

جایابی مکان بهینه‌ی SVC و TCSC در شبکه‌های انتقال برق به کمک تخمین‌زن فازی با رویکرد افزایش پایداری استاتیکی ولتاژ

محمدعلی علیپور*

مریی، آموزشکده فنی و حرفه‌ای پسران داراب، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، فارس، ایران

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۰۹/۰۴ تاریخ پذیرش نهایی: ۱۳۹۶/۱۱/۲۵

چکیده

در سال‌های اخیر تقاضای انرژی الکتریکی روزبه‌روز در حال افزایش بوده است، در حالی که گسترش خطوط انتقال و افزایش ظرفیت تولید انرژی به‌علت محدودیت‌های محیطی و سیستمی، همسو با این افزایش تقاضا رشد نداشته است. در قبال این محدودیت‌ها، ادوات فکت نقش مهمی در عملکرد سیستم‌های قدرت دارند. از خانواده‌ی این وسایل کنترل سیستم‌های قدرت، می‌توان جبران‌کننده‌ی استاتیکی (SVC) و جبران‌کننده‌ی سری کنترل ترستور (TCSC) را نام برد که برای کاهش تلفات، پایداری استاتیکی ولتاژ، مدیریت تراکم خطوط انتقال و غیره استفاده می‌شوند. مسئله‌ی مهم در استفاده از این وسایل، تعیین مکان مناسب این تجهیزات است؛ زیرا در غیر این صورت، نتایج درست و مقبولی حاصل نمی‌شود. در این مقاله به کمک تخمین‌زن فازی محل مناسب SVC و TCSC را معلوم می‌کنیم تا پایداری استاتیکی ولتاژ در باس‌ها را افزایش دهیم. روش پیشنهادی به کمک نرم‌افزار Matlab و بسته‌ی نرم‌افزاری Matpower4 بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ باس IEEE آزمایش شده و نتایج مقبولی به‌دست داده است. برای مطالعه‌ی پایداری استاتیکی ولتاژ از اعمال پخش بار تداومی (cpf)^۱ به کمک روش نیوتن رافسون استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی

ادوات فکت، پایداری استاتیکی ولتاژ، پخش بار تداومی، تخمین‌زن فازی، روش نیوتن رافسون.

* نویسنده‌ی مسوول مکاتبات: alipour1352791@gmail.com

۱. مقدمه

سال‌هاست که در سیستم‌های قدرت، مسئله‌ی فروپاشی ولتاژ بخشی از نگرانی‌های صنایع الکتریکی بوده است. حوادث ناشی از فروپاشی و ناپایداری ولتاژ از موضوعات خیلی مهم در سراسر جهان است (Canizares, 1998). فروپاشی ولتاژ فرایندی تعریف می‌شود که در آن، اتفاقات مکرر همراه با ناپایداری ولتاژ سبب قطع یا کاهش غیرطبیعی ولتاژ در قسمت‌های مهم سیستم قدرت می‌شود، ولی ناتوانی سیستم قدرت در حفظ ولتاژ قابل قبول در همه‌ی باس‌ها، اختلالاتی در سیستم قدرت در پی خواهد داشت (kundur et al., 2004: 1387-1401). مثلاً در سیستم‌های قدرتی که مصرف‌کننده‌های زیادی را تغذیه می‌کنند، یا خطایی رخ داده است، یا کمبود توان راکتیو دارند، ناپایداری ولتاژ و در نهایت فروپاشی ولتاژ اتفاق می‌افتد (kundur et al., 2004: 1387-1401; Faur, 1996). نقطه‌ی فروپاشی ولتاژ به‌عنوان نقطه حداکثر بارگذاری سیستم‌های قدرت سیستم‌های قدرت شناخته می‌شود (Canizares, 1998). حد بارگذاری یک سیستم مقدار توانی است که سیستم بدون فروپاشی ولتاژ می‌تواند تأمین کند (Faur, 1996). بنابراین مسئله‌ی فروپاشی ولتاژ ارتباط نزدیکی با برنامه‌ریزی توان راکتیو دارد و برای افزایش امنیت سیستم قدرت از نظر فروپاشی ولتاژ، ذخیره‌ی توان راکتیو در سیستم در شرایط مناسب، ضروری است (Yorino et al., 2003: 3-10). از طرفی ادوات فکت به‌طور مستقیم یا با کنترل توان انتقالی از خطوط انتقال، کمک شایانی به بهبود عملکرد سیستم انتقال می‌کنند و پایداری سیستم قدرت را ارتقاء می‌بخشند (Zhang et al., 2007: 1819-1825). در سال‌های اخیر، تقاضای حداکثری مصرف و انتقال توان بین سیستم‌ها و تجهیزات، نگرانی‌ها درباره‌ی امنیت ولتاژ سیستم را دوچندان کرده است (-Ajarapu & Chisty, 1992: 423). عملکرد سیستم‌های قدرت همراه با افزایش تقاضای نیاز برق، در سراسر دنیا بسیار مهم می‌شود. افزایش این نیاز، سیستم‌های برق را وادار می‌کند تا به‌دلیل محدودیت‌های محیطی و اقتصادی نزدیک حد بحران کار کنند. از طرفی مصرف انرژی با ولتاژ و فرکانس قابل قبول و با حداقل هزینه توسط مصرف‌کنندگان، موضوعات مهمی در عملکرد سیستم‌های انتقال برق است. ضریب اطمینان و امنیت از جمله پارامترهای مهم برای سیستم‌های برق هستند که باید اعمال شوند. منظور از ضریب اطمینان این است که سیستم در صورت تغییر نیاز به انرژی، دارای منابع و ذخایر کافی باشد. منظور از امنیت این است که با بروز رویدادهای احتمالی، سیستم می‌تواند به حالت اولیه بازگردد و همان خدمات را با همان کیفیت ارائه دهد. همه این اهداف با برنامه‌ریزی درست، و کنترل سیستم‌های تولید و انتقال برق قابل تحقق است. از آنجا که واحدهای تولید و انتقال باید در محدوده‌های بحران عمل کنند، مسائل ناپایداری ولتاژ در سیستم برق زمانی روی می‌دهد که نیاز به انرژی افزایش یابد و واحدهای تولید، پاسخگو نباشند. ناپایداری ولتاژ یکی از مسائل اصلی در سیستم‌های برق است. در مورد ناپایداری ولتاژ، باید گفت که ولتاژ

همه یا تعدادی از باس بارها به دلیل دریافت توان ناکافی، کاهش می‌یابند. در مورد ایجاد پایداری ولتاژ در زمان ناپایداری، خاموشی‌های جدی در بخش بزرگی از یک سیستم روی می‌دهد (Larsson, 2000). این خاموشی‌ها می‌تواند موجب بروز مسائل اقتصادی و اجتماعی شود. در واقع بیش از ۵۰ مورد بی‌ثباتی یا افت ولتاژ در سراسر جهان بین سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۹۶ گزارش شد. برای مثال افت ولتاژ در سیستم برق شمال آمریکا در دوم جولای ۱۹۹۶ موجب قطع و توقف خدمات‌رسانی به بیش از شش میلیون نفر شد (همان). رایج‌ترین روش‌های تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ، روش پخش بار تداومی، نقطه‌ی شکست، حداقل مقدار منفرد، و روش‌های بهینه‌سازی است. با رشد و پیشرفت سریع سیستم انتقال، خصوصاً استفاده‌ی روزافزون از امکانات انتقال به دلیل افزایش تولید صنایع، لازم است روش‌های جدید افزایش انتقال برق را با امکانات موجود در سیستم‌های انتقال کشف کرده و سطوح ضریب اطمینان و پایداری را حفظ کنیم. به عبارتی، رشد و پیشرفت سریع فناوری برق سبب تولید FACTS^۲ (سیستم انتقال AC انعطاف‌پذیر) شد. این سیستم بهترین سیستم برق در آینده است. کنترل‌کننده‌های FACTS اعم از جبران‌کننده‌ی همزمان استاتیکی (STATCOM^۳)، جبران‌کننده‌ی استاتیکی (SVC^۴)، جبران‌کننده‌ی سری کنترل‌تریستور (TCSC^۵)، جبران‌کننده‌ی سری همزمان استاتیکی (SSSC^۶) و کنترل‌کننده‌ی جریان برق (UPFC^۷) از جمله سیستم‌هایی هستند که می‌توانند پارامترهای شبکه را به سرعت و به روش مؤثری تغییر دهند و عملکرد سیستم را بهینه سازند (Hingorani & Gyugyi, 1999; Acha et al., 2004; Edris, 2000: 4-9; Marthur & Varma, 2002). این کنترل‌کننده‌ها برای تقویت عملکرد دینامیکی سیستم‌های برق برحسب ثبات زاویه/ولتاژ، ضمن بهبود قابلیت انتقال توان و پروفایل ولتاژ در شرایط حالت پایدار استفاده می‌شوند (Kirschner et al., 2005, 1-7; Yan & Chanan, 2001: 944-948; Perez et al., 2000: 1115-1120; Xingbin et al., 2003: 73-78; Pilotto et al., 1997: 364-371).

