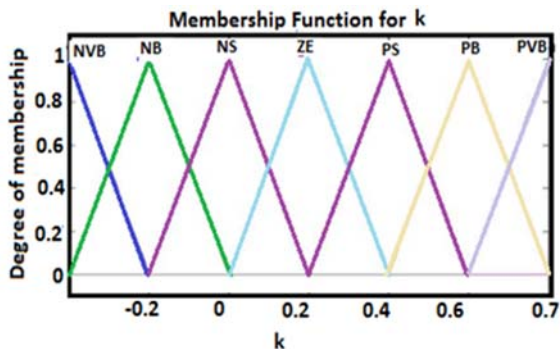
طراحی سیستم کنترل فازی-عصبی تطبیقی برای RHFC

یک سیستم فازی-عصبی از یک الگوریتم یادگیری که از تئوری شبکه عصبی برای تعیین پارامترها به واسطه پردازش نمونه های دیتا به دست آمده است، تشکیل می یابد. در این تحقیق هدف اولیه کنترل پارامترهای متغیر عنصر RHFC می باشد. بدین منظور و با توجه به مدل تزریق توان، معادلات ۱ تا ۷ دو پارامتر موجود، یعنی نسبت تبدیل ولتاژ (K) و زاویه شیفت فاز (β) به عنوان پارامترهای کنترلی RHFC برای سیستم فازی تعریف می شوند. K و β دارای محدودیت هایی برای اعمال به محاسبات پخش بار می باشند ولی در سیستم فازی-عصبی با بکارگیری دانش انسانی، بهبود روابط پیچیده ریاضی امکان پذیر می گردد. پارامترهای K و β به عنوان متغیرهای کنترلی، به طور مستقیم و با استفاده از خطای توان توسط کنترل کننده فازی-عصبی با بکارگیری تابع عضویت مثلثی برای این قیود، جهت ایجاد تابع عضویت خروجی، به منظور دستیابی به مقدار توان انتقالی مطلوب تعیین می گردند که از مزیت های این روش به شمار می رود. شکل ۴ بلوک دیاگرام استراتژی کنترل پیشنهادی برای RHFC را نشان می دهد. با نوشتن معادلات مداری در شکل ۱ و ساده سازی روابط و ترکیب آن ها با معادلات ترانسفورماتورهای تحریک و تزریق و همچنین روابط بین استاتور و روتور در شکل ۲، می توان به روابط زیر دست یافت.

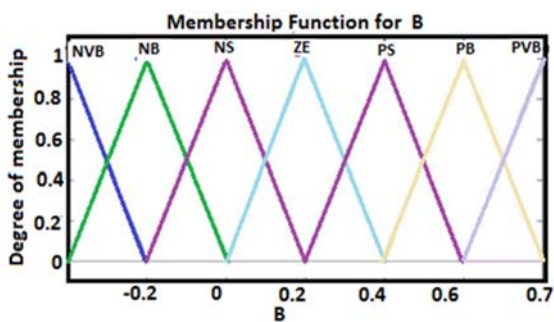
$$T_{rt} e^{j\alpha} = \frac{V_S}{V_R} \quad (8)$$

$$I_R = I_S e^{-j\alpha} T_{rt} \quad (9)$$

$$V_S = T_{rt} e^{j\alpha} V_R - Z_{rt} I_S \quad (10)$$



شکل ۷. تابع عضویت: نسبت تبدیل ولتاژ RHFC



شکل ۸. تابع عضویت زاویه شیفت فاز RHFC

پایاده سازی قواعد فازی

برای ایجاد قواعد فازی نیاز به دانش انسانی و یا همان سیستم خبره می باشد. پایگاه قواعدی که برای خطای توان اکتیو و راکتیو به عنوان ورودی و نسبت تبدیل ولتاژ و زاویه شیفت فاز به عنوان خروجی تعریف شده است، بر اساس اطلاعات مطالعات پخش بار مرجع [۶] تنظیم گردیده است. جدول ۱ مجموعه قواعد مورد نظر برای سیستم فازی را مشخص می کند. با طراحی مدل فازی بر اساس پایگاه داده و قواعد ایجاد شده، سیستم فازی اجرا شده و خروجی ها به عنوان دیتای آموزشی در نظر گرفته می شود. از ANFIS برای ساخت سیستم ترکیبی فازی عصبی استفاده می گردد و دیتای جمع آوری شده در مرحله اول برای آموزش سیستم بکار گرفته می شود. مرحله آخر در طراحی شبکه عصبی انتخاب تعداد مراحل آموزش و تکرار خطا می باشد. لازم به ذکر است که سیستم استنتاج فازی بر اساس مدل ممدانی ایجاد شده و مراحل فازی و دی فازی سازی آن طبق شکل ۹ پیاده سازی می شود [۱۵].

