

بهره‌گیری از ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه جهت کنترل شارش توان بر اساس منطق فازی

محسن سرخابی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ داریوش نظریور^۲، دانشیار؛ سجاد گلشن‌نواز^۳، استادیار

۱- گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - st_m.sorkhabi@urmia.ac.ir

۲- گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - d.nazarpour@urmia.ac.ir

۳- گروه مهندسی برق قدرت - دانشگاه ارومیه - ارومیه - ایران - s.golshannavaz@urmia.ac.ir

چکیده: از میان راه‌حل‌های متعدد کنترل شارش توان اکتیو و راکتیو، ادوات انعطاف‌پذیر جریان متناوب سیستم انتقال (FACTS) در دو دهه اخیر بسیار مورد توجه بوده‌اند. با وجود این که این ادوات اساس کنترل مدرن شارش توان در خطوط انتقال را تشکیل می‌دهند هنوز نتوانسته‌اند به‌طور مؤثر در شبکه‌های انتقال قدرت نفوذ کنند. اصلی‌ترین نقطه‌ضعف آن‌ها پیچیدگی کنترل و تعمیرات به‌همراه هزینه بالای ساخت و پیاده‌سازی آن‌ها می‌باشد. در این مطالعه ابتدا تجهیز ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه (CNT) به‌عنوان جایگزین مناسبی معرفی شده و سپس بهره‌گیری از آن به‌منظور کنترل شارش توان در سیستم قدرت مطرح می‌شود. این تجهیز شامل یک ترانسفورماتور تپ چنجر متغیر زیر بار با یک مبدل دوطرفه توان پایین AC-AC است. به دلیل سادگی ساختار و کم‌هزینه بودن آن، این تجهیز راه‌حل مناسبی برای کنترل دوطرفه شارش توان می‌باشد. به‌منظور تنظیم مؤثر پارامترهای کلیدزنی، روش منابع متعامد مجازی دوگانه (DVQS) مورداستفاده قرار گرفته و از منطق فازی جهت پیاده‌سازی اهداف کنترلی در کنترل شارش توان اکتیو و راکتیو در هنگام بروز خطا بهره‌گرفته می‌شود. جهت ارزیابی عملکرد روش پیشنهادی، مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه پایه‌ریزی شده است. نتایج به‌دست‌آمده عملکرد مناسب روش پیشنهادی را در کنترل مؤثر شارش توان در سیستم قدرت نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: کنترل شارش توان، ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه، کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی، روش کلیدزنی مبتنی بر منابع متعامد مجازی دوگانه.

Deployment of Controllable Network Transformer in Power Flow Control Based on Fuzzy Logic Approach

M. Sorkhabi¹, M.Sc Student; D. Nazarpour², Associate Professor; S. Golshannavaz³, Assistant Professor

1- Electrical Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran, Email: st_m.sorkhabi@urmia.ac.ir

2- Electrical Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran, Email: d.nazarpour@urmia.ac.ir

3- Electrical Engineering Department, Urmia University, Urmia, Iran, Email: s.golshannavaz@urmia.ac.ir

Abstract: Through the numerous solutions for active and reactive power flow control in power systems, flexible ac transmission system (FACTS) devices have been in the center of attention in the last two decades. Although these devices are recognized as the utmost and modern technologies for power flow control, there is a very lukewarm reception in power systems. The main hurdles are known as high cost implementation, sophisticated design and control requirements, and long-duration interruptions for maintenance purposes. In this study, controllable network transformer (CNT) is first introduced as a suitable alternative of FACTS devices which is deemed for power flow control in power systems. This device contains an under load tap changing (ULTC) transformer followed with a bidirectional low rated AC-AC converter. Simplicity of structure and hence a low cost implementation of this device ends in a suitable solution for bidirectional power flow control. To end in effective switching parameters, dual virtual quadrature sources (DVQS) approach is utilized. Meanwhile, a fuzzy logic controller (FLC) is devised for active and reactive power flow controls in faulty situations. To evaluate performance of the proposed approach, simulation studies are conducted on a typical power system. The obtained results demonstrate outperformance of the proposed approach in effective power flow control.

Keywords: Power flow control, controllable network transformer, fuzzy logic control, dual virtual quadrature source.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۲۹

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۰۱

نام نویسنده مسئول: داریوش نظریور

نشانی نویسنده مسئول: ایران - ارومیه - ۱۱ کیلومتری جاده سرو - دانشگاه ارومیه - دانشکده فنی و مهندسی - گروه مهندسی برق قدرت.

۱- مقدمه

شبکه‌های قدرت ابتدایی اغلب به صورت ساختار یک‌طرفه عمودی توسعه یافته‌اند. در این سیستم‌ها، خطوط انتقال به‌گونه‌ای ایجاد می‌شدند که توان تولیدی واحدهای نیروگاهی به صورت مستقیم به مراکز بار انتقال یابد. بر اساس تحقیقات انجام گرفته، نشان داده شده است که این نوع ساختارها دارای سطوح پایینی از قابلیت اطمینان در برق‌رسانی می‌باشند [۱]. علاوه بر این، در این نوع شبکه‌ها، وقوع خطا در یکی از خطوط تغذیه عملکرد کل شبکه را با مخاطره مواجه می‌نماید. به منظور بهبود چنین مواردی، بهره‌برداری حلقه‌ای از شبکه انتقال انرژی الکتریکی مورداستفاده واقع شد که در آن جداسازی و رفع بخش خطادار به سهولت صورت می‌پذیرد که منجر به بهبود قابلیت اطمینان سیستم می‌گردد. در شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی به منظور اتصال دو ناحیه از خطوط ارتباطی استفاده می‌گردد. در این نوع خطوط، اعمال کنترل مناسب شارش توان اغلب دشوار می‌باشد که این مورد به علت تأثیرگذاری مسائلی همچون افزایش تقاضای بار، افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر و سرمایه‌گذاری کم در زیربنای بخش انتقال می‌باشد. به عنوان راه‌کاری مناسب در جهت تأمین اهداف فنی بهره‌برداری و نیز جلوگیری از تحمیل هزینه‌های هنگفت توسعه شبکه، بهره‌گیری از مفهوم شبکه هوشمند در سیستم انتقال مطرح گردیده است [۱]. اگرچه این مفهوم در سیستم انتقال برخی از مناطق جهان مورد بهره‌برداری قرار گرفته است، اما در بسیاری از مناطق هنوز کنترل مؤثر و مناسبی بر شارش توان در خطوط انتقال موجود نمی‌باشد و هیچ‌گونه بهره‌ای از مفاهیم شبکه‌های هوشمند انتقال در آن دیده نمی‌شود. در اغلب حوادث، خطوط ارتباطی دچار اضافه بار شده و از مدار خارج می‌گردند. در این حالت ممکن است پخش توان در برخی از خطوط در جهات مخالف نیز صورت پذیرد [۲]. به همین منظور، در شبکه‌های انتقال انرژی الکتریکی، کنترل دوطرفه شارش توان از اهمیت بسیاری برخوردار است. در این میان، برخی از روش‌های کنترل شارش توان را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

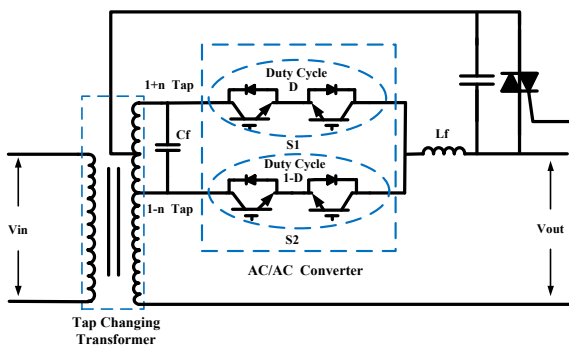
- استفاده از روش‌های پخش توان بهینه
 - بهره‌گیری از ادوات انعطاف‌پذیر جریان متناوب سیستم انتقال (FACTS)
 - بهره‌گیری از ترانسفورماتورهای تپ‌چنددار متغیر زیر بار (ULTC)
 - کنترل توان به روش پشت به پشت (BTB) از طریق لینک ولتاژ فشار قوی جریان مستقیم (HVDC)
 - بهره‌گیری از ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه (CNT)
- ادوات FACTS که بر اساس مبدل‌های الکترونیک قدرت پایه‌ریزی شده‌اند به منظور بهبود عملکرد خطوط انتقال جریان متناوب (AC) طولانی به کار می‌روند. این کار بر اساس کنترل مؤثر ولتاژ و یا بهبود راکتانس خط انجام می‌پذیرد [۳-۵]. ادوات FACTS موازی همچون جبران‌ساز استاتیکی توان راکتیو (SVC) و جبران‌ساز استاتیکی