سیستم جبران‌کننده‌ی استاتیکی SVC، نوعی کنترل‌کننده بر مبنای راکتور TCR^۸ است. SVC برای تنظیم ولتاژ استفاده می‌شود (Hassan & Cheng, 2009). SVC به‌عنوان عناصر جبران‌کننده‌ی موازی برای حفظ ولتاژ باس‌ها استفاده می‌شوند و حد بارگذاری سیستم را افزایش می‌دهند. TCSCها خازن‌های سری هستند که همراه با سیستم کنترلی خود برای تغییر راکتانس سری خط، سبب کاهش تلفات راکتیو خط و تثبیت ولتاژ و افزایش حد بارپذیری سیستم می‌شوند؛ بنابراین در خطوط انتقالی که با افزایش بار کار می‌کنند، استفاده می‌شوند (Mollazai et al., 2007; Mínguez et al., 2007).

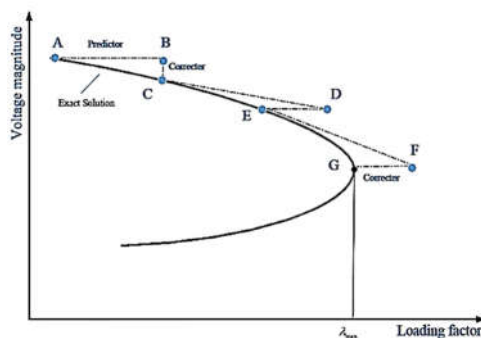
سیستم کنترل‌کننده‌ی یکنواخت توان (UPFC) از طریق توان واکنشی و کنشی قادر به کنترل است. از میان سیستم‌های FACTS، سیستم UPFC سیستمی بسیار ساده و روان است که می‌توان از آن در بهبود

پایداری حالت دائمی، پایداری دینامیکی و پایداری موقتی و گذرا استفاده کرد (Saadat, 2004). UPFC سیستمی است که می‌تواند با سه پارامتر الکتریکی عمل کند: ولتاژ خط، مقاومت ظاهری خط و زاویه‌ی فاز که این پارامترها توان انتقالی را تعیین می‌کنند. در سیستم‌های قدرت، در عمل، باس‌های مختلف سیستم، حساسیت‌های متفاوتی به پایداری ولتاژ در سراسر سیستم قدرت دارند. بعضی از باس‌ها حساسیت کمتر و بعضی حساسیت بیشتری دارند. مکان مناسب ادوات فکت می‌تواند پایداری ولتاژ را بهبود ببخشد (Zhang et al., 2007: 1819-1825). از این رو معیارهای متفاوتی برای تعیین مکان مناسب این ادوات استفاده و پیشنهاد می‌شود (Mansour et al., 1994: 757-763; Pilotto et al., 1997: 364-371; Verma, 2005; Sharma, 2006; Farsangi et al., 2006: 274-279).

این مقاله بر مکان‌یابی SVC و TCSC به کمک تخمین‌زن فازی برای پایداری استاتیکی ولتاژ باس‌ها متمرکز می‌شود. در قسمت ۲، پخش بار تداومی و در قسمت ۳ پایداری ولتاژ بررسی می‌شود. در قسمت ۴ عوامل موثر بر پایداری ولتاژ را بیان می‌کنیم. در قسمت ۵ فروپاشی ولتاژ را شرح می‌دهیم. در بخش ۶ به مدل‌های SVC و TCSC پرداخته شده است. قسمت ۷ به تخمین‌زن فازی اختصاص دارد. در قسمت ۸ نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های ۱۴ و ۳۰ باس و در نهایت در قسمت ۹ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری خواهیم داشت.

۲. پخش بار تداومی

در پخش بار مرسوم، ماتریس ژاکوبین در محدوده‌ی پایداری ولتاژ، منفرد می‌شود که برای حل این مشکل از پخش بار تداومی استفاده می‌شود (Ajarapu & Christy, 1992). شکل ۱ طرح پیش‌بینی‌کننده - اصلاح‌کننده در حین پخش بار تداومی را نشان می‌دهد.



شکل ۱. طرح پیش‌بینی‌کننده - اصلاح‌کننده در حین پخش بار تداومی (Sarvi & Marefatjou, 2012: 803-809)

معادله‌های استفاده شده در پخش بار نیوتن - رافسون به صورت زیر نوشته می‌شوند:

$$P_i - \sum_{h=1}^N Y_{ij} V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (1)$$

$$Q_i - \sum_{h=1}^N Y_{ij} V_i V_j \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

معادله‌ی جدید پخش بار با در نظر گرفتن ضریب بار به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{Li} = P_{L0} + \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \cos \Phi_i) \quad (3)$$

$$Q_{Li} = Q_{L0} + \lambda(K_{Li} S_{\Delta base} \sin \Phi_i) \quad (4)$$

که P_{L0} و Q_{L0} به ترتیب میزان بار اکتیو و راکتیو اصلی در باس آم و λ پارامتر بار است. K_{Li} ضریبی است که همزمان با تغییر λ درصد تغییر بار را در باس آم مشخص می‌کند. $S_{\Delta base}$ کمیتی فرضی است که برای درجه‌بندی مقیاس و λ استفاده می‌شود. $\cos \Phi_i$ و $\sin \Phi_i$ به ترتیب ضریب توان اکتیو و راکتیو بار در باس آم هستند.

معادله‌ی پخش بار به صورت زیر نوشته می‌شود:

$$F(\partial, V, \lambda) = 0 \quad (5)$$

پس توان تولیدی اکتیو در باس آم به صورت معادله‌ی زیر بیان می‌شود:

$$P_{Gi} = P_{G0} + (1 + \lambda K_{Gi}) \quad (6)$$

P_{G0} و P_{Gi} به ترتیب مقدار اولیه‌ی توان اکتیو تولیدی و توان اکتیو تولیدی در باس آم و K_{Gi} ضریب ثابتی است که نرخ تغییرات تولید را بیان می‌کند. برای حل این مسئله، الگوریتم تداومی از مقدار معینی شروع می‌شود و از طرح پیش‌بینی‌کننده - اصلاح‌کننده برای یافتن راه‌حل‌هایی در سطوح مختلف بار استفاده می‌کند (Kalaivani & Kamaraj, 2011: 144-154).

۳. پایداری و لتاژ

پایداری سیستم قدرت را می‌توان به دو نوع تقسیم کرد: پایداری و لتاژ و پایداری زاویه، پایداری زاویه‌ی روتور، توان ماشین‌ها یا سیستم‌های سنکرون به هم متصل از یک سیستم قدرت است که در حالت سنکرون باقی می‌ماند (Kundur, 1994). در این نوع پایداری، معادلات زاویه - توان به راحتی حل می‌شوند؛ زیرا توان خروجی یک ماشین سنکرون با نوسان روتور، تغییر می‌کند. پایداری و لتاژ، توانایی یک

سیستم قدرت به حفظ ولتاژهای مطلوب در همه‌ی باس‌های در شرایط نرمال و بعد از خرابی است (همان). پایداری ولتاژ با تولید و انتقال انرژی کافی تحقق می‌یابد. واحدهای تولید و انتقال ظرفیت‌های مشخصی دارند. این ظرفیت‌ها نباید در سیستم قدرت سالم و ایمن از حد متعارف تجاوز کند. مسئله‌ی پایداری ولتاژ زمانی مطرح می‌شود که سیستم به شدت بارگیری شده باشد و همین، ظرفیت سیستم برق را از حد متعارف خارج می‌کند. سیستم برق زمانی وارد حالت بی‌ثباتی ولتاژ می‌شود که خرابی سیستم، افزایش مصرف، یا تغییر شرایط سیستم موجب افت پی در پی و کنترل‌ناپذیر ولتاژ شود. عامل اصلی که موجب ناپایداری ولتاژ می‌شود، ناتوانی سیستم قدرت در رفع نیاز توان راکتیو بارهاست (همان).

۴. عوامل تأثیرگذار بر پایداری ولتاژ

دلیل اصلی ناپایداری ولتاژ، کافی نبودن توان راکتیو در یک سیستم است که محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتور و نیاز توان راکتیو در خطوط انتقال از دلایل اصلی آن است.