تعیین متغیرهای زبانی

در طراحی سیستم فازی برای هر ورودی یا خروجی متغیرهای زبانی تعریف می شود و بر اساس آن یک سری مجموعه های فازی تشکیل می گردد.

متغیرهای زبانی معمولا بر حسب گستره دستیابی به پاسخ مطلوب طراحی می شوند و هرچه وسعت این تعاریف بیشتر باشد پاسخ نهایی به جواب دقیق نزدیک تر خواهد بود. در طراحی کنترل کننده فازی، پنج متغیر زبانی برای ورودی ها در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

NB منفی بزرگ، NS منفی کوچک، ZE صفر، PS مثبت کوچک و PB مثبت بزرگ.

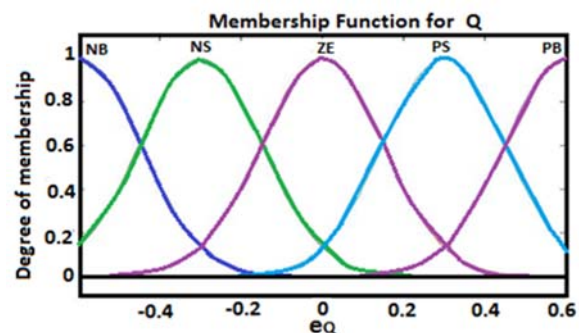
برای خروجی ها نیز هفت متغیر کلامی در نظر گرفته شده است که عبارتند از:

NVB منفی خیلی بزرگ، NB منفی بزرگ، NS منفی کوچک، ZE صفر، PS مثبت کوچک، PB مثبت بزرگ، PVB مثبت خیلی بزرگ.

مجموعه های فازی

پس از تعیین متغیرهای زبانی باید از توابع تعریف شده برای ایجاد مجموعه فازی استفاده نمود. برای ورودی ها، یعنی خطای توان اکتیو و راکتیو از تابع گوسی و برای خروجی ها، یعنی K و β از تابع مثلثی استفاده می شود.

شکل های (۵) تا (۸) نمودار توابع عضویت ورودی ها و خروجی ها را بر اساس متغیرهای کلامی و همچنین محدودیت های تعریف شده برای آن ها نشان می دهد.



شکل ۶. تابع عضویت خطای توان راکتیو

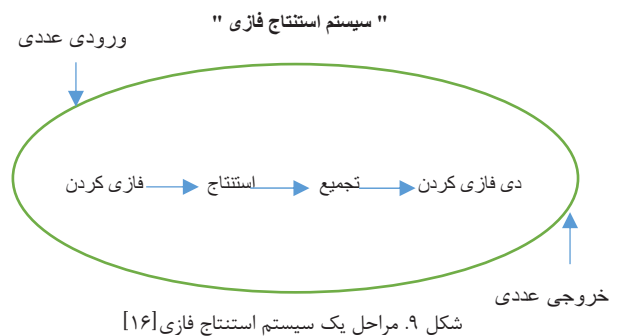
پیشنهادی بر روی شبکه ۱۴ شین IEEE پیاده سازی شده است. این شبکه دارای ۱۴ شین، ۲۰ خط و ۵ ژنراتور می باشد [۱۷]. کل بار این سیستم ۲۰۹ MV و ۷۳/۵ MVAR است. نتایج شبیه سازی در جداول ۳ تا ۵ آورده شده است.