سنکرون (STATCOM) ^۶ گزینه‌های مناسبی جهت کنترل ولتاژ هستند [۶]. SVC می‌تواند مانند یک راکتانس سلفی یا خازنی عمل کند و از این طریق بستری را به منظور جذب یا تزریق توان راکتیو به وجود می‌آورد. میزان توان راکتیوی که جذب یا تولید می‌شود وابسته به ولتاژ باس است. وقتی که در شرایط کم‌باری ولتاژ بالا می‌رود، توان راکتیو جذب و وقتی که در شرایط پرباری ولتاژ افت می‌کند، توان راکتیو تزریق می‌گردد. SVC به دلیل نیاز به ذخیره‌سازی انرژی در سلف یا خازن، بسیار پرهزینه بوده و مقرون به صرفه نیست. همچنین این تجهیزات توانایی چندانی در کنترل توان راکتیو ندارد [۶]. STATCOM نیز یک جبران‌ساز توان راکتیو است که عملکرد آن مبتنی بر اینورتر است. جریان عبوری از STATCOM عمود بر ولتاژ خط است. بنابراین STATCOM می‌تواند مانند یک سلف یا خازن عمل کند. با توجه به نحوه کنترل و سرعت پاسخ‌دهی، STATCOM مؤثرتر از SVC می‌باشد. اما هزینه بالای این تجهیزات مانع استفاده گسترده آن در شبکه گردیده است [۶]. ادوات FACTS سری مانند تریستور کنترل شده با خازن سری (TCSC) و جبران‌ساز استاتیکی سنکرون سری (SSSC) برای کنترل راکتانس خط مناسب هستند. اما توانایی کنترل هم‌زمان و مستقل توان راکتیو را ندارند. علاوه بر این، این تجهیزات مؤلفه‌های هارمونیکی مختلفی را به شبکه تزریق می‌کنند [۶]. مهم‌ترین و کامل‌ترین جزء ادوات FACTS کنترل‌کننده شارش توان یکپارچه (UPFC) می‌باشد که ترکیب STATCOM و SSSC در یک ابزار واحد است و توانایی کنترل هم‌زمان اندازه و فاز ولتاژ و راکتانس خط را دارد. از این رو می‌تواند توان راکتیو و راکتیو را به طور هم‌زمان و مستقل کنترل نماید. اما هزینه بالا و پیچیدگی آن امکان استفاده گسترده و به‌روز کردن آن را محدود می‌کند طوری که تا به حال فقط سه عدد UPFC در شبکه برق کل جهان احداث شده است [۷-۹]. ابزار کنترلی انعطاف‌پذیر دیگر که فاقد مبدل‌های الکترونیک قدرت است، کنترل‌کننده‌های ULTC، ترانسفورماتورهای تنظیم‌کننده ولتاژ (VRT) و ترانسفورماتورهای شیف‌دهنده فاز (PST) می‌باشد. اگرچه این ابزارها دارای هزینه نصب و بهره‌برداری پایین‌تری هستند، اما دارای سرعت عملکرد و محدوده کنترلی پایین هستند [۱۰-۱۲]. ترانسفورماتور سن (ST) معرفی شده در مرجع [۲] یک ابزار کنترلی جدید است و امکان کنترل توان راکتیو و راکتیو را فراهم می‌کند. با وجود اینکه این تجهیزات دارای محدوده وسیعی برای کنترل شارش توان است اما به دلیل اتصالات بین فازی، رفع خطای سیستم با وجود ترانسفورماتور ST بسیار پیچیده می‌باشد. روش دیگر کنترل توان بین یک سیستم دو ناحیه‌ای استفاده از روش پشت‌به‌پشت (BTB) از طریق لینک ولتاژ فشار قوی جریان مستقیم (HVDC) می‌باشد. روش BTB از دو مبدل منبع ولتاژ دوطرفه استفاده می‌کند و با اینکه امکان اتصال دو شبکه آسنکرون را دارد و محدوده کنترلی وسیعی را فراهم می‌کند، ولی پیاده‌سازی آن بسیار پرهزینه و پیچیده است [۱۳].

می‌گردد. سپس در بخش ۵ با توجه به پارامترهای مؤثر در کنترل شارش توان، کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی طراحی شده و مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه در بخش ۶ به بهبود پایداری دینامیکی شبکه با استفاده از CNT پرداخت می‌گردد. در بخش ۷ پیشنهادات پژوهشی جهت ادامه مطالعات در این زمینه مطرح می‌گردد. در نهایت، در بخش ۸، نتیجه‌گیری حاصل از این مطالعه ارائه می‌گردد.

۲- تشریح ساختار ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

ساختار ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه برخلاف دیگر ادوات کنترل توان مانند FACTS، PST، VRT، سن ترانسفورماتور و غیره، که به صورت سه فاز طراحی و پیاده‌سازی می‌شوند، به صورت تک‌فاز اجرا می‌شود و برای کاربردهای سه فاز، در هر فاز از یک واحد ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه استفاده می‌شود. مزیت این حالت این است که با وجود خطا در یکی از فازها، این تجهیز از تقابل بین فازها جلوگیری می‌کند و برطرف کردن خطا بسیار ساده خواهد بود [۱۶]. در شکل ۱ ساختار ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه نشان داده شده است. ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه یک ابزار کنترلی است که امکان کنترل دامنه و فاز ولتاژ باس را به طور هم‌زمان فراهم می‌کند. این ترانسفورماتور کنترل‌شونده شامل یک ترانسفورماتور تپ‌چنجر متغیر زیر بار و یک میدل توان پایین AC-AC می‌باشد. میدل AC-AC شامل دو کلید S_1 و S_2 دوطرفه که از ترکیب چهار عدد ترانزیستور دوقطبی با پایه گیت عایق شده (IGBT) حاصل می‌آید و دو فیلتر کوچک سلفی L_f و خازنی C_f می‌باشد. کلیدها به صورت پشت‌به‌پشت به هم متصل شده‌اند و به ترتیب با سیکل کاری D و $1-D$ در تپ‌های $1+n$ و $1-n$ پریونیت ترانسفورماتور قرار می‌گیرند. در هنگام روشن بودن کلید S_1 نسبت تبدیل ترانسفورماتور $1:(1+n)$ و اگر کلید S_2 روشن شود نسبت تبدیل ترانسفورماتور برابر $1:(1-n)$ خواهد شد. همچنین به منظور افزایش قابلیت اطمینان، یک مسیر بای‌پس برای خارج نمودن میدل از مدار در هنگام عملکرد نادرست کلیدها موجود می‌باشد که در این حالت ترانسفورماتور بدون میدل AC-AC به عملکرد خود ادامه می‌دهد.



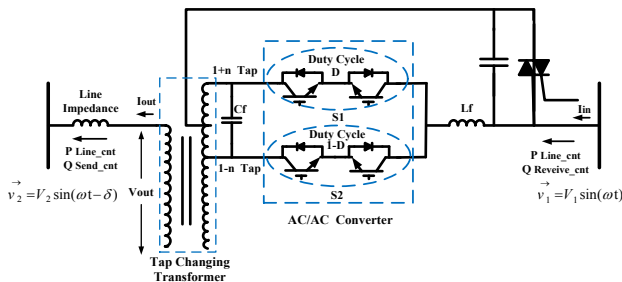
شکل ۱: ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه یک ابزار ساده و ارزان‌قیمت است که توانایی کنترل توان عبوری از خط ارتباطی را به صورت نرم و دوطرفه برقرار می‌نماید. از نقاط قوت ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه نسبت به ادوات FACTS می‌توان به سادگی ساختار و در نتیجه هزینه پایین آن اشاره داشت. این تجهیز به راحتی بر ترانسفورماتورهای موجود نصب شده و در نتیجه امکان بهره‌گیری از ترانسفورماتور کنترل‌پذیر را به شکل توزیع شده در سطح شبکه فراهم می‌آورد. این امکان کنترل‌پذیری بسیار مناسب‌تر سیستم قدرت را در مقایسه با سایر ادوات FACTS فراهم می‌آورد. همچنین قابلیت اطمینان سیستم قدرت نیز افزایش می‌یابد. از طرف دیگر ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه نسبت به ادوات FACTS با عملکرد مشابه همچون UPFC دارای تعداد کلیدهای بسیار کمتر بوده و هزینه پیاده‌سازی و تعمیر و نگهداری آن بسیار مقرون به صرفه‌تر می‌باشد. از نظر ساختاری، این تجهیز شامل یک ترانسفورماتور تپ‌چنجر متغیر زیر بار با یک میدل کوچک دو جهته توان پایین AC-AC است. با استفاده از روش مدولاسیون پهنای پالس (PWM)، ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه قادر است دامنه ولتاژ خروجی را کنترل نماید. شایان ذکر است که در این حالت هیچ‌گونه کنترلی بر روی زاویه فاز وجود ندارد. بنابراین ولتاژ خروجی در این مورد هم‌فاز با ولتاژ ورودی است اما دامنه آن متفاوت است [۱۴]. همین امر منجر به شکل‌گیری مفهوم منابع متعامد مجازی دوگانه (DVQS) گردیده است که باعث ترکیب ولتاژهای خروجی با فازهای کنترل‌پذیر یا سطوح هارمونیک می‌شود و بدون آن که نیازی به انرژی ذخیره‌شده یا منابع و کلیدهای اضافی باشد امکان کنترل هم‌زمان دامنه و زاویه فاز ولتاژ فراهم می‌آید [۱۵].