۴-۱. محدودیت‌های توان راکتیو ژنراتورها

ژنراتورهای سنکرون، سیستم‌هایی برای کنترل ولتاژ و کنترل توان راکتیو در سیستم‌های برق محسوب می‌شوند. در زمان تحلیل و آنالیز پایداری ولتاژ، قیود توان اکتیو و راکتیو ژنراتورها نقش مهمی دارند. جمله دلایل محدودیت توان راکتیو جلوگیری از صدمه رسیدن به سیم‌پیچ‌های تحریک و استاتور است که محدودیت جریان استاتور و محدودیت جریان تحریک را در پی خواهد داشت (Repo, 2001).

۴-۲. خطوط و مدارهای انتقال

انتقال توان اکتیو و راکتیو با خطوط و مدارهای انتقال صورت می‌گیرد. از آنجا که مدارهای انتقال عموماً طویل هستند، انتقال توان راکتیو با این مدارها به دلیل نیاز توان راکتیو، بسیار دشوار است (Ajjarapu & Christy, 1992: 423-426).

۵. فروپاشی ولتاژ

فروپاشی ولتاژ فرایندی است که رویدادهایی همراه با بی‌ثباتی مکرر ولتاژ، به کاهش ولتاژ در بخشی از سیستم منجر می‌شود. زمانی که سیستم قدرت تحت افزایش ناگهانی نیاز به توان راکتیو قرار گیرد، این نیاز با ذخایر توان راکتیو که از ژنراتورها و سیستم‌های جبران تأمین می‌گردد، رفع می‌شود. بیشتر اوقات،

این کار زمانی اعمال می‌شود که ذخایر کافی موجود باشد. گاهی، امکان رفع این نیاز به‌دلیل ترکیب رویدادها و شرایط سیستم وجود ندارد، از این‌رو فروپاشی ولتاژ و قطع همه یا قسمتی از سیستم روی می‌دهد (Kundur, 1994). برخی ابزارها چون تنظیم‌کننده‌ی اتوماتیک ولتاژ (AVRs) و تپ چنجر ترانسفورماتورهای قدرت، برای جبران کاهش توان راکتیو استفاده می‌شود. امروزه با پیشرفت الکترونیک قدرت، برای جبران توان راکتیو مورد نیاز ادوات فکت به‌کار برده می‌شود (Hingorani & Gyugyi, 1999; Acha et al., 2004; Edris, 2000: 4-9; Marthur & Varma, 2002).

۶. مدل‌های SVC و TCSC

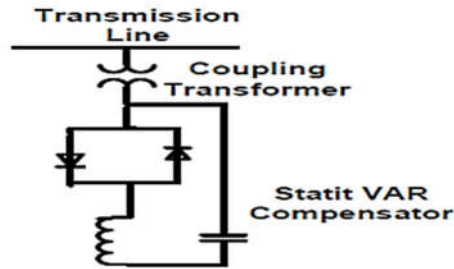
۶-۱. جبران‌کننده‌ی استاتیکی ولت آمپر راکتیو (SVC)

سیستم جبران‌کننده‌ی استاتیکی SVC، سیستمی الکتریکی است که در شبکه‌ی انتقال با ولتاژ بالا، توان راکتیو را با عملکرد سریع تأمین می‌کند (Deb, 2000; Song, & Johns, 1999). آنها از خانواده‌ی ادوات فکت هستند که ولتاژ را تنظیم و سیستم را پایدار می‌کنند (Hingorani & Gyugyi, 1999; Ryan, 2001: 160-161). برخلاف کندانسور سنکرون، سیستم جبران‌کننده‌ی SVC هیچ بخش متحرکی (غیر از دنده کلید) ندارد. قبل از اختراع SVC، جبران ضریب توان به کمک کندانسورهای سنکرون یا بانک‌های خازن انجام می‌شد. SVC یک سیستم اتومات تطبیق‌دهنده‌ی مقاومت ظاهری است که برای نزدیک کردن سیستم به ضریب توان واحد طراحی شده است. SVCها در دو مکان از سیستم قدرت استفاده می‌شوند:

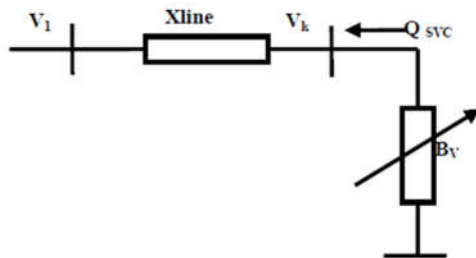
۱. متصل به سیستم‌های قدرت جهت تنظیم ولتاژ انتقال (SVC انتقال)؛

۲. نصب در نزدیک بارهای صنعتی بزرگ برای اصلاح ضریب توان (SVC صنعتی).

در کاربردهای سیستم انتقال، SVC ولتاژ شبکه را تنظیم می‌کند. اگر توان راکتیو سیستم از نوع خازنی باشد، SVC از راکتورهای که با تریستور کنترل می‌شوند برای مصرف توان راکتیو استفاده می‌کند و ولتاژ سیستم را کاهش می‌دهد. در شرایط بارگذاری القایی سیستم انتقال، بانک خازن به‌طور اتوماتیک راه‌اندازی می‌شود و از این طریق ولتاژ سیستم را افزایش می‌دهد. با اتصال راکتوری که با تریستور کنترل می‌شود و پیوسته تغییر می‌کند، همراه با بانک خازنی پله‌ای، به‌طور پیوسته توان راکتیو خازنی و سلفی تولید می‌کند. شکل ۲ مدل الکتریکی SVC را نشان می‌دهد. در این مقاله از حالت خازنی SVC استفاده شده که بلوک دیاگرام در شکل ۳ نشان داده شده است.



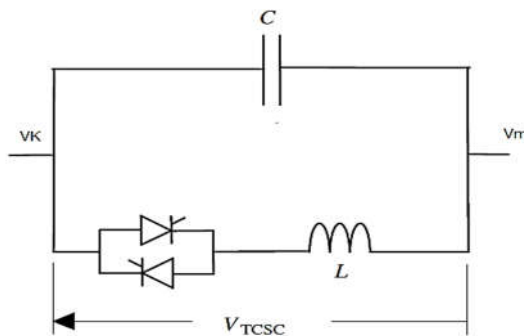
شکل ۲. مدل الکتریکی SVC (Sarvi & Marefatjou, 2012: 803-809)



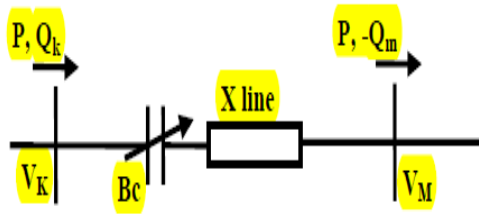
شکل ۳. بلوک دیاگرام یک SVC در مود خازنی

۲-۶. خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)

خازن سری کنترل شده با تریستور می‌تواند برای کاهش راکتانس سری خط برای تثبیت ولتاژ در سمت دریافت توان و همچنین برای جلوگیری از شکست ولتاژ استفاده شود. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب مدل الکتریکی و بلوک دیاگرام آن را نشان می‌دهند



شکل ۴. مدل الکتریکی یک TCSC (Kundur, 1994)



شکل ۵. بلوک دیاگرام یک TCSC (همان)

۷. تخمین‌زن فازی استفاده شده

در این تحقیق از یک سیستم فازی برای تعیین مکان مناسب SVC و TCSC استفاده شد. هدف اصلی از این جایابی، بهبود پایداری استاتیکی ولتاژ در سیستم انتقال انرژی الکتریکی است. ورودی‌های سیستم فازی تحت مطالعه در مورد SVC و TCSC با هم فرق می‌کنند، هر چند خروجی سیستم فازی مکان مناسب این ادوات است اما در اینجا به‌طور جداگانه بررسی می‌شوند.

۷-۱. تخمین‌زن فازی برای تعیین مکان مناسب SVC

برای این تخمین‌زن از یک سیستم فازی از نوع ممدانی استفاده شده است که به روش مرکز ثقل نافازی می‌شود و برای ترکیب استلزام‌ها از قاعده‌ی min-max استفاده شده است که ورودی‌های آن عبارت‌اند از: (۱) اندازه‌ی ولتاژ باس‌ها؛ (۲) توان ظاهری تزریقی به هر باس و (۳) ضریب حساسیت تلفات خطوط انتقال نسبت به تزریق توان راکتیو به باس‌ها. خروجی آن همان مکان مناسب SVC است. اندازه‌ی ولتاژ باس‌ها و توان تزریقی به هر باس به کمک پخش بار نیوتن - رافسون محاسبه می‌شود و ضریب حساسیت تلفات خطوط نسبت به تزریق توان راکتیو از معادله‌ی زیر به‌دست می‌آید.