در جدول ۳ مشاهده می گردد که به منظور حداقل نمودن هزینه سوخت کل ژنراتورها، روش کنترل هوشمند، عملکردی بهتر از پخش بار بهینه دارد. در راستای مقایسه روشهای کنترلی Fuzzy و ANFIS ملاحظه می گردد که بهترین عملکرد در کاهش هزینه و تلفات اکتیو و راکتیو به روش ANFIS تعلق دارد. براساس جدول ۴ در حالت حداقل نمودن تلفات، روش OPF در خط (-۱۳) ۶ کاهش قابل توجهی در هزینه سوخت کل ژنراتورها نشان می دهد، در حالیکه کنترل هوشمند بهترین عملکرد را در کاهش تلفات اکتیو و راکتیو دارد. در جدول ۴، کاهش قابل توجهی در تلفات توسط روش فازی عصبی تطبیقی ملاحظه می گردد. از اینرو، افزایش ناچیز در هزینه، قابل اغماض است، چرا که در روش ANFIS با تامین شدن همه اهداف در حد مطلوب، بهره برداری از سیستم های قدرت با بهبود انتقال انرژی در فنی ترین و اقتصادی ترین حالت ممکن امکان پذیر می شود. همانطور که از جدول ۵ مشخص شده است، در حالت حداکثر نمودن ظرفیت بارپذیری سیستم، هر دو روش پخش بار بهینه و کنترل هوشمند، در کاهش هزینه سوخت کل ژنراتورها عملکردی یکسان دارند، در حالیکه بهترین عملکرد از لحاظ افزایش بارپذیری و کاهش تلفات، به کنترل هوشمند تعلق دارد که توجه اقتصادی بیش تری نسبت به روش پخش بار بهینه دارد. قابل ذکر است، که در راستای مقایسه دو روش کنترلی هوشمند، عملکرد بهتر و بهبود قابل توجهی، در کنترل فازی عصبی تطبیقی مشاهده می گردد.

به منظور بیشتر مشخص شدن قابلیت های عملکردی روش هوشمند در حضور RHFC و امکان مقایسه روشها، پروفیل ولتاژ، برای هر یک از توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها، بارپذیری سیستم و تلفات شبکه برای سیستم ۱۴ شینه در شکل های ۱۰، ۱۱ و ۱۲ آورده شده است. همچنین روند بهبود پارامترها، با در نظر گرفتن هزینه، در اقتصادی ترین حالت ممکن و تعداد تکرار جهت حصول همگرایی، به صورت نمودار در شکل ۱۳ آورده می شود.

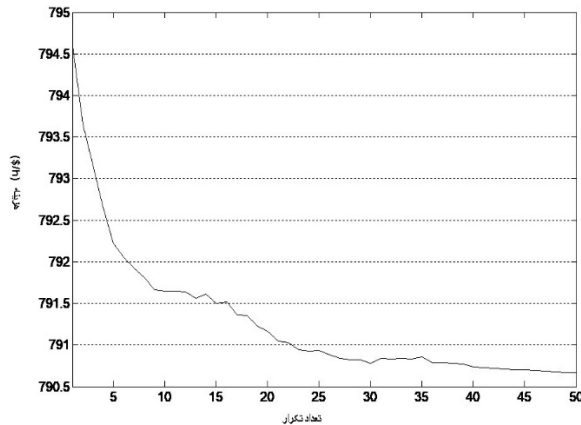
جدول ۱. قواعد تعیین شده برای نسبت تبدیل ولتاژ و زاویه شیفت فاز RHFC

E_o E_p	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	NVB	NB	NS	NS	ZE
NS	NB	NS	NS	ZE	PS
ZE	NS	NS	ZE	PS	PS
PS	NS	ZE	PS	PS	PB
PB	ZE	PS	PS	PB	PVB