در این مقاله، ابتدا معرفی مناسبی از ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه انجام می‌پذیرد و سپس عملکرد این تجهیز در کنترل شارش توان اکتیو و راکتیو در سیستم قدرت مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بر اساس روش منابع متعامد مجازی دوگانه و بهره‌گیری از کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی، پارامترهای مؤثر کلیدزنی به شکل زمان حقیقی تنظیم می‌گردد و در نتیجه کنترل مؤثری بر روی شارش توان به عمل می‌آید. مطالعات شبیه‌سازی بر روی یک سیستم نمونه شامل یک شبکه دو ناحیه‌ای در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB انجام شده است. کنترل‌کننده فازی در هنگام وقوع خطا از توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط ارتباطی نمونه گرفته و آن را با مقادیر مرجع توان اکتیو و راکتیو مقایسه می‌کند. متناسب با سیگنال خطای ایجاد شده، کنترل‌کننده فازی پیشنهادی پارامترهای کلیدزنی k_0 و k_2 (در بخش‌های بعد توضیح داده خواهد شد) را تنظیم نموده و از این طریق مقدار توان اکتیو و راکتیو را به صورت مستقل و دوطرفه کنترل می‌نماید. نتایج به دست آمده بر روی سیستم مورد مطالعه به تفصیل مورد ارزیابی واقع می‌گردد.

در این مقاله در بخش ۲ و ۳ به تشریح ساختار و ارائه مدل ریاضی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه پرداخته می‌شود. در بخش ۴ محدوده کنترل شارش توان در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه معرفی

هارمونیک زوج با دامنه k_2 و فاز φ می‌باشد. این مدولاسیون به ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه اجازه می‌دهد که برای کنترل اندازه و جهت توان عبوری، منابع ولتاژ سری مجازی را بین دو باس ایجاد کند. با توجه به شکل ۴، ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه بین باس‌های ۱ و ۲ با ولتاژهای \vec{v}_1 و \vec{v}_2 که در روابط نشان داده شده‌اند، در نظر گرفته می‌شود. ولتاژ و جریان خروجی و نیز جریان ورودی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه مطابق روابط (۱)–(۱۲) نشان داده شده‌اند [۱۴]، [۱۵].



شکل ۴: سیستم دو ناحیه‌ای با ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

$$D = k_0 + k_2 \sin(2\omega t + \varphi) \quad (1)$$

ولتاژهای انتهایی سمت گیرنده و فرستنده به ترتیب در روابط (۲) و (۳) نشان داده شده است.

$$\vec{v}_1 = V_1 \sin(\omega t) \quad (2)$$

$$\vec{v}_2 = V_2 \sin(\omega t - \delta) \quad (3)$$

ولتاژ خروجی CNT بر حسب ولتاژ سمت گیرنده، سیکل کاری و نسبت تبدیل غیرنامی n ترانسفورماتور در رابطه (۴) ارائه داده شده است.

$$\vec{v}_{out} = \left(\frac{D}{1+n} + \frac{1-D}{1-n} \right) \vec{v}_1 \quad (4)$$

با جایگذاری روابط (۱) و (۲) در رابطه (۴) ولتاژ خروجی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه که شامل سه مؤلفه V_d (هم‌فاز با ولتاژ ورودی)، V_q (عمود بر ولتاژ ورودی و در فرکانس هارمونیک اصلی) و V_3 (عمود بر ولتاژ ورودی و در فرکانس هارمونیک سوم) می‌باشد، بر حسب ضرایب A و B مطابق رابطه (۵) به دست می‌آید. ضرایب A و B نیز در روابط (۶) و (۷) معرفی شده‌اند.

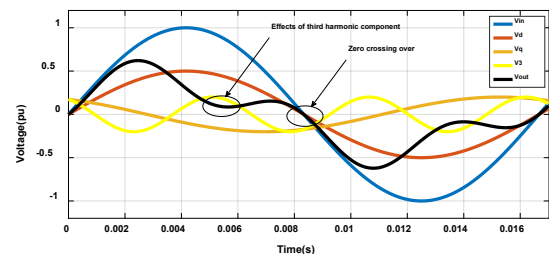
$$\vec{v}_{out} = V_1 (A \sin(\omega t) - B \cos(\omega t + \varphi)) + B V_1 \cos(3\omega t + \varphi) = V_d + V_q + V_3 \quad (5)$$

$$A = \frac{1+n-2k_0n}{1-n^2} \quad (6)$$

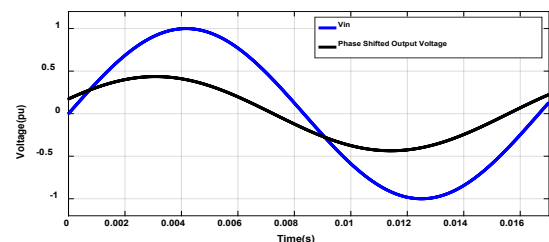
$$B = \frac{k_2n}{1-n^2} \quad (7)$$

برای جلوگیری از وقوع بیش مدولاسیون، محدودیت نشان داده شده در رابطه (۸) تعریف می‌شود.

با استفاده از روش کلیدزنی مدولاسیون پهنای پالس، ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه قادر است دامنه ولتاژ خروجی را کنترل نماید. در این حالت هیچ‌گونه کنترلی بر روی زاویه فاز ولتاژ وجود ندارد زیرا هیچ‌گونه المان ذخیره‌کننده انرژی در مدار وجود ندارد تا در هنگام عبور ولتاژ خروجی از نقطه صفر، انرژی موردنیاز را برای تغییر زاویه فاز ولتاژ فراهم کند. بنابراین ولتاژ خروجی در این مورد هم‌فاز با ولتاژ ورودی است اما دامنه آن متفاوت است [۱۴]. همین امر منجر به شکل‌گیری مفهوم منابع متعامد مجازی دوگانه گردیده است که باعث ترکیب ولتاژهای خروجی با فازهای کنترل‌پذیر یا سطوح هارمونیک می‌شود و بدون آن که نیازی به انرژی ذخیره‌شده یا منابع و کلیدهای اضافی باشد امکان کنترل هم‌زمان دامنه و زاویه فاز ولتاژ فراهم می‌آید [۱۵]. روش منابع متعامد مجازی دوگانه ولتاژ خروجی را به سه مؤلفه تقسیم می‌کند. یک مؤلفه هم‌فاز با ولتاژ ورودی (V_d) است و دو مؤلفه دیگر منابع مجازی عمود بر ولتاژ ورودی هستند که یکی از آن‌ها در فرکانس هارمونیک اصلی (V_q) و دیگری در فرکانس هارمونیک سوم (V_3) می‌باشد. از مجموع این سه مؤلفه، پوش ولتاژ خروجی به دست خواهد آمد که در شکل ۲ نشان داده شده است. ولتاژ خروجی ایجادشده که در فرکانس اصلی شبکه است از مجموع منابع مجازی V_d و V_q ایجاد می‌شود که در شکل ۳ نشان داده شده است. برای پیاده‌سازی روش منابع متعامد مجازی دوگانه از مدولاسیون هارمونیک زوج (EHM) استفاده می‌شود که در ادامه به‌طور مفصل توضیح داده خواهد شد.