ضریب حساسیت تلفات در واقع از مساوی صفر قرار دادن نسبت تغییرات تلفات انتقال به تغییرات تزریق توان راکتیو به باس به‌دست می‌آید. ارتباط تلفات خط انتقال به توان اکتیو و راکتیو تزریقی به باس طبق فرمول ۷ است (Bhattacharya et al., 2001).

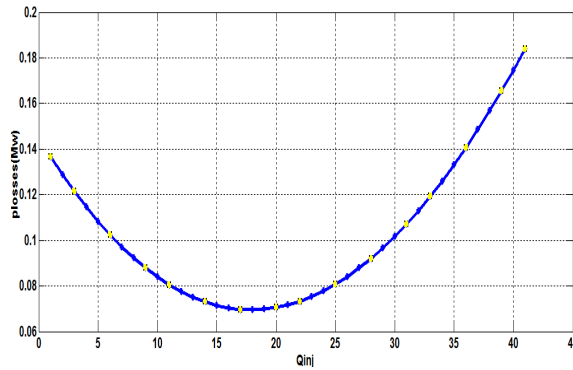
$$P_L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n [\alpha_{i,j} (P_i P_j + Q_i Q_j) + \beta_{i,j} (P_i Q_j - P_j Q_i)] \quad (7)$$

در فرمول ۷، P_i ، Q_i توان‌های اکتیو و راکتیو تزریقی به باس‌ام است و ضرایب α ، β طبق روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند.

$$\alpha_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (۸)$$

$$\beta_{ij} = \frac{r_{ij}}{v_i v_j} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (۹)$$

δ_i و r_{ij} به ترتیب زاویه‌ی ولتاژ باس i ام و مقاومت اهمی بین خط i زا است. براساس فرمول ۷، تلفات نسبت به توان راکتیو تزریقی از مرتبه‌ی دو است که نمودار آن مطابق شکل ۶ یک سهمی را تشکیل می‌دهد؛ پس در یک نقطه از این منحنی با تزریق توان راکتیو تلفات حداقل است.



شکل ۶. تغییرات تلفات کل سیستم با تغییر تزریق توان راکتیو به یک باس

با گرفتن مشتق و مساوی صفر قرار دادن مشتق، رابطه‌ی حساسیت تلفات به دست می‌آید که مطابق فرمول ۱۰ است.

$$SensL_i = \frac{\partial PL}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^m (\alpha_{ij} Q_j + \beta_{ij} P_j) \quad (۱۰)$$

در فرمول ۱۰، $SensL_i$ ضریب حساسیت تلفات است.

ورودی‌های تخمین‌زن فازی مطابق فرمول زیر نرمالیزه شده و سپس به تخمین‌زن اعمال می‌شوند.

$$y^{normaliz}(i) = \left(\frac{\max(y) - y(i)}{\max(y) - \min(y)} \right) \quad (۱۱)$$

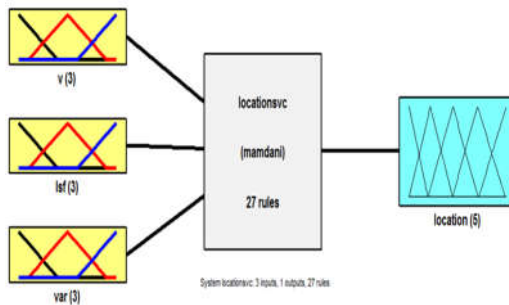
در فرمول ۱۱، y یک ورودی است که عنصر i ام آن نرمالیزه شده است.

هر کدام از ورودی‌ها و خروجی‌های تخمین‌زن به کمک توابع عضویتی به شرح زیر مدل می‌شوند:

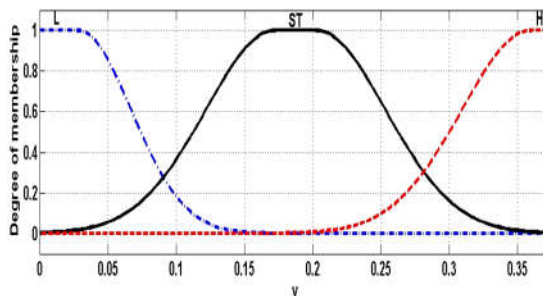
- متغیر ورودی ولتاژ باس‌ها دارای سه عضویت L و ST و H از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر ورودی ضریب حساسیت تلفات دارای سه عضویت N و Z و P از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر ورودی اندازه‌ی توان ظاهری تزریقی دارای سه عضویت L و ST و H از نوع زنگوله‌ای؛
- متغیر خروجی موقعیت SVC که دارای عضویت‌هایی به صورت L_m و m و n و m_z و vm_z است و از نوع مثلثی.

قوانین فازی حاکم بر سیستم استنتاج فازی که از نوع ممدانی است به صورت if- then هستند که پس از اعمال ورودی‌ها به FIS، خروجی مکان مناسب SVC را می‌دهد که خروجی بزرگ‌تر، مکان مناسب‌تر SVC است. L و ST و H به ترتیب به مفهوم کم و ثابت و زیاد و N و Z و P به ترتیب به مفهوم منفی و صفر و مثبت و L_m و m و n و m_z و vm_z به ترتیب به احتمال خیلی کم، احتمالاً، غیرممکن، به احتمال زیاد و به احتمال خیلی زیاد است.

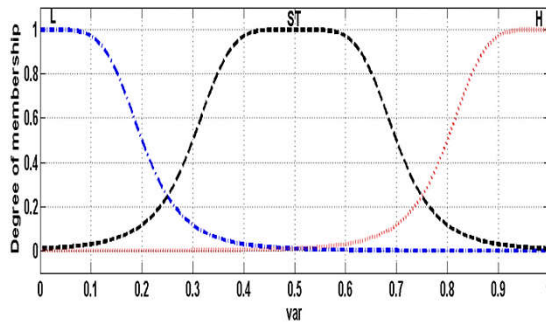
شکل‌های ۷ تا ۱۱، FIS و توابع عضویت‌های حاکم بر تخمین‌زن فازی را نشان می‌دهند.



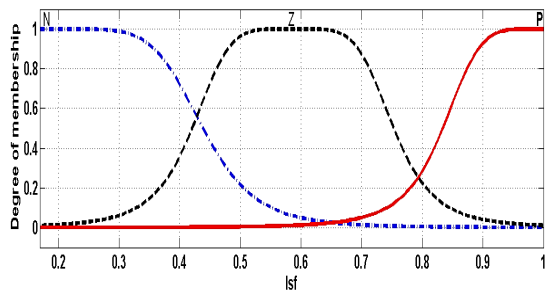
شکل ۷. FIS به کار گرفته شده



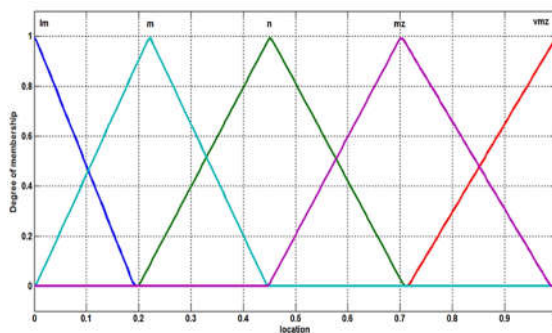
شکل ۸. تابع عضویت برای ورودی اندازه ولتاژ باس‌ها



شکل ۹. تابع عضویت برای ورودی اندازه‌ی توان ظاهری تزریقی باس‌ها



شکل ۱۰. تابع عضویت برای ورودی ضریب حساسیت تلفات راکتیو



شکل ۱۱. تابع عضویت برای خروجی تخمین‌زن فازی که موقعیت SVC را نشان می‌دهد.

۲-۷. تخمین‌زن فازی برای تعیین مکان مناسب TCSC

برای این تخمین‌زن از یک سیستم فازی از نوع ممدانی استفاده شده است که به روش مرکز ثقل نافازی می‌شود و برای ترکیب استلزام‌ها از قاعده‌ی min-max استفاده شده است که ورودی‌های آن عبارت‌اند از

(۱) مجموع ولتاژ باس‌ها با جابه‌جا کردن TCSC در هر خط انتقال؛ (۲) مجموع تلفات خطوط انتقال با جابه‌جا کردن TCSC در هر خط انتقال و خروجی تخمین‌زن مکان مناسب TCSC است. ورودی‌های مورد نظر مطابق فرمول‌های زیر محاسبه می‌شوند.