پیاده سازی روش پیشنهادی

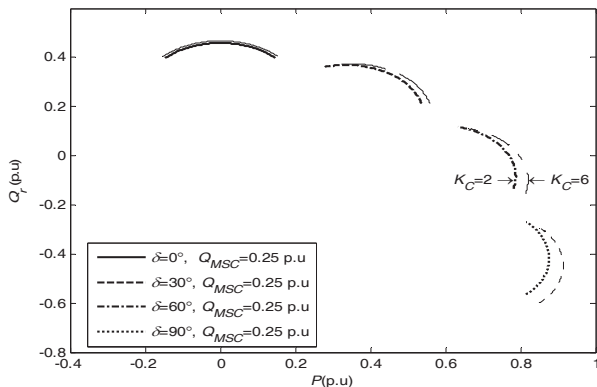
در این قسمت روند کار بر روی روش پیشنهادی، برای هر یک از توابع هدف هزینه سوخت ژنراتورها، تلفات شبکه و بارپذیری سیستم بصورت تک هدفه در نظر گرفته شده است. روش های کنترلی هوشمند و OPF در حضور RHFC به منظور بهبود هر یک از توابع یاد شده، با در نظر گرفتن قیود بهره برداری و امنیت انجام می گیرد. این پیاده سازی شامل سه مرحله می باشد. در مرحله اول حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها مد نظر است که این تابع هدف به معنای تعیین توان های تولیدی هر واحد نیروگاهی در شبکه است به گونه ای که با توجه به تابع سوخت آن واحد، حداقل هزینه کل بار بدست آید [۴]. در مرحله دوم، تابع هدف حداقل نمودن مجموع تلفات در شبکه است. بدین معنی که تولید واحدهای نیروگاهی و توان عبور داده شده از خطوط به گونه ای تنظیم شوند که حداقل تلفات در شبکه بدست آید [۵]. در مرحله سوم، هدف ماکزیم نمودن بارپذیری در شبکه و استفاده از ظرفیت خالی خطوط به منظور افزایش انتقال توان است. بارپذیری شبکه یعنی توانایی شبکه به انتقال توان اکتیو تحت تاثیر توپولوژی شبکه، پارامترهای خط، ولتاژ و جریان وسایل تنظیم کننده و محدودیت های عملی است [۴-۵]. روش



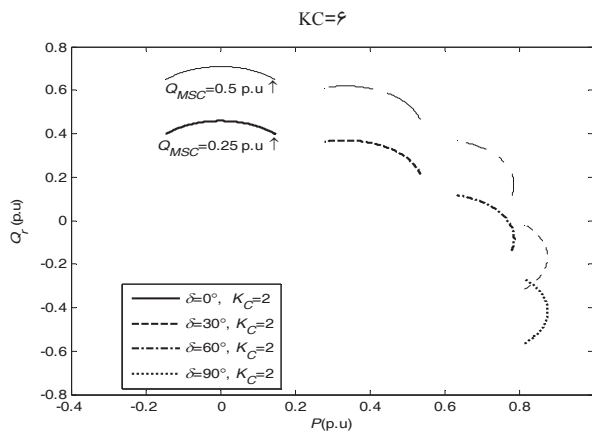
شکل ۱۳. روند بهبود پارامترها با در نظر گرفتن هزینه، جهت حصول همگرایی

نمودار نواحی عملکرد RHFC

با استفاده از مدل تزریق توان به دست آمده در بخش قبل، قابلیت کنترل توان اکتیو و راکتیو RHFC در صفحه $\{Q_r, P\}$ مورد بررسی قرار گرفته است.