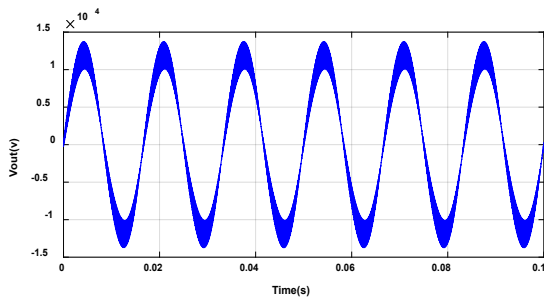
شکل ۲: مؤلفه‌های ولتاژ خروجی در روش منابع متعامد مجازی دوگانه



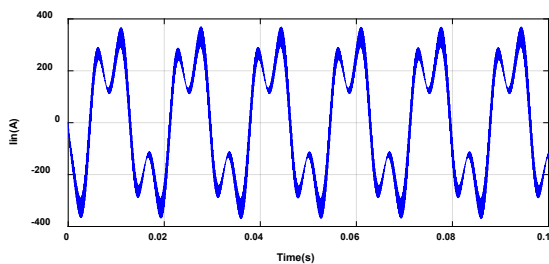
شکل ۳: ولتاژهای ورودی و خروجی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

۳- مدل ریاضی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

برای پیاده‌سازی روش منابع متعامد مجازی دوگانه از مدولاسیون هارمونیک زوج استفاده می‌شود. در مدولاسیون هارمونیک زوج، سیکل کاری کلیدها همان‌طور که در رابطه (۱) نشان داده شده است عدد ثابتی نیست بلکه دارای یک مؤلفه ثابت k_0 و یک مؤلفه سینوسی با فرکانس



شکل ۵: شکل موج ولتاژ خروجی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه



شکل ۶: شکل موج جریان ورودی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

۴- محدوده کنترلی شارش توان اکتیو و راکتیو در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

با مقایسه ولتاژ و جریان خروجی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه مشاهده می‌شود که این ابزار کنترلی یک المان پسیو است و توان اکتیو اولیه و ثانویه آن با هم برابر است. این نکته در رابطه (۱۴) نیز نشان داده شده است [۱۵]. توان راکتیو طرف فرستنده و طرف گیرنده ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه در روابط (۱۵) و (۱۶) مشخص شده‌اند [۱۵].

$$P_{Line} = \frac{V_1 V_2}{\omega L} \sin \delta \quad (13)$$

$$P_{Line_cnt} = \frac{V_1 V_2}{\omega L} [A \sin \delta - B \cos(\delta + \varphi)] \quad (14)$$

$$Q_{Receive_cnt} = \frac{V_2}{\omega L} [V_2 - A V_1 \cos \delta - B V_1 \sin(\delta + \varphi)] \quad (15)$$

$$Q_{Send_cnt} = \frac{V_1}{\omega L} \left[(A^2 - \frac{2}{3} B^2) V_1 - A V_2 \cos \delta + B V_2 \sin(\delta + \varphi) \right] \quad (16)$$

با تغییر سیکل کاری کلیدهای S_1 و S_2 بین ۰ و ۱ و تأثیر آن روی دیگر پارامترها می‌توان محدوده تغییرات توان اکتیو و راکتیو در سمت فرستنده ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه را به دست آورد. مطابق روابط (۱۴) و (۱۶) مشاهده می‌شود که توان اکتیو و راکتیو سمت فرستنده وابسته به A و B و φ می‌باشد. همچنین از روابط (۶) و (۷) مشاهده می‌شود که A و B به ترتیب وابسته به k_0 و k_2 هستند. بنابراین مطابق رابطه (۱۴) می‌توان گفت که شارش توان در خط ارتباطی وابسته به مؤلفه ثابت k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 و

$$k_2 \leq \min\{k_0, 1 - k_0\} \quad (8)$$

طبق اصل پایستگی، جریان ورودی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه، برحسب جریان خروجی، سیکل کاری و نسبت تبدیل غیرنامی n مطابق رابطه (۹) محاسبه می‌گردد.

$$\bar{I}_{in} = \left(\frac{D}{1+n} + \frac{1-D}{1-n} \right) \bar{I}_{out} \quad (9)$$

جریان خروجی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه مطابق رابطه فازوری (۱۰) مشخص می‌شود که منظور از V_{out}^1 و V_{out}^3 به ترتیب هارمونیک اول و سوم ولتاژ خروجی می‌باشد.

$$\bar{I}_{out} = \left(\frac{V_{out}^1 - \bar{v}_2}{j\omega L} + \frac{V_{out}^3}{J(3\omega)L} \right) \quad (10)$$

رابطه فازوری (۱۰) را می‌توان به صورت رابطه زمانی (۱۱) نیز نشان داد.

$$\begin{aligned} \bar{I}_{out} = & -\frac{A V_1}{\omega L} \cos(\omega t) - \frac{B V_1}{\omega L} \sin(\omega t + \varphi) \\ & + \frac{V_2}{\omega L} \cos(\omega t - \delta) + \frac{B V_1}{3\omega L} \sin(3\omega t + \varphi) \end{aligned} \quad (11)$$

با استفاده از روابط (۹) و (۱۱) جریان ورودی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه مطابق رابطه (۱۲) محاسبه می‌شود که شامل مؤلفه‌های هارمونیک اصلی، سوم و پنجم می‌باشد.

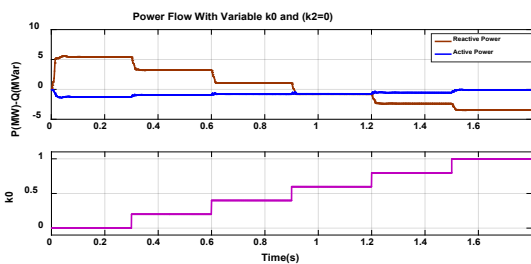
$$\begin{aligned} \bar{I}_{in} = & \frac{V_1}{\omega L} (-A^2 + \frac{2}{3} B^2) \cos(\omega t) \\ & + \frac{V_2}{\omega L} (A \cos(\omega t - \delta) - B \sin(\omega t + \delta + \varphi)) \\ & + \frac{B V_1}{\omega L} (2A \sin(3\omega t + \varphi) - B \cos(3\omega t + 2\varphi)) \\ & - \frac{B V_2}{\omega L} \sin(3\omega t - \delta + \varphi) \\ & + \frac{B^2 V_1}{3\omega L} \cos(5\omega t + 2\varphi) \end{aligned} \quad (12)$$

با دقت در رابطه (۵) می‌توان مشاهده نمود که \bar{v}_{out} شامل مؤلفه‌های هارمونیک اصلی شبکه و هارمونیک سوم و \bar{I}_{in} شامل مؤلفه‌های هارمونیک اصلی، سوم و پنجم می‌باشد. شبکه دو باس شکل ۴ با دامنه ولتاژ باس ۱۲ کیلوولت و اختلاف فاز ۲ درجه بین ولتاژ دو باس و اعمال کلیدزنی هارمونیک زوج با فرکانس کلیدزنی ۱۰ کیلوهرتز در محیط سیمولینک نرم‌افزار MATLAB شبیه‌سازی می‌گردد. شکل موج‌های \bar{v}_{out} و \bar{I}_{in} در شکل‌های ۵ و ۶ نمایش داده شده است. همان‌طوری که مشاهده می‌شود، شکل موج‌های ولتاژ و جریان دارای مؤلفه‌های هارمونیک می‌باشد. شایان ذکر است که در مرجع [۱۶] برای کاهش هارمونیک‌های مزاحم ولتاژ و جریان تمهیداتی اندیشیده شده است.

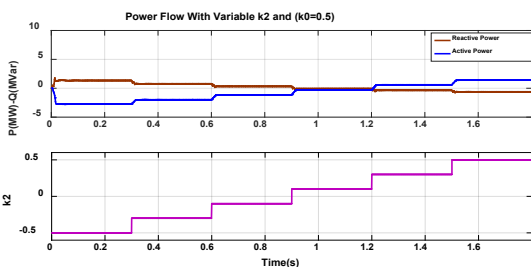
طراحی می‌گردد. به‌منظور درک صحیح از کارکرد کنترل‌کننده توضیحات کافی در هر مورد ارائه می‌گردد.

۵-۱- کنترل شارش توان اکتیو و راکتیو

از آنجایی‌که برای طراحی یک کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی نیاز به دانش مناسبی از پارامترهای مؤثر بر عملکرد تجهیز و سیستم مورد مطالعه می‌باشد، در این بخش ابتدا تغییرات شارش توان اکتیو و راکتیو با تغییر مؤلفه ثابت k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 در شبکه شکل ۴ مطالعه می‌گردد. در شکل ۸ مؤلفه ثابت k_0 از ۰ تا ۱ با پله‌های ۰/۳ تغییر می‌یابد؛ درحالی‌که دامنه هارمونیک دوم k_2 در مقدار ۰ ثابت نگه داشته می‌شود. مشاهده می‌شود که در این حالت تغییر توان راکتیو قابل‌توجه بوده ولی توان اکتیو تغییرات چندانی محسوس ندارد. در شکل ۹ دامنه هارمونیک دوم k_2 از ۰/۵ تا ۰/۵ با پله‌های ۰/۳ تغییر می‌یابد درحالی‌که مؤلفه k_0 در مقدار ثابت ۰/۵ ثابت نگه‌داشته شده‌است. مشاهده می‌شود که تغییر توان اکتیو نسبت به تغییر توان راکتیو بیشتر است. همچنین با توجه به روابط (۱۴) و (۱۶) می‌توان نتیجه گرفت که هرچه اختلاف فاز بین ولتاژ دو باس δ بیشتر باشد، این تغییرات بیشتر خواهد شد.