فرض کنیم TCSC در خط k ام نصب باشد؛ آن‌گاه مجموع ولتاژ باس‌ها و مجموع تلفات خطوط انتقال به‌ازای این TCSC را به‌صورت زیر به کمک پخش بار محاسبه می‌کنیم:

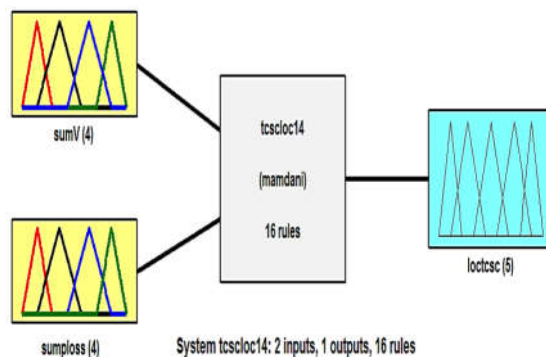
$$\text{sum}(V_k) = \sum_{i=1}^{nbus} V_i \quad (12)$$

$$\text{sum}(Ploss_k) = \sum_{j=1}^{nline} ploss_j \quad (13)$$

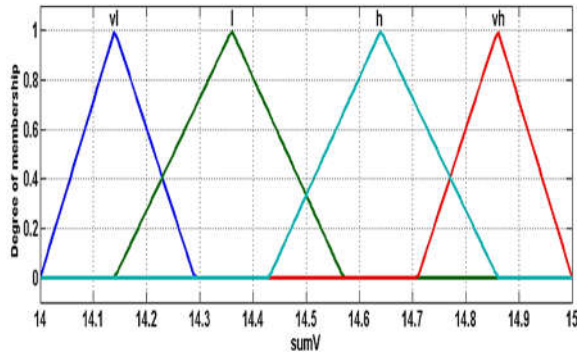
هرکدام از ورودی‌ها و خروجی‌های تخمین‌زن به کمک توابع عضویتی به‌شرح زیر مدل می‌شوند:

- مجموع ولتاژ باس‌ها نسبت به نصب TCSC در خط k ام با چهار عضویت VI-I-h-Vh به‌ترتیب مخفف خیلی زیاد، زیاد، کم و خیلی کم؛
- مجموع تلفات خطوط انتقال نسبت به نصب TCSC در خط k ام با چهار عضویت VI-I-h-Vh به‌ترتیب مخفف خیلی زیاد، زیاد، کم و خیلی کم؛
- خروجی که همان مکان TCSC است با ۵ تابع عضویت V_{hp} و hp و p و lp و v_{lp} که به‌ترتیب، احتمال خیلی زیاد، احتمال زیاد، احتمالاً، احتمال کم و احتمال خیلی کم را بیان می‌کنند.

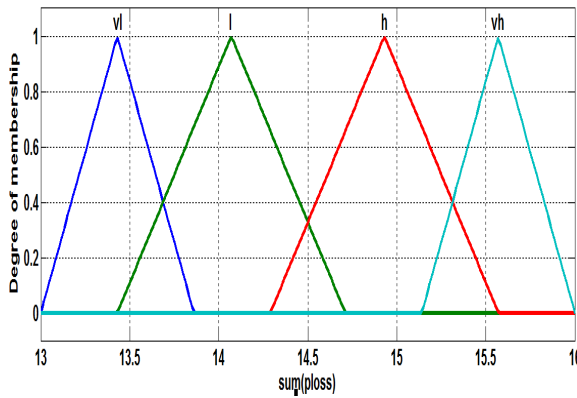
شکل‌های زیر توابع عضویت‌ها و قوانین حاکم بر تخمین‌زن فازی را نشان می‌دهند.



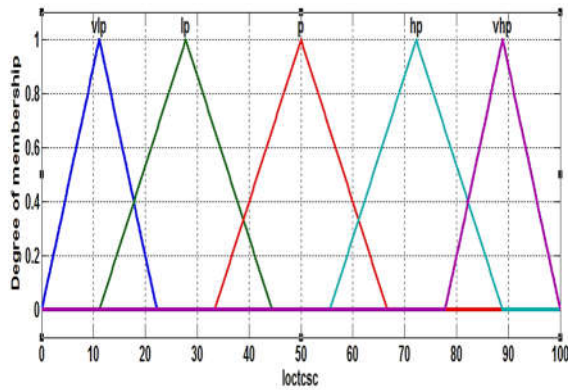
شکل ۱۲. FIS به کار گرفته شده



شکل ۱۳. تابع عضویت برای ورودی مجموع ولتاژ باس‌ها برای شبکه‌ی ۱۴ باس



شکل ۱۴. تابع عضویت برای ورودی تلفات حقیقی خط برای شبکه‌ی ۱۴ باس



شکل ۱۵. تابع عضویت برای خروجی تخمین‌زن فازی که موقعیت TCSC را نشان می‌دهد.

۸. نتایج شبیه‌سازی

۸-۱. تخمین مکان مناسب SVC و TCSC

۸-۱-۱. سیستم ۱۴ باس IEEE

اطلاعات این شبکه در مرجعی (Zimmerman & Murillo-Sanchez, 2007) آمده است. این شبکه از ۵ ژنراتور و ۲۰ خط انتقال تشکیل شده است که دارای ۱۱ باس بار است. کل تولید در این سیستم 272.4+78.5j مگاوات آمپر و کل بار شبکه 259+77.4j مگاوات آمپر است. مکان مناسب SVC و TCSC با توجه به تخمین‌زن‌های فازی طراحی شده در قسمت قبل، به ترتیب در باس ۹ و خط ۱۴ است. جدول‌های ۱ و ۲ خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط و هر باس را نشان می‌دهند. در این جدول‌ها مکان مناسب ادوات به‌ازای بیشترین درصد تخمین تعیین می‌شود که به‌صورت پررنگ در جدول‌ها نشان داده شده است.

جدول ۱. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط در شبکه‌ی ۱۴ باس (مکان TCSC)

شماره‌ی خط	از باس-به باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۱-۲	۵۰
۲	۱-۵	۵۰
۳	۲-۳	۷۲/۲۱۷۹
۴	۲-۴	۵۰
۵	۲-۵	۵۹/۱۹۷۷
۶	۳-۴	۷۲/۲۱۹۰
۷	۴-۵	۷۲/۲۱۹۲
۸	۴-۷	۷۲/۲۱۹۵
۹	۴-۹	۷۲/۲۱۸۹
۱۰	۵-۶	۷۲/۲۱۵۷
۱۱	۶-۱۱	۷۲/۲۱۸۳
۱۲	۶-۱۲	۷۲/۲۱۹۶
۱۳	۶-۱۳	۷۲/۲۱۷۸
۱۴	۷-۸	۷۴/۱۲۵
۱۵	۷-۹	۷۲/۲۱۷۹
۱۶	۹-۱۰	۷۲/۲۱۹۴
۱۷	۹-۱۴	۷۲/۲۱۹۷
۱۸	۱۰-۱۱	۷۲/۲۱۹۲
۱۹	۱۲-۱۳	۷۲/۲۱۹۰
۲۰	۱۳-۱۴	۷۲/۲۱۹۴

جدول ۲. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر باس در شبکه‌ی ۱۴ باس (مکان SVC)

شماره‌ی باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۱۷/۶۰۱۵
۲	۶۳/۷۹۶۵
۳	۴۵/۲۳۸۸
۴	۲۹/۸۵۹۹
۵	۲۹/۵۰۰۸
۶	۳۷/۵۷۲۲
۷	۴۷/۳۶۶۷
۸	۳۰/۱۷۹۴
۹	۹۰/۸۲۱۴
۱۰	۵۰
۱۱	۵۰
۱۲	۵۰
۱۳	۵۰
۱۴	۵۰

۸-۱-۲. شبکه‌ی ۳۰ باس IEEE

اطلاعات این شبکه در یکی از منابع (همان) آمده است. این شبکه از ۶ ژنراتور و ۴۱ خط انتقال تشکیل شده که دارای ۲۰ باس بار است. کل تولید در این سیستم $191.65+100.64$ مگاوات آمپر و کل بار شبکه $189.2+107.2$ مگاوات آمپر است. مکان مناسب SVC و TCSC طبق تخمین‌زن فازی طراحی شده به ترتیب باس‌های ۱۱ و ۲۰ و خطوط ۱۶ و ۳۶ است که در جدول‌های ۳ و ۴ نتایج خروجی FIS برای هر خط و باس آمده و مکان مناسب به صورت پررنگ نشان داده شده است.