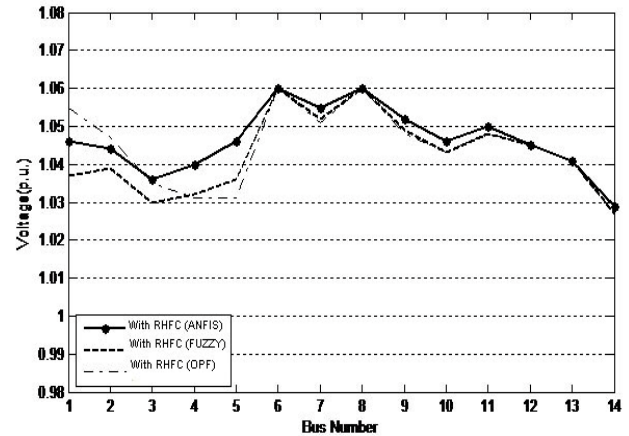


شکل ۱۴. نمودار مقادیر قابل حصول P و Q_r با RHFC بادر نظر گرفتن $K_C=2$ و

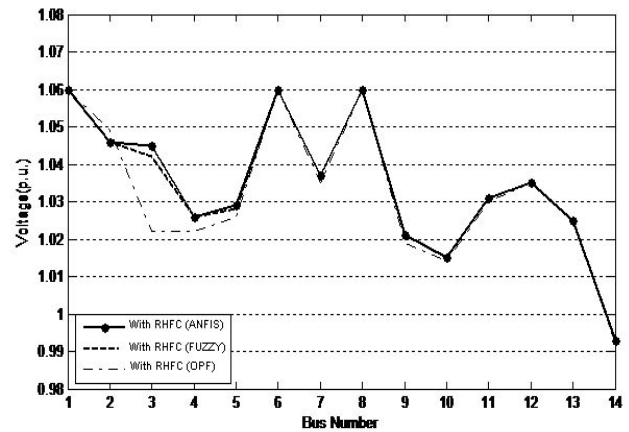


شکل ۱۵. نمودار مقادیر قابل حصول P و Q_r با RHFC بادر نظر گرفتن

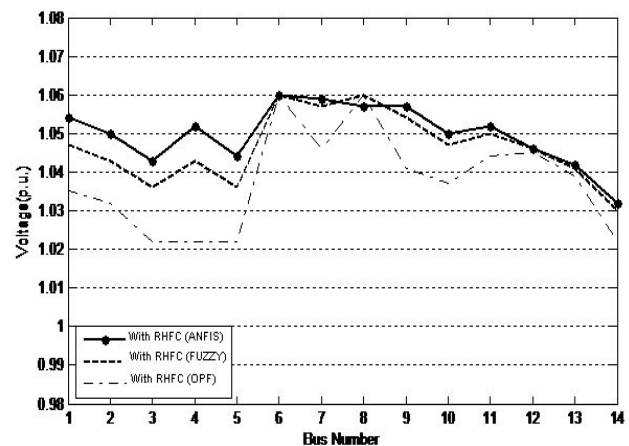
$Q_{MSC}=0.25$ pu و $Q_{MSC}=0.5$ pu



شکل ۱۰. پروفیل ولتاژ شبکه ۱۴ شینه IEEE در حالت حداقل نمودن هزینه سوخت ژنراتورها



شکل ۱۱. پروفیل ولتاژ شبکه ۱۴ شینه IEEE در حالت حداکثر نمودن بارپذیری سیستم



شکل ۱۲. پروفیل ولتاژ شبکه ۱۴ شینه IEEE در حالت حداقل نمودن تلفات

هوشمند، سیستم کنترلی دقیقی برای کنترل پارامترهای متغیر RHFC به عنوان یک جبران‌ساز ترکیبی اعمال شده است. این سیستم با بهره‌گیری از مدل تزریق توان توانست متغیرهای قابل کنترل را در محدوده‌ی مجاز تعیین شده کنترل کند.

گرچه هدف اولیه کنترل پارامترهایی نظیر زاویه شیفت فاز و نسبت تبدیل ولتاژ RHFC بوده اما در نهایت و با انجام کنترل پخش بار نتایج مطلوبی برای شاخص‌های دیگر هم که مدنظر بود گرفته شد. در واقع هدف اصلی برنامه ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت تامین بار و انرژی در اقتصادی ترین حالت ممکن می‌باشد. بنابراین برای حصول نتایج ملموس تر سه تابع هدف شامل: هزینه سوخت کل، تلفات توان و بارپذیری سیستم، به طور جداگانه و تک هدفه با در نظر گرفتن استراتژی کنترلی پیشنهادی در قالب کنترل فقط فازی و کنترل فازی-عصبی تطبیقی بهینه‌سازی گردید. کنترل پخش بار برای شاخص‌های موردنظر با استفاده از نرم افزار MATLAB بر روی سیستم قدرت ۱۴ شینه IEEE شبیه سازی شده است. به منظور بررسی کارایی روش مورد نظر بر روی RHFC، نتایج شبیه سازی بدست آمده با نتایج مدل OPF مقایسه شده است. نتایج حاصل نشان داد که تعیین متغیرهای کنترلی به روش کنترل فازی-عصبی عملکردی موثر در روند بهبود نتایج کلی پخش بار و عملکرد سیستم از لحاظ اقتصادی و فنی داشته است. در نهایت برای کارهای آینده در این زمینه پیشنهاد می‌شود از متغیرهای کلامی بیشتر تر برای ایجاد توابع عضویت گسترده تر و پاسخ همگرا تر بر اساس مدل‌های دیگر فازی برای بهبود دادن بیشتر به کنترل متغیرهای جبران‌سازهای ترکیبی دیگر مانند HFC، OUPFC و RPFC بهره‌گیری نمود.