شکل ۸: محدوده تغییر توان اکتیو و راکتیو با تغییر k_0 و $k_2 = 0$



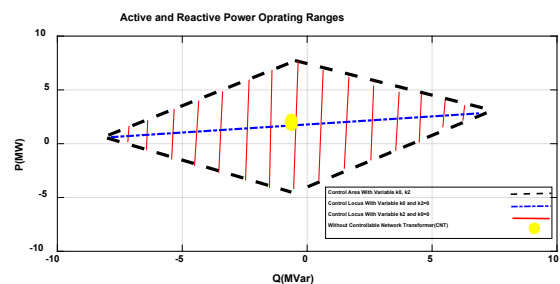
شکل ۹: محدوده تغییر توان اکتیو و راکتیو با تغییر k_2 و $k_0 = 0.5$

۵-۲- کنترل‌کننده فازی

هنگام وقوع خطا در یک خط انتقال امکان دارد شارش توان از ناحیه با تولید کمتر به ناحیه با تولید بیشتر انجام گیرد که باعث می‌شود فشار بیشتری به ناحیه با تولید کمتر وارد شود. همچنین امکان دارد شارش توان از مقدار نامی بیشتر و یا کمتر شود. با استفاده از محدوده کنترل توان دوطرفه ایجادشده توسط ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه و طراحی یک کنترل‌کننده شارش توان می‌توان از وقوع چنین مشکلاتی جلوگیری کرد و یا از شدت آن‌ها کاست.

نیز فاز آن φ در سیکل کاری D می‌باشد و با تغییر این مقادیر و انتخاب مقدار مناسب D می‌توان شارش توان در خط ارتباطی را کنترل کرد.

سیستم ۱۲ کیلوولت نمایش داده‌شده در شکل ۴ در نظر گرفته می‌شود. با در نظر گرفتن اختلاف فاز ۲ درجه مابین ولتاژ باس‌های V_1 و V_2 ، ترانسفورماتور با نسبت تبدیل ۱۰ درصد و خط انتقال به طول ۱۰ مایل با اندوکتانس برابر ۰/۴۶ میلی‌هائری بر مایل، محدوده کنترلی توان اکتیو و راکتیو سمت فرستنده در پاسخ به تغییر k_0 و k_2 و $\varphi = 0$ مطابق شکل ۷ به دست می‌آید.



شکل ۷: محدوده کنترل توان اکتیو و راکتیو در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه

با توجه به شکل ۷ مشاهده می‌شود که تغییر k_0 درحالی‌که k_2 برابر صفر می‌باشد تأثیر چشمگیری در مقدار توان اکتیو انتقالی ندارد؛ بلکه محدوده کنترلی وسیعی را برای توان راکتیو فراهم می‌کند. از طرفی تغییر k_2 درحالی‌که k_0 در مقدار ثابتی نگه‌داشته شده‌است، تأثیر مستقیمی بر توان اکتیو انتقالی دارد. در این حالت مقدار تأثیر k_2 روی توان اکتیو بسته به اینکه مقدار k_0 در چه مقداری ثابت نگه داشته شده‌است، متفاوت خواهد بود. بنابراین مشاهده می‌شود که مؤلفه ثابت k_0 فقط بر دامنه ولتاژ تأثیر داشته و دامنه هارمونیک دوم k_2 بیشتر زاویه ولتاژ را تحت تأثیر می‌گذارد. در نهایت کل محدوده کنترلی توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط در پاسخ به تغییر k_0 و k_2 مطابق شکل ۷ به دست می‌آید. همچنین با توجه به روابط (۶)، (۷) و (۱۴) مشاهده می‌شود که با افزایش تپ ترانسفورماتور می‌توان محدوده کنترلی مشاهده شده در شکل ۷ را افزایش داد. البته هر چه میزان تپ ترانسفورماتور افزایش یابد، مقادیر نامی کانورتر AC-AC نیز افزایش خواهد یافت.

۵- کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی به‌منظور کنترل شارش توان

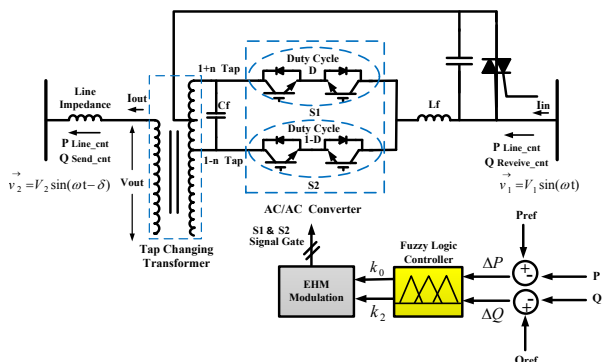
با تکیه بر دانش قبلی و درک صحیح از محدوده کنترلی توان و عوامل مؤثر بر آن در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه می‌توان کنترل‌کننده شارش توان مبتنی بر منطق فازی مناسبی را جهت کنترل این تجهیز در شرایط مختلف بهره‌برداری شبکه طراحی نمود. در این بخش ابتدا به بررسی کنترل توان اکتیو و راکتیو سمت فرستنده در شبکه نمایش داده‌شده در شکل ۴ پرداخته می‌شود و سپس با در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر بر کنترل توان، کنترل‌کننده مبتنی بر منطق فازی

جدول ۱: قوانین استنتاج فازی برای تعیین k_2

ΔP				توابع عضویت	سیگنال ورودی
PB	PS	NS	NB		
B	B	B	B	NB	ΔQ
B	B	S	S	NS	
B	S	S	S	PS	
S	S	S	S	PB	

جدول ۲: قوانین استنتاج فازی برای تعیین k_0

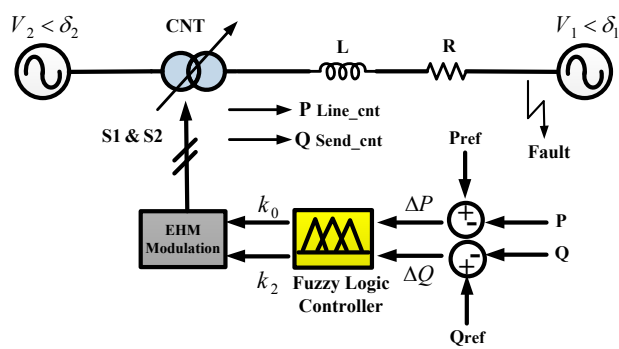
ΔP				توابع عضویت	سیگنال ورودی
PB	PS	NS	NB		
S	S	S	S	NB	ΔQ
S	S	B	B	NS	
S	B	B	B	PS	
B	B	B	B	PB	



شکل ۱۳: ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه با کنترل‌کننده فازی

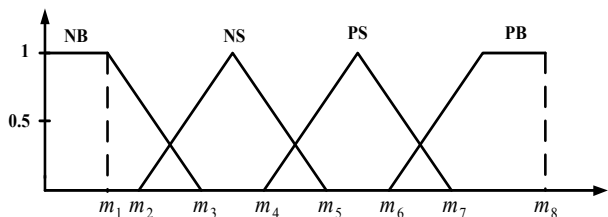
۴-۵- مطالعات شبیه‌سازی

به‌منظور مطالعه نحوه عملکرد ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه در حضور کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر منطق فازی در هنگام وقوع خطا، شماتیک سیستم قدرت نشان داده در شکل ۱۴ در محیط سیمولینک شبیه‌سازی می‌گردد. نحوه پیاده‌سازی سیستم در محیط سیمولینک MATLAB در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ نشان داده شده است.

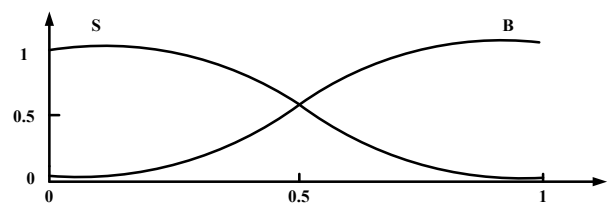


شکل ۱۴: شماتیک سیستم قدرت شبیه‌سازی شده

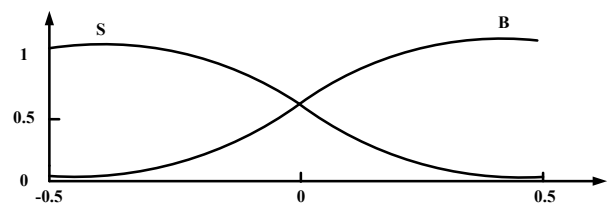
کسب اطلاع در ارتباط با نحوه تغییر توان اکتیو و راکتیو توسط مؤلفه ثابت k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 اولین قدم در طراحی یک کنترل‌کننده شارش توان هوشمند و برخط مبتنی بر منطق فازی می‌باشد. این سیگنال‌های ورودی کنترل‌کننده فازی خطای ΔP و ΔQ می‌باشد. این سیگنال‌ها از مقایسه توان اکتیو و راکتیو در خط انتقال نسبت به توان مرجع مطلوب (۱ پریونیت) محاسبه می‌شوند. سیگنال‌های خروجی نیز شامل مؤلفه ثابت k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 می‌باشد. همان‌طور که از شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد، توابع عضویت ورودی‌های کنترل‌کننده (سیگنال‌های خطای ΔP و ΔQ) به صورت مثلثی تعریف شده‌اند. مقادیر m_i ها بر اساس دامنه تغییرات سیگنال‌های ΔP و ΔQ و نیز دانش بهره‌بردار شبکه تعیین می‌گردد [۱۷].
 k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 مطابق شکل‌های ۱۱ و ۱۲ به صورت گوسی تعریف شده است. میزان و نحوه تأثیر تغییرات k_0 و k_2 بر روی توان اکتیو و راکتیو انتقالی که در بخش قبلی مورد مطالعه واقع شد، روابط بین ورودی و خروجی را در کنترل‌کننده فازی تعیین می‌نماید. قوانین استنتاج فازی برای تنظیم مقدار ثابت k_0 و دامنه هارمونیک دوم k_2 مطابق جداول ۱ و ۲ تعریف شده‌اند. قوانین استنتاج فازی بر مبنای استنتاج از وضعیت شارش توان با تغییر k_0 و k_2 در سیستم طراحی می‌شوند.