۸-۲. تأثیر SVC و TCSC مکان‌یابی شده بر پایداری استاتیکی ولتاژ باس‌ها

در کلیه موارد TCSC به طور معمول، ۸۰ درصد راکتانس خط را جبران کرده و SVC به طور معمول درصدی از کل بار راکتیو شبکه پس از افزایش بار را تأمین می‌کند. در ابتدا تأثیر SVC و سپس تأثیر TCSC و در نهایت تأثیر هر دو با هم در شبکه‌های مورد نظر بررسی می‌شود.

جدول ۳. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر خط در شبکه‌ی ۳۰ باس (مکان TCSC)

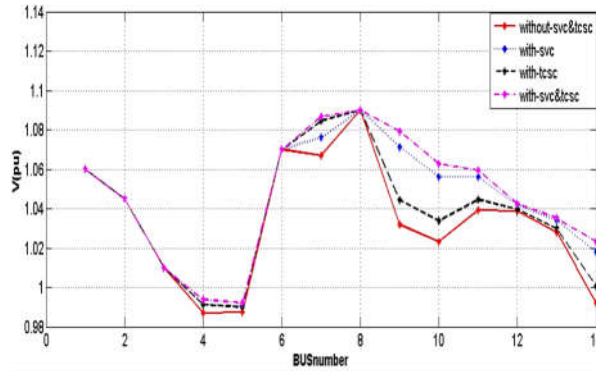
شماره‌ی خط	از باس - به باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۱-۲	۳۶/۳۱۰۲
۲	۱-۳	۴۰/۰۰۷۹
۳	۲-۴	۲۶/۵۸۰۸
۴	۳-۴	۲۸/۴۳۰۹
۵	۲-۵	۳۹/۶۴۰۰
۶	۲-۶	۲۸/۶۳۹۳
۷	۴-۶	۳۹/۸۹۱۰
۸	۵-۷	۲۸/۷۴۳۲
۹	۶-۷	۳۷/۹۱۵۱
۱۰	۶-۸	۳۹/۶۳۱۷
۱۱	۶-۹	۳۷/۲۳۳۱
۱۲	۶-۱۰	۹۲/۲۰۸۵
۱۳	۹-۱۱	۳۷/۸۱۴۸
۱۴	۹-۱۰	۴۰/۱۴۶۲
۱۵	۴-۱۲	۳۷/۸۰۹۰
۱۶	۱۲-۱۳	۵۰/۸۲۹۱
۱۷	۱۲-۱۴	۳۷/۵۹۲۵
۱۸	۱۲-۱۵	۳۶/۱۲۱۴
۱۹	۱۲-۱۶	۳۶/۳۰۲۸
۲۰	۱۴-۱۵	۳۷/۸۲۰۳
۲۱	۱۶-۱۷	۳۷/۲۹۱۹
۲۲	۱۵-۱۸	۳۶/۴۵۱۶
۲۳	۱۸-۱۹	۳۷/۳۳۶۳
۲۴	۱۹-۲۰	۲۸/۲۹۶۴
۲۵	۱۰-۲۰	۴۱/۵
۲۶	۱۰-۱۷	۳۹/۲۱۸۷
۲۷	۱۰-۲۱	۴۲/۳۷۱۲
۲۸	۱۰-۲۲	۴۰/۷۰۷۵
۲۹	۲۱-۲۲	۴۰/۹۱۷۵
۳۰	۱۵-۲۳	۴۱/۴۵۰۵
۳۱	۲۲-۲۴	۳۷/۸۴۹۰
۳۲	۲۳-۲۴	۳۷/۸۰۷۶
۳۳	۲۴-۲۵	۳۶/۸۴۰۸
۳۴	۲۵-۲۶	۳۹/۷۵۰۸
۳۵	۲۵-۲۷	۳۶/۰۶۹۸
۳۶	۲۸-۲۷	۴۹/۵۷۹۸
۳۷	۲۷-۲۹	۲۸/۳۸۶۹
۳۸	۲۰-۲۷	۳۶/۷۱۹۱
۳۹	۲۹-۳۰	۳۷/۶۴۴۵
۴۰	۸-۲۸	۳۷/۲۸۸۵
۴۱	۶-۲۸	۳۷/۹۲۵۸

جدول ۴. خروجی تخمین‌زن فازی برای هر باس در شبکه‌ی ۳۰ باس (مکان SVC)

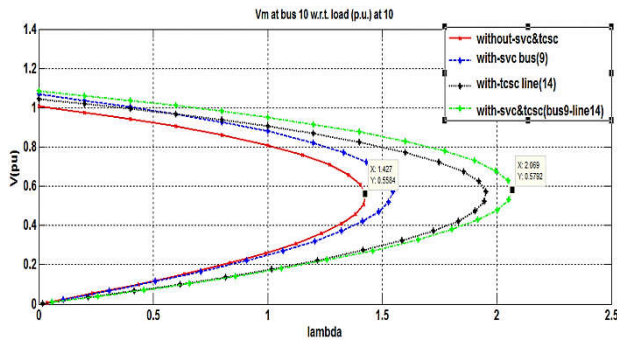
شماره‌ی باس	درصد خروجی تخمین‌زن
۱	۳۸/۷۷۸۳
۲	۲۱/۳۴۷۲
۳	۱۴/۹۳۵۳
۴	۱۲/۵۹۳۷
۵	۲۶/۷۵۴۵
۶	۶/۷۵۶۴
۷	۶/۴۰۱۷
۸	۱۶/۴۱۱۴
۹	۱۲/۵۰۱۳
۱۰	۳۰/۴۸۱۵
۱۱	۶۸/۵۷۵۲
۱۲	۱۸/۰۱۰۳
۱۳	۶/۳۷۲۰
۱۴	۳۲/۹۷۴۵
۱۵	۶/۳۶۲۱
۱۶	۲۶/۱۴۶۱
۱۷	۹/۵۴۶۷
۱۸	۱۸/۶۴۶۱
۱۹	۶۱/۸۴۲۳
۲۰	۷۱/۳۲۶۶
۲۱	۲۱/۷۰۴۷
۲۲	۵۴/۵۶۲۶
۲۳	۲۱/۰۶۶۲
۲۴	۲۲/۳۲۰۹
۲۵	۵۰
۲۶	۵۰
۲۷	۵۰
۲۸	۵۰
۲۹	۲۲/۳۷۰۸
۳۰	۵۰

۸-۲-۱. شبکه‌ی ۱۴ باس

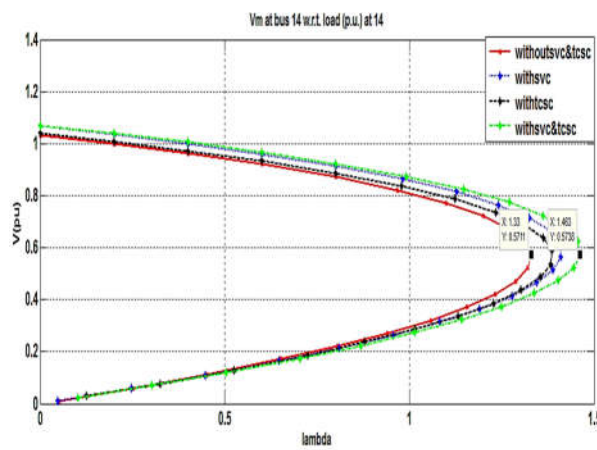
برای بررسی تأثیر SVC و TCSC در این شبکه ابتدا بار اکتیو و راکتیو شبکه را ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهیم تا شبکه دچار بحران شود؛ سپس تأثیر SVC و TCSC را بررسی می‌کنیم. یک SVC با مقدار ۶۰ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۹ قرار می‌دهیم؛ سپس به کمک روش CPF ضریب بارگذاری روی هر باس را محاسبه می‌کنیم. شکل‌های زیر پروفایل ولتاژ و منحنی CPF شبکه‌ی مورد نظر را با SVC و TCSC نشان می‌دهند.