نواحی عملکرد RHFC با در نظر گرفتن مقادیر طبق جدول ۲ بدست آمده است:

جدول ۲. مقادیر در نظر گرفته شده برای نواحی عملکرد RHFC

مقادیر	پارامترها
۱	$V_i=V_j$
۲۵/۴۰۰	T_{sh}
۲۵/۲۵	T_r
۱۲۵/۲۵	T_{se}
۱	K_L
۰/۰۲ p.u	X_{sh}
۰/۰۲ p.u	X_{se}
۰/۰۴	X_{rt}
۰/۰۰۷۶ p.u	X_L
۰/۰۱۵۲ p.u	X_C

شکل ۱۴ نمودار ناحیه عملکردی RHFC را در زوایای انتقال (δ) ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و به‌ازای نسبت تبدیل $K_c=۶$ ، $K_c=۲$ و تغییر زاویه فاز RPST (σ) بین -۴۵ و +۴۵ درجه نشان می‌دهد. به طور واضح در شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که ناحیه قابل کنترل توان اکتیو با افزایش زاویه انتقال محدودتر و با افزایش مقدار K_c بیشتر می‌شود.

در شکل ۱۵ جهت برجسته‌کردن اثر بانک‌های خازنی در نمودار RHFC ناحیه عملکردی RHFC در زوایای انتقال (δ) ۰، ۳۰، ۶۰ و ۹۰ درجه و به‌ازای $Q_{MSC}=۰/۲۵pu$ و $Q_{MSC}=۰/۵pu$ در $K_c=۲$ نشان داده شده است. در این نواحی، توان راکتیو با افزایش می‌یابد. قابل توجه است که طبق شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نواحی عملکرد RHFC با مقادیر β ، K_L ، K_C ، δ ، Q_{MSC} کنترل می‌شود.

نتیجه گیری

با پیشرفت علم الکترونیک قدرت، نسل جدیدی از جبران‌سازها ارائه شده اند که هدف از آن‌ها کنترل سیستم و همچنین افزایش ظرفیت انتقال خط است. از طرفی علم کنترل را نیز می‌توان به عنوان ابزاری مناسب در کنار جبران‌سازهای ترکیبی در نظر گرفت. در این مقاله با استفاده از کنترل کننده

جدول ۳. نتایج شبیه‌سازی برای هدف کاهش هزینه سوخت

کنترل هوشمند		OPF	بدون RHFC	پارامترهای مورد بررسی
ANFIS	FUZZY			
۱۷۲۰۰/۳۲۴	۱۷۲۱۲/۴۵۷	۱۷۲۳۳/۷۲۸	۱۷۲۷۸/۸۰۴	حد اقل هزینه (\$/h)
۰/۹۳۱۲	۰/۹۹۰۶	۱/۰۹۰۸	۱/۷۱۲۸	تلفات اکتیو
۱۰/۴۵۶۵	۱۰/۵۴۷۸	۱۱/۶۹۶۶	۱۴/۲۸۱۸	تلفات راکتیو
۱	۱	۱	۱	شاخص بارگذاری
۲۶۱/۷۴	۲۶۱/۱۴	۲۶۰/۹۱	۲۶۰/۷۱۳	مجموع توان اکتیو تولیدی ژنراتورها MW
۲۴/۱۳۲	۲۴/۵۱۱	۲۴/۵۸۵	۴۴/۴۰۵	مجموع توان راکتیو تولیدی ژنراتورها MVar
۱/۰۳۰<	۱/۰۳۲<	۱/۰۵۴<	۱/۰۵۵<	ولتاژ شین ۱ (pu)
۱/۰۴۲<-۱/۳۴۰	۱/۰۴۳<-۱/۳۴۱	۱/۰۴۵<-۱/۴۳۱	۱/۰۳۱<-۲/۵۴۲	ولتاژ شین ۵ (pu)
۴۸/۸۷	۴۸/۴۷	۴۰	۲۳/۹۹۳	توان خط عبوری از خط ۵-۱
۱۰/۷۱۸	۱۰/۶۱۲	۱۰/۵۵۷	۰/۱۹۴	زمان (s)
$K_c = 4 \quad k = 0.504$ $K_m = 1 \quad K_I = 2 \quad \beta = 10.3/58$				تنظیمات RHFC