شکل ۱۰: توابع عضویت پیشنهادی برای سیگنال‌های ورودی ΔP و ΔQ

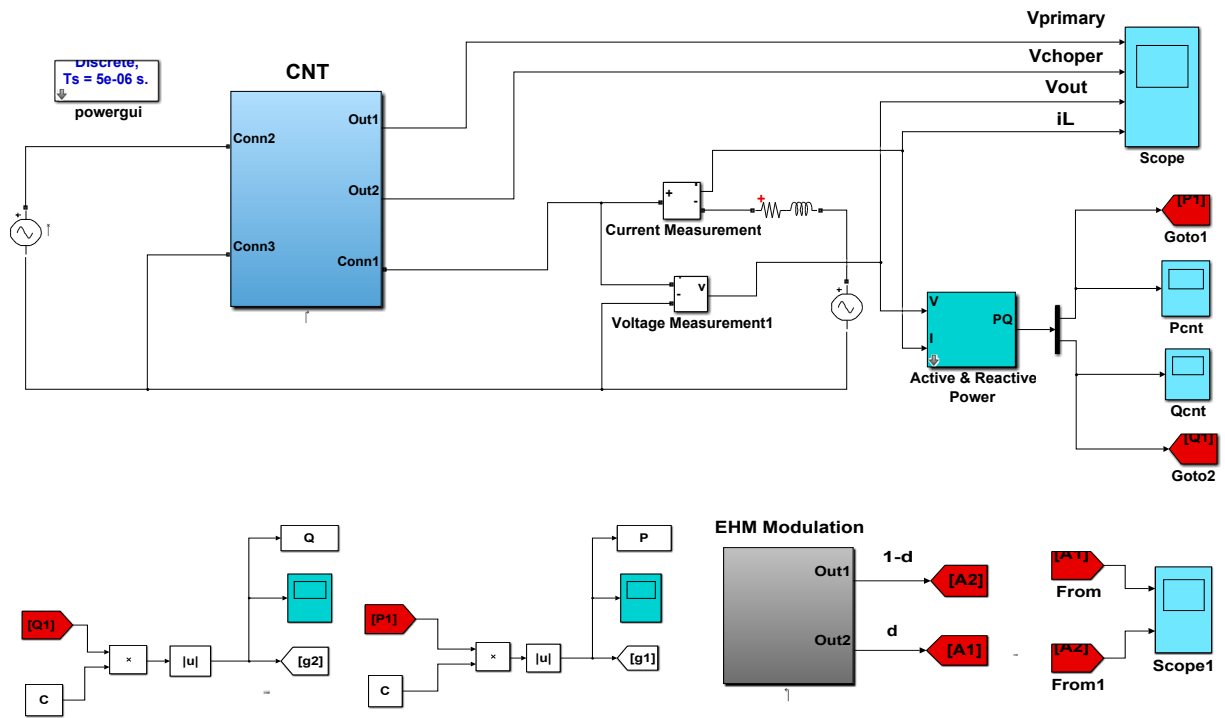


شکل ۱۱: توابع عضویت پیشنهادی برای سیگنال خروجی k_0

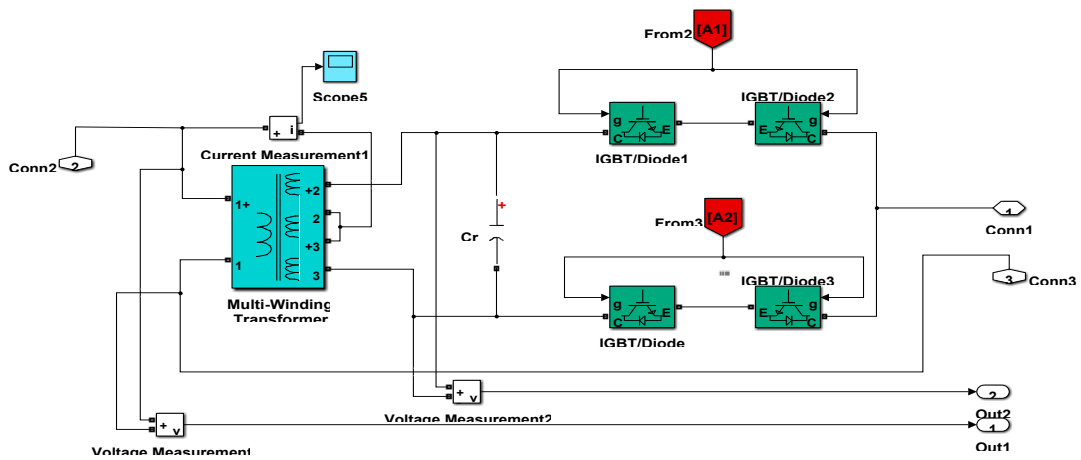


شکل ۱۲: توابع عضویت پیشنهادی برای سیگنال خروجی k_2

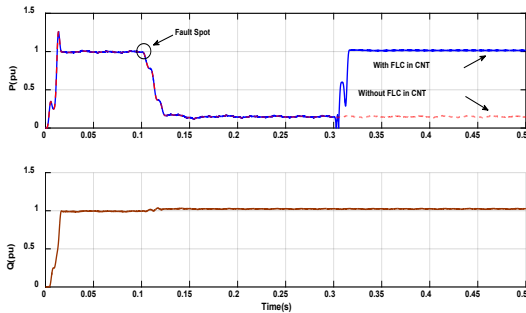
همان‌طور که در شکل شماره ۱۳ نشان داده شده است، خروجی‌های کنترل‌کننده پیشنهادی (k_0 و k_2) به مدار کلیدزنی اعمال می‌گردد تا در هنگام وقوع خطا و به هم خوردن شارش توان، سیستم دوباره حالت طبیعی خود را بازیابد.



شکل ۱۵: سیستم کلی شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک



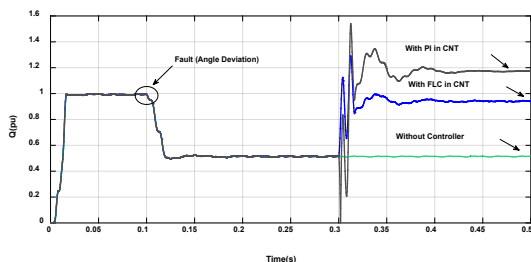
شکل ۱۶: زیر سیستم‌های CNT و EHM شبیه‌سازی شده در محیط سیمولینک



شکل ۱۹: کنترل توان اکتیو و راکتیو با استفاده از CNT بر اساس کنترل‌کننده فازی در هنگام وقوع خطای احتمالی (اضافه ولتاژ)

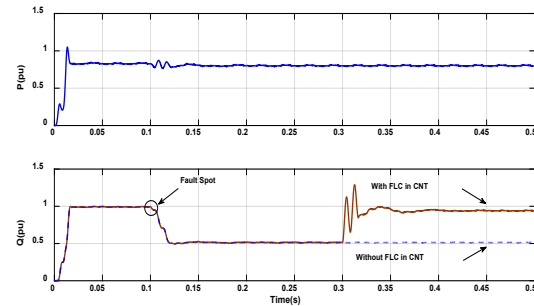
تفاوت منطق فازی با منطق کلاسیک در این است که منطق کلاسیک درستی یا نادرستی هر عبارتی را به صورت ۰ یا ۱ نشان می‌دهد؛ اما منطق فازی درستی یا نادرستی هر عبارتی را با مقداری بین ۰ تا ۱ بیان می‌دارد. ویژگی‌هایی که منطق فازی را از دیگر روش‌ها متمایز می‌کند عبارت‌اند از: «۱- فهم آسان، ۲- وابسته به تجربیات شخص خبره در مورد سیستم، ۳- مستقل از معادلات ریاضی سیستم و ۴- مناسب برای سیستم‌های به شدت غیرخطی»