شکل ۱۶. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۱۴ باس با نصب SVC و TCSC در آن



شکل ۱۷. منحنی cpf شبکه‌ی ۱۴ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC و TCSC در آن



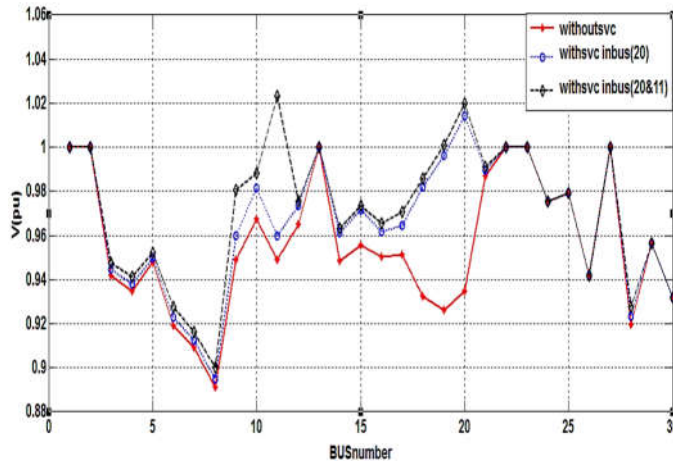
شکل ۱۸. منحنی cpf شبکه‌ی ۱۴ باس برای باس ۱۴ با نصب SVC و TCSC

جدول ۷. مقدار λ در شبکه‌ی ۱۴ باس

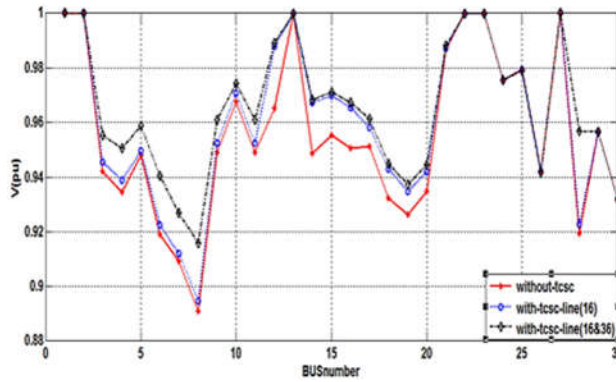
14bus	svc&tcsc-Without	with-svc	with-tcsc	with-svc&tcsc
λ Bus10	۱/۴۲۷	۱/۵۴۷	۱/۹۵۳	۲/۰۶۹
λ Bus14	۱/۳۳	۱/۴۱۰	۱/۳۸۶	۱/۴۵۶

۸-۲-۲. شبکه‌ی ۳۰ باس

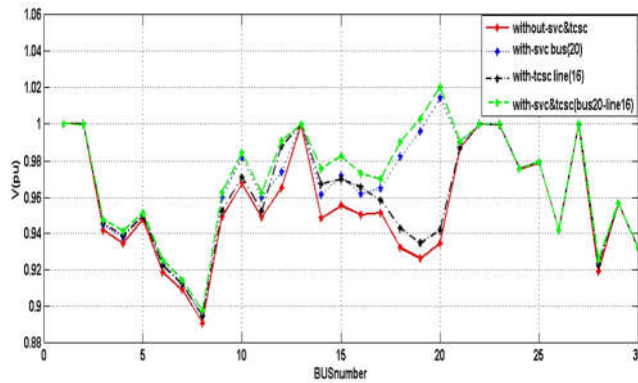
برای بررسی تأثیر SVC و TCSC در این شبکه ابتدا بار اکتیو و راکتیو شبکه را ۱۰۰ درصد افزایش می‌دهیم تا شبکه دچار تنش شود. سپس تأثیر SVC و TCSC را بررسی می‌کنیم. مطابق جدول‌های ۳ و ۴، در باس ۲۰ و خط ۱۶، احتمال مکان مناسب SVC و TCSC بیشتر است. ولی در اینجا علاوه بر این دو مورد، باس ۱۱ و خط ۳۶ که در اولویت بعدی هستند، نیز آزمایش می‌شوند. در ابتدا یک SVC به اندازه‌ی ۴۵ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۲۰ و سپس یک SVC با مقدار ۲۰ مگاوات آمپر را در باس شماره‌ی ۱۱ قرار می‌دهیم. برای بررسی اثر TCSC، ابتدا آن را در خط ۱۶ و پس در خط ۳۶ قرار می‌دهیم. سپس به کمک روش cpf ضریب بارگذاری روی هر باس را محاسبه می‌کنیم. شکل‌های زیر پروفایل ولتاژ و منحنی cpf شبکه‌ی مورد نظر را با SVC و TCSC نشان می‌دهند.



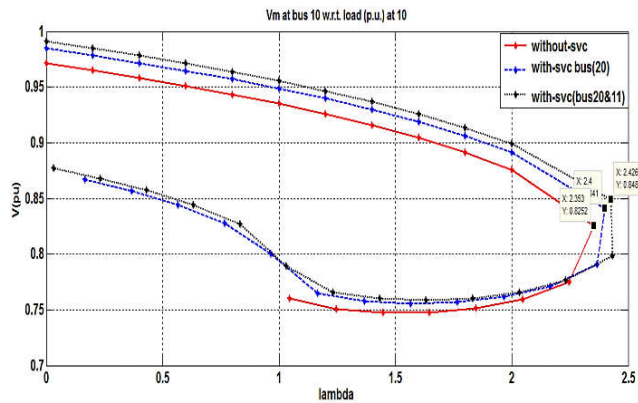
شکل ۱۹. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب SVC



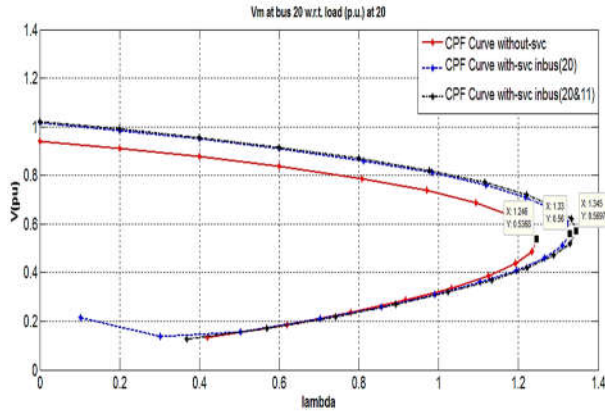
شکل ۲۰. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب TCSC



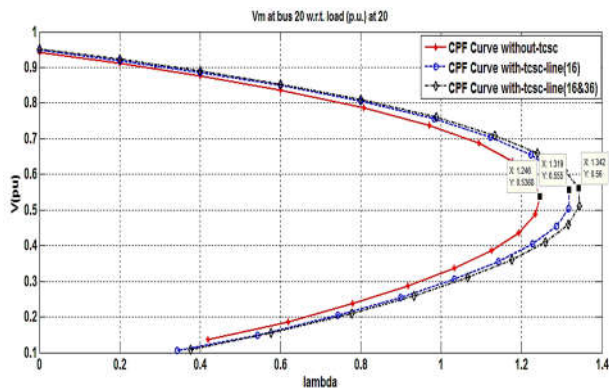
شکل ۲۱. پروفایل ولتاژ شبکه‌ی ۳۰ باس با نصب TCSC و SVC



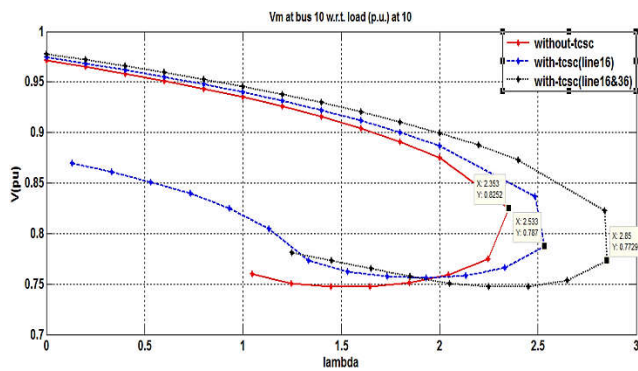
شکل ۲۲. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC



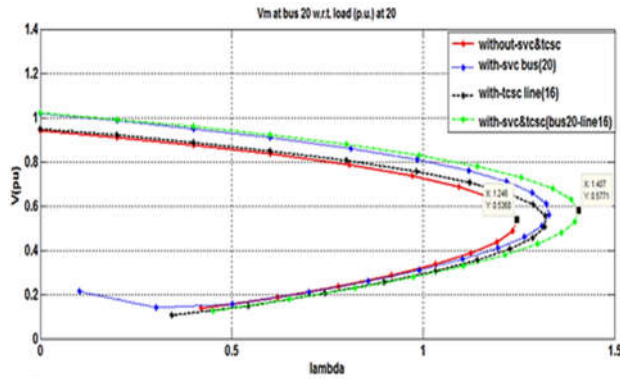
شکل ۲۳. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب SVC



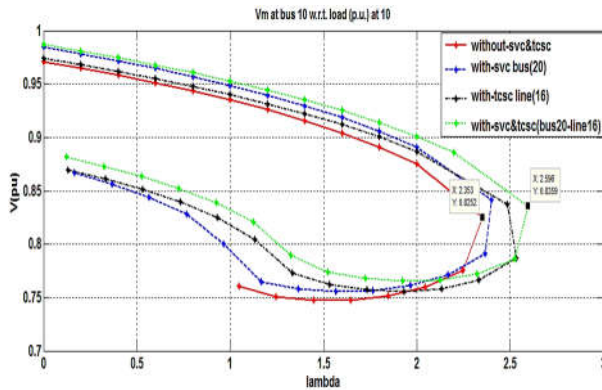
شکل ۲۴. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب TCSC



شکل ۲۵. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب TCSC



شکل ۲۶. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۲۰ با نصب SVC و TCSC



شکل ۲۷. منحنی cpf شبکه‌ی ۳۰ باس برای باس ۱۰ با نصب SVC و TCSC

جدول ۸. مقدار λ در شبکه‌ی ۳۰ باس

30bus	λ Bus10	λ Bus20
Without-SVC & TCSC	۲/۳۵۳	۱/۲۴۶
with-SVC (20)	۲/۴	۱/۳۳
with-SVC (11 & 20)	۲/۴۳۲	۱/۳۴۵
with-TCSC (line16)	۲/۵۳۲	۱/۳۱۹
with-TCSC (line16 & 36)	۲/۸۵	۱/۳۴۲
with-SVC (20) & TCSC (16)	۲/۵۹۶	۱/۴۰۷

۹. نتیجه گیری

در این تحقیق مکان یابی SVC و TCSC به کمک تخمین زن فازی نشان داده شد. هدف کلی، جاییابی با رویکرد پایداری استاتیکی ولتاژ است. نتایج نشان می‌دهند اگر مکان مناسبی برای SVC و TCSC تعیین شود، این ادوات در بهبود پروفایل ولتاژ و پایداری استاتیکی ولتاژ سیستم کمک شایانی خواهند کرد. در اینجا از تخمین زن فازی برای یافتن مکان مناسب SVC و TCSC استفاده شده است و روش پیشنهادی به خوبی مکان مناسب را تخمین می‌زند. نتایج شبیه‌سازی بر روی شبکه‌های استاندارد ۱۴ و ۳۰، دلیلی بر صحت روش پیشنهادی است که در شبکه‌های پیچیده‌تر با خطوط انتقال و باس‌های بیشتری نیز به راحتی کاربرد دارد. همچنین از یافته‌های به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که استفاده همزمان از SVC و TCSC در شبکه‌های الکتریکی - در صورت داشتن توجیه اقتصادی - پایداری استاتیکی و ظرفیت بارگذاری سیستم را افزایش می‌دهد.

پی‌نوشت‌ها

1. Continuation Power Flow (CPF)
2. Flexible AC Transmission Systems (FATS)
3. Static Synchronous Compensator (STATCOM)
4. Static VAR Compensator (SVC)
5. Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC)
6. Static Synchronous Series Compensator (SSSC)
7. Unified Power Flow Controller (UPFC)
8. Thyristor Controlled Reactor (TCR)
9. Automatic Voltage Regulators (AVR)

منابع

1. Acha, E.; Fureret-Esquivel; G.R.; Ambriz-Perez, H. & Angeles-camacho, C. (2004), "FACTS: modeling and Simulation in power networks", John-Wiley & Sons, New York.
2. Ajarapu, V. & Christy, C. (Feb. 1992), "The continuation power flow: A tool for steady state voltage stability analysis", IEEE Trans. on power systems, Vol. 7, No. 1, pp. 426-423.
3. Bhattacharya, K.; Bollen, M.H.J, Daadler, J.E. (2001), "Operation of restructured power systems", by Chalmers University of Technology, Kluwer academic publishers.
4. Canizares, C.A. (1998), "Applications of optimization to voltage collapse analysis", IEEE/PES summer meeting, San Diego, July 14.
5. Deb, A.K. (2000), "Power line ampacity system: Theory, modeling and applications", CRC press, pp. 169-171, ISBN: 978-0-8493-1306-6.
6. Elgerd, I.O. (1971), "Electric energy system theory: An introduction", McGraw-Hill.
7. Edris, A. (2000), "FACTS technology development: An update", IEEE Eng. Rev. 20 (3), pp.4-9.
8. Faur, Z.T. (1996), "Effects of FACTS devices on static voltage collapse phenomena", M.S. dissertation, Dept. Elect. Eng., Univ. of Waterloo.
9. Farsangi, M.M; Nezamabadi-Pour, H. & Lee, K.Y. (2006), "Multiobjective VAR planning with SVC for a Large power system using PSO and GA", Power system conference & exposition, pp. 274-279.
10. Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. (1999), "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems", IEEE Press, New York.
11. Hassan, M.O.; Cheng, S.J. (March 2009), "Steady-state modeling of svc and tcsc for power flow analysis", IMECS 2009, Hong Kong.

12. Hingorani, N.G. & Gyugyi, L. (1999), "Understanding FACTS: Concepts and technology of flexible ac transmission systems", IEEE, ISBN: 0-7803-3455-8, VASE SVC 3 VA 4.
13. Kundur, P. (January 1994), "Power system stability and control", McGraw-Hill education; 1st edition. (1994).
14. Kundur, P.; Paserba, J.; Ajarapu, V.; Andersson, G.; Bose, A.; Canizares, C.A.; Hatziargyriou, N.; Hill, D.; Stankovic, A.; Taylor, C.; VanCutsem, T. & Vittal, V. (May 2004), "Definition and classification of power system stability", IEEE Trans. on power systems, Vol. 19, No. 2, pp.1387-1401.
15. Kirschner, L.; Retzmann, D.; Thumm, G. (2005), "Benefits of FACTS for power system enhancement", Transmission and distribution conference and exhibition: Asia and Pacific, IEEE/PES, pp.1-7.
16. Kalaivani, R., Kamaraj, V. (2011), "Modeling of shunt FACTS devices for voltage stability enhancement," ISSN 1450-216X, Vol. 61, No.1, pp. 144-154.
17. Larsson, M. (2000), "Coordinated voltage control in electric power systems", Doctoral dissertation, Lund University.
18. Mansour, Y. et al. (May 1994), "SVC placement using critical modes of voltage instability", IEEE Trans. on power systems, Vol. 9, No. 2, pp.757-763.
19. Marthur, M.R. & Varma, R.K. (2002), "Thyristor based-FACTS controllers for electrical transmission systems", John-Wiley & Sons, New York.
20. Mínguez, R.; Milano, F.; Zárate-Miñano, R. & Conejo, A.J. (Nov. 2007), "Optimal network placement of SVC devices", IEEE Trans. On power systems, Vol. 22, No. 4.
21. Mollazei, S. et al. (Nov. 2007), "Multi-objective optimization of power system performance with TCSC using the MOPSO algorithm", IEEE Trans.on power systems.
22. Pilotto, L.A.S.; Ping, W.W.; Carvalho, A.R.; Wey, A.; Long, W.F.; Alvarado, F.L. & Edris, A. (Jan. 1997), "Determination of needed FACTS controllers that increase asset utilization of power systems", Power delivery, IEEE transactions on, Vol. 12, Issue: 1, pp. 364 – 371.
23. Perez, M.A.; Messina, A.R.; Fuerte-Esquivel, C.R. (20 July 2000), "Application of FACTS devices to improve steady state voltage stability", Power engineering society summer meeting, IEEE, Vol. 2, 16, pp. 1115 – 1120.
24. Repo, S. (2001), "On-line voltage stability assesment of power system - an approach of black-box modelling", Tampere University of technology publications, #344.
25. Ryan, H.M. (2001), "High voltage engineering and testing", IEEE, pp. 160–161, ISBN 978-0-85296-775-1, VASE SVC 5.

26. Sharma, A.K. (2006), "Optimal number and location of tcsc and load ability enhancement in deregulated electricity markets using MINLP," International journal of emerging electric power systems, Vol. 5, Issue 1, Article 6.
27. Sarvi, M. & Marefatjou, H. (2012), "Performance of SVC and UPFC in static voltage stability margin enhancement in two area power system with continuation power flow method", International electrical engineering journal, Vol. 3 No. 3, pp. 803-809
28. Saadat, H.(2004), "Power system analysis", (Book style) McGraw-Hill international editions.
29. Song, Y.H. & Johns, A.T.(1999), "Flexible AC transmission systems", IEEE, ISBN 0-85296-771-3.
30. Verma, M.K. (2005), "Optimal placement of SVC for static and dynamic voltage security enhancement", international journal of emerging electric power systems, Vol. 2, Issue 2, Article 1050.
31. Xingbin, Y.; Chanan, S.; Jakovljevic, S.; Ristanovic, D. & Garng, H. (Sept. 2003) , "Total transfer capability considering FACTS and security constraints", Transmission and distribution conference and exposition, IEEE PES-Vol. 1, 7-12, pp.73 – 78.
32. Yan, O. & Chanan, S. (July 2001), "