جدول ۴. نتایج شبیه‌سازی برای هدف کاهش تلفات

کنترل هوشمند		OPF	بدون RHFC	پارامترهای مورد بررسی
ANFIS	FUZZY			
۱۸۲۴۱/۰۰۷	۱۸۲۳۰/۱۴۸	۱۸۲۱۰/۷۱۷	۱۸۱۸۶/۶۱۸	حد اقل هزینه (\$/h)
۰/۷۷۹۹	۰/۷۸۰۹	۰/۸۰۴۳	۱/۱۲۸۰	تلفات اکتیو
۱۰/۹۸۰۱	۱۱/۰۰۶۱	۱۱/۶۳۱۳	۱۲/۲۶۸۰	تلفات راکتیو
۱	۱	۱	۱	شاخص بارگذاری
۲۵۹/۴۹۶	۲۵۹/۴۹۸	۲۵۹/۸۰۴	۲۶۰/۱۲۸	مجموع توان اکتیو تولیدی ژنراتورها MW
۴۲/۹۸۹	۴۲/۹۹۶	۴۳/۷۸۸	۴۲/۴۳۵	مجموع توان راکتیو تولیدی ژنراتورها MVar
۱/۰۶<۰/۰۱۹۸	۱/۰۶<۰/۰۲۰۱	۱/۰۶<۰/۰۲۶۴	۱/۰۶<۰/۰۴۵	ولتاژ شین ۶ (pu)
۱/۰۴۹<۱/۲۲۷	۱/۰۴۷<۱/۱۰۱	۱/۰۵۹<۰/۱۱۳	۱/۰۳۹<۰/۰۲۸	ولتاژ شین ۱۳ (pu)
۶۵/۶۷	۶۵/۶۶	۵۹/۴۴	۲۰/۷۱۹	توان خط عبوری از خط ۱۳-۶
۱۲/۱۲۸۴	۱۲/۱۲۰۱	۱۱/۸۹۶۲	۰/۱۸۷۲	زمان (s)
$K_c = 0 \quad k = 0.358$ $K_m = 0 \quad K_I = 3 \quad \beta = 69/1588$				تنظیمات RHFC

جدول ۵. نتایج شبیه‌سازی برای هدف افزایش بار پذیری

کنترل هوشمند		OPF	بدون RHFC	پارامترهای مورد بررسی
ANFIS	FUZZY			
۳۰۷۰۰/۱۰۰	۳۰۷۰۰/۱۰۰	۳۰۷۰۰/۱۰۰	۳۰۷۰۰/۱۰۰	حد اقل هزینه (\$/h)
۵/۴۰۲۷	۵/۴۳۱۲	۶/۱۰۱۱	۶/۸۶۲۱	تلفات اکتیو
۲۸/۱۴۷۸	۲۸/۲۴۷۸	۲۹/۰۹۸۲	۳۰/۸۲۳۵	تلفات راکتیو
۱/۵۶۴۹	۱/۵۶۴۵	۱/۵۵۹۵	۱/۵۵۶۵	شاخص بارگذاری
۴۱۰/۰۰	۴۱۰/۰۰	۴۱۰/۰۰	۴۱۰/۰۰	مجموع توان اکتیو تولیدی ژنراتورها MW
۷۴/۴۴۵۸	۷۴/۴۵۷۹	۸۶/۷۳۲	۱۰۲/۰۲۷	مجموع توان راکتیو تولیدی ژنراتورها MVar
۱/۰۶<۳/۷۷۱	۱/۰۶<۳/۷۶۵	۱/۰۶<۳/۷۵۰	۱/۰۶<۳/۶۲۵	ولتاژ شین ۶ (pu)
۱/۰۸۱<۴/۳۹۸	۱/۰۷۸<۴/۴۵۷	۱/۰۵۱<۴/۸۲۲	۱/۰۲۵<۵/۴۵	ولتاژ شین ۱۳ (pu)
۴۸/۹۷	۴۸/۷۸	۴۰	۳۴/۹۹۲	توان خط عبوری از خط ۱۳-۶
۱۲/۱۶۹۶	۱۲/۱۵۸۹	۱۲/۰۶۰۹	۰/۱۸۳۱	زمان (s)
$K_c = 7 \quad k = 0.169$ $K_m = 1 \quad K_I = 0 \quad \beta = 136/1679$				تنظیمات RHFC

تقدیر و تشکر

این تحقیق توسط دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز در قالب یک طرح تحقیقاتی حمایت شده است که بدین وسیله از کلیه مسئولان و کارکنان حوزه معاونت پژوهشی سپاسگزار می‌شود.