در شبکه شکل ۱۴ به جای کنترل‌کننده فازی، کنترل‌کننده تناسبی (PI) جایگزین گردیده و نتایج به دست آمده با کنترل‌کننده فازی مقایسه می‌گردد. مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده PI برای حالات گوناگون خطا بایستی بازتنظیم گردد؛ در غیر این صورت پاسخ سیستم در قبال خطای ایجاد شده نه تنها بهبود نمی‌یابد بلکه تشدید نیز می‌گردد. در شکل ۲۰ هنگام ایجاد خطای اختلاف فاز ولتاژ که ضرایب ثابت کنترل‌کننده PI تنظیم شده‌اند، مشاهده می‌شود کنترل‌کننده تا حدودی پاسخگو می‌باشد. این در حالی است که در وقوع دیگر خطاها (افت یا اضافه ولتاژ) کنترل‌کننده PI بدون بازتنظیم ضرایب، کارکرد مناسبی را نشان نمی‌دهد. نتایج به دست آمده در شکل‌های ۲۱ و ۲۲ مشاهده می‌گردد. مشخص است که کنترل‌کننده پاسخگوی نیاز کنترلی سیستم نبوده و مقدار توان از یک پریونیت بسیار فاصله می‌گیرد. در مقابل، کنترل‌کننده فازی پیشنهادی برای خطاهای بررسی شده پاسخ مناسبی را ارائه می‌نماید. این رفتار کنترل‌کننده در کنار سادگی ساختار پیشنهادی به عنوان یک نقطه قوت مطرح می‌باشد.

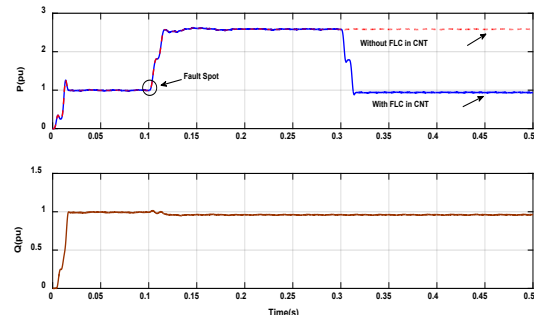


شکل ۲۰: مقایسه کنترل‌کننده فازی و PI در کنترل توان راکتیو با استفاده از CNT هنگام وقوع خطای احتمالی (تغییر فاز ولتاژ)

به‌منظور شبیه‌سازی خطای احتمالی در خط ارتباطی بین دو ناحیه مختلف از یک شبکه‌ی بزرگ سه سناریوی مختلف در نظر گرفته شده است. جهت مطالعه توان اکتیو و راکتیو سمت فرستنده، در ابتدا فرض می‌شود تحت شرایط خطای احتمالی اختلاف زاویه فاز بین دو باس از ۲ درجه به ۳ درجه تغییر می‌کند. به طریق مشابهی می‌توان فرض نمود سیستم تحت شرایط خطای احتمالی دچار افت یا اضافه ولتاژ به اندازه ۰/۲ پریونیت می‌شود. در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود که در زمان ۰/۱ ثانیه وقوع خطا در سیستم باعث تغییر اختلاف فاز بین دو باس می‌شود. این در حالی است که با وجود ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه توان اکتیو بلافاصله به حالت پایدار خود می‌رسد. مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده فازی پیشنهادی با تعیین نمودن تغییرات مورد نیاز در مدار کلیدزنی کانورتر AC-AC در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه، کنترل بسیار مناسبی بر شارش توان در شبکه داشته و آن را در مقادیر مرجع مشخص شده تثبیت می‌نماید. همچنین در شکل ۱۸ و ۱۹ مشاهده می‌شود که در زمان ۰/۱ ثانیه خطا در سیستم به ترتیب باعث افت و اضافه ولتاژ باس می‌شود. با وجود ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه توان راکتیو دچار نوسان اندکی شده و دوباره به حالت پایدار خود می‌رسد؛ اما توان اکتیو کاملاً تغییر نموده و از مقدار نامی خود فاصله می‌گیرد. فعال نمودن کنترل‌کننده پیشنهادی در زمان ۰/۳ ثانیه توان اکتیو را نیز در مقدار نامی خود تثبیت می‌کند.

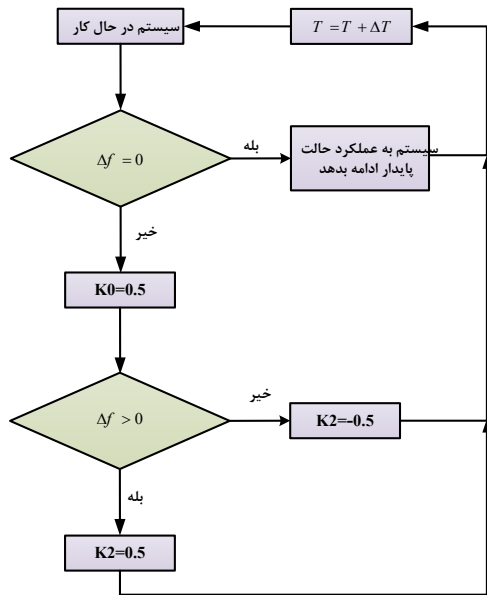


شکل ۱۷: کنترل توان اکتیو و راکتیو با استفاده از CNT بر اساس کنترل‌کننده فازی در هنگام وقوع خطای احتمالی (اختلاف فاز ولتاژ)



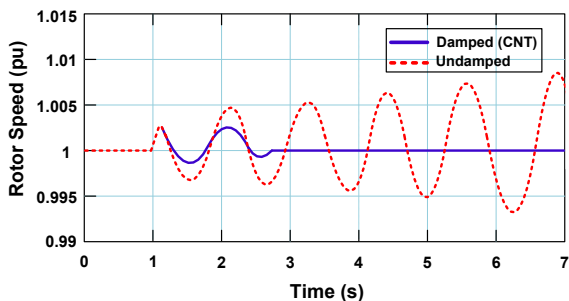
شکل ۱۸: کنترل توان اکتیو و راکتیو با استفاده از CNT بر اساس کنترل‌کننده فازی در هنگام وقوع خطای احتمالی (افت ولتاژ)

در این قسمت کنترل‌کننده فازی مورد استفاده در ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه با کنترل‌کننده متداول کلاسیک مقایسه می‌گردد.



شکل ۲۴: استراتژی کنترلی میراسازی نوسانات

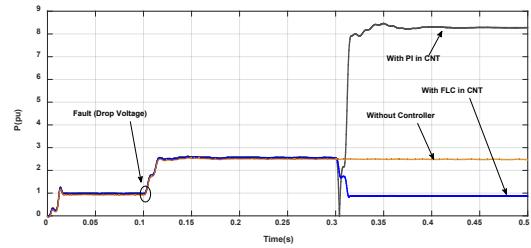
همان‌طور که در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود، هنگام وقوع خطا در باس ژنراتور، نوسانات سرعت ژنراتور با وجود ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه نسبت به حالت نبود آن در مدت زمان کوتاهی میرا می‌شود. مشاهده می‌شود که در صورت نبود این کنترل‌کننده، نوسانات با دامنه در حال افزایش به وجود آمده و سیستم را به سمت ناپایداری سوق می‌دهد. بنابراین، با حضور ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه، حالت دینامیکی شبکه بهبود می‌یابد.



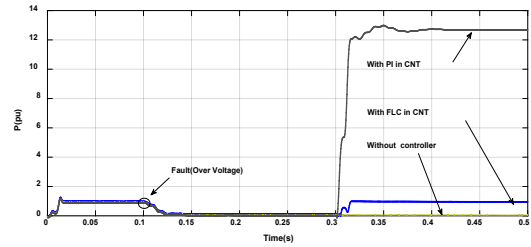
شکل ۲۵: میراسازی نوسانات سرعت ژنراتور در هنگام وقوع خطا

۷- پیشنهادات پژوهشی

تمرکز مطالعه انجام گرفته بر روی درک صحیحی از رفتار ضرایب مختلف کنترلی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه بر روی اکتیو و راکتیو عبوری از خط ارتباطی بین دو ناحیه از یک شبکه بوده است. نتایج حاصل از این مطالعه به‌عنوان مقدمات لازم جهت طراحی کنترل‌کننده‌های توان، ولتاژ و نیز میراساز نوسانات توان در سیستم‌های بزرگ و با دینامیک پیچیده‌تر مطرح می‌باشد. همچنین، در این سیستم‌ها مسئله جایابی بهینه ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه نیز مطرح است که تأثیر بسزایی در بهبود رفتار یک سیستم بزرگ دارد. مطالعه تأثیر ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه در انواع مختلف پایداری سیستم قدرت موضوع بسیار مهمی بوده که نیاز به مطالعه‌ای دقیق با در نظر گرفتن معیارهای مختلف پایداری دارد.



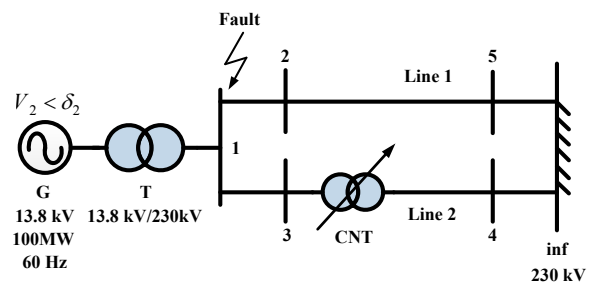
شکل ۲۱: مقایسه کنترل‌کننده فازی و PI در کنترل توان راکتیو با استفاده از CNT هنگام وقوع خطای احتمالی (افت ولتاژ)



شکل ۲۲: مقایسه کنترل‌کننده فازی و PI در کنترل توان راکتیو با استفاده از CNT هنگام وقوع خطای احتمالی (اضافه ولتاژ)

۶- بهبود پایداری دینامیکی شبکه با CNT

در این بخش تأثیرگذاری ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه در بهبود پایداری دینامیکی سیستم مورد بررسی به شکل اجمالی مطالعه می‌گردد. بدین منظور سیستم نشان‌داده‌شده در شکل ۲۳ مورد مطالعه واقع شده است. در این سیستم امپدانس خط ۱ دو برابر امپدانس خط ۲ می‌باشد. تحت شرایط بارگذاری فرض می‌شود در باس ژنراتور خطای تک‌فاز به زمین رخ می‌دهد. به دنبال این خطا، نوسانات دینامیکی در سیستم به‌وجود می‌آید. مبدل موجود در CNT دارای کلیدهای پرسرعتی می‌باشد که آن را به ابزاری بالقوه برای میرایی نوسانات تبدیل می‌کند. مطابق شکل ۹ مشاهده می‌شود که پارامتر k_2 تأثیر قابل‌توجهی بر روی توان اکتیو عبوری از CNT دارد. همچنین رابطه (۸) شرایط لازم برای جلوگیری از بیش‌مدولاسیون را بیان می‌کند. بنابراین به‌منظور میراسازی نوسانات، برای فراهم آوردن حداکثر درجه آزادی برای k_2 مقدار k_0 بر روی مقدار ثابت 0.5 تنظیم می‌شود. استراتژی کنترلی میراسازی نوسانات و بهبود پایداری به کمک CNT در شکل ۲۴ نشان داده‌شده است.



شکل ۲۳: ژنراتور متصل به شین بی‌نهایت

۸- نتیجه‌گیری

در این مقاله ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه و محدوده کنترلی آن برای شارش توان اکتیو و راکتیو مورد مطالعه واقع شد. در این راستا ضمن استخراج مدل ریاضی ترانسفورماتور کنترل‌پذیر شبکه، نحوه تغییر شارش توان اکتیو و راکتیو در خط با تغییر پارامترهای کنترلی آن مورد مطالعه واقع شد و ناحیه کنترلی این تجهیز به تفصیل بحث شد. بر این اساس، دانش مناسبی در ارتباط با نحوه کنترل هوشمند و زمان حقیقی این تجهیز مبتنی بر منطق فازی به دست آمد. خطاهای احتمالی مختلفی بر روی سیستم نمونه مورد ارزیابی واقع شد. بر اساس نتایج به دست آمده، کارکرد بسیار مناسب این تجهیز در کنترل شارش توان اکتیو و راکتیو در شبکه در پاسخ به تغییر فاز ولتاژ با دامنه آن مشاهده و نتیجه‌گیری شد. نتایج به دست آمده توانایی این تجهیز را در کنترل سیستم قدرت و حفظ پایداری آن در شرایط مختلف بهره‌برداری نشان می‌دهد.

مراجع

- [6] K.K. Sen, M.L. Sen, "Comparison of the SEN Transformer with the Unified Power Flow Controller", *IEEE Trans. on Power Deliv.* 1523–1533, Oct. 2003.
- [7] C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Mehraban, A. Edris, "AEP UPFC project: Installation, Commissioning and Operation of the ±160 MVA STATCOM (phase I)", *IEEE Trans. on Power Deliv.* 1530–1535, Oct. 1998.
- [8] S. Y. Kim, J. S. Yoon, B. H. Chang, and D. H. Baek, "The Operation Experience of KEPCO UPFC", In Proc. 8th Int. Conf. Elect. Machines Syst., vol. 3, pp.2502–2505, 2005.
- [9] P. Wood, V. Bapat, and R.P. Putkovich, "Study of Improved Load Tap-Changing for Transformers and Phase-Angle Regulators", *EPRI Report EL-6079*, Project 2763-1, 1988.
- [10] J. J. Marczewski, "VFT Applications Between Grid Control Areas", in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet*, pp. 1–4, Jun. 2007.
- [11] K. K. Sen, and M. L. Sen, "Versatile Power Flow Transformers for Compensating power Flow in a Transmission Line", U.S. Patents 6335613, 6384581, 6396248, and 6420856, 2002.
- [12] B. Bagen, D. Jacobson, G. Lane, and H. M. Turanli, "Evaluation of the Performance of Back-to-Back HVDC Converter and Variable Frequency Transformer for Power Flow Control in a Weak Interconnection", in *Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet*, pp. 1–6, Jun.2007.
- [13] D. Divan, J. Sastry, "Controllable Network Transformers", *Power Electronics Specialist Conference, PESC. IEEE*, pp 2340- 2345, 15-19 June 2008.
- [14] D. Divan and J. Sastry, "Voltage Synthesis Using Dual Virtual Quadrature Sources—A New Concept in AC Power Conversion", in *Proc. IEEE PESC*, pp. 2678–2684, Jun 2007.
- [15] K. K. Rasmina, P. Reji, "Performance Improvement in Transmission System Using Controllable Network Transformer ", *International Journal Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol.5, pp. 84-91, Issue:5, April 2016.
- [16] D. Das, R. P. Kandula, J. A. Munoz, D. Divan, R. G. Harley and Joe E. Schazt, "An Integrated Controllable Network Transformer-Hybrid Active Filter System", *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, vol. 51, no. 2 March April 2015.
- [۱۷] سعید هاشمی، سید قدرت‌اله سیف السادات، مرتضی رزاز، محمود جورابیان، «دسته‌بندی خطا و شناسایی فازهای تحت خطا در سیستم‌های قدرت با استفاده از تئوری امواج سیار و سیستم فازی»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۵، شماره ۴، صفحه ۲۲۳–۲۳۳، زمستان ۱۳۹۴.
- [1] D. Min, N. M. Mohammad, "Power Flow Control of a Single Distributed Generation Unit with Non Linear Local Load", *Power Systems Conference and Exposition, PES. IEEE*, pp 398-403 vol.1. 10-13 Oct. 2004.
- [2] K. K. Sen and M. L. Sen, "Introducing the Family of "Sen" Transformers: A Set of Power Flow Controlling Transformers", *IEEE Trans. on Power Del.*, vol. 18, no. 1, pp. 149–157, Jan. 2003.
- [۳] رهبر هوشی، مهرداد طرفدارحق، مهران صباحی، «جبران‌ساز خط به خط نسل جدیدی از ادوات FACTS»، *مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز*، دوره ۴۴، شماره ۱، صفحه ۵۷–۶۶، بهار ۱۳۹۳.
- [3] E. Ghahremani, I. Kamwa, "Optimal Placement of Multiple-Type FACTS Devices to Maximize Power System Loadability Using a Generic Graphical User Interface", *IEEE Trans. on Power Syst.* 764–778, Feb. 2013.
- [4] R.M.M. Pereira, C.M.M. Ferreira, F.B.M. Barbosa, "Comparative Study of STATCOM and SVC Performance on Dynamic Voltage Collapse of an Electric Power system with Wind Generation", *IEEE Trans. Lat. Am.* 138–145, March.2014.
- [5] N.G. Hingorani, "FACTS Technology-State of the Art, Current Challenges and the Future Prospects", *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.* 1–4. 2007.

زیر نویس‌ها

⁸ Static Compensator (STATCOM)

⁹ Thyristor Control Series Capacitor (TCSC)

¹ Static Synchronous Series Compensator (SSSC)

¹ Unified Power Flow Controller (UPFC)

¹ Voltage Regulating Transformer (VRT)

¹ Phase Shifting Transformer (PST)

¹ Sen Transformer (ST)

¹ Pulse Width Modulation (PWM)

¹ Dual Virtual Quadrature Source (DVQS)

¹ Tie Line

² Flexible AC Transmission System (FACTS)

³ On Load Tap Changing (OLTC)

⁴ Back To Back (BTB)

⁵ High Voltage DC (HVDC)

⁶ Controllable Network Transformer (CNT)

⁷ Static VAR Compensator (SVC)

-
- ¹ Insulator Gate Bipolar Transistor (IGBT) ⁷
 - ¹ Even Harmonic Modulation (EHM) ⁸
 - ¹ Proportional Integral (PI) ⁹