مراجع

- [11] D. Chen, R. R. Mohler and L. K. Chen, "Synthesis of Neural Controller Applied to Flexible AC Transmission Systems," IEEE Trans. On Circuits and Systems, I: Fundamental Theory and Applications, vol. 47, no. 3, pp. 376-388, 2000.
- [12] D. Wenjin, C. Xiangjie and L. Qingsheng, "Fuzzy Self-Adaptive PID control Based on BP Neural Network for TCSC," International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, vol. 1, pp. 178-181, 2009.
- [13] A.M. Stankovic, P. Mattavelli, and R. Ortega, "On the nonlinear control of TCSC," in proc. of the 35 th Annual Hawaii International Conf. on system Sciences, pp. 841-846, Jan 2002.
- [14] R. Rezaeipour, A. Kazemi, M. Tayebi, "Operational comparison of a new FACTS controller(RHFC) with other FACTS devices considering modified steady-state model," Przeglad elektrotechniczny(electrical review), vol. 88, no. 7 A, pp. 54-58, 2012.
- [15] C. Wang, "A Study of Membership Functions on Mamdani-Type Fuzzy Inference System for Industrial Decision-Making," Theses and Dissertations, pp. 1665, 2015.
- [16] R. Asad, and A. Kazemi, "A New Approach for Control of IPFC for Power Flow Management," Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, vol. 16, pp. 21-32, January-June 2010.
- [17] Power Systems Test Case. The University of Washington Archive, <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/2000>.
- [1] M.R. Iravani, Paul L. Dandeno, D. Maratukulam, K.H. Nguyen and D. Zhu, "Applications of Static Phase Shifters in Power Systems," IEEE Trans. Power Del., vol. 9, no. 3, July 1994.
- [2] A.M. Haddadi and A. Kazemi, "optimal power flow control by Rotary Power Flow Controller," Advances in Electrical and computer Engineering (AECE), vol. 11, no. 2, pp. 79-86, May 2011.
- [3] Asawa, Sankalp, and Sam Al-Attiyah. "Impact of FACTS device in electrical power system." In Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), International Conference on, pp. 2488-2495. IEEE, 2016.
- [4] A. Lashkarara, A. Kazemi and S.A. Nabavi Niaki., "optimal location of hybrid flow controller considering modified steady-state model," Applied Energy. vol. 88, no. 4, pp. 1578-1585, May 2011.
- [5] A. Lashkar Ara, A. Kazemi and S.A. Nabavi Niaki, "Modelling of Optimal Unified Power Flow Controller (OUPFC) for optimal steady-state performance of power systems," Energy Conversion and Management (ECM), vol. 52, no. 2, pp. 1325-1333, Feb 2011.
- [6] R. Rezaeipour and A. Kazemi, "Optimal placement of Rotary Hybrid Flow Controller(RHFC) considering operational management of power systems," International review of electrical engineering(IREEE), vol. 6, no. 1, 2011.
- [7] A. Kazemi, R. Rezaeipour and A. Lashkarara., "Optimal location of Rotary Hybrid Flow Controller (RHFC) through multi-objective mathematical programming," sharif university of technology (Scientia Iranica), vol. 19, no. 6, pp. 1771-1779, 2012.
- [8] Das, G. Tulasi Ram. "Fuzzy set theory applications for FACTS devices in grid connected renewable power systems." Devices, Circuits and Systems (ICDCS), 3rd International Conference on. IEEE, 2016.
- [9] D. Das,P.k. Satpathy and P.B.Datta Gupta, "Fuzzy set theory application to load flow analysis," Journal of Institution of Engineers, vol. 85, no. 1, pp. 55-59, June 2004.
- [10] S. Dixit.L. Srivastava and G. Agnihotri, "Power Flow Analysis Using Fuzzy Logic," Power India Conference. IEEE, pp. 7-pp, June 2006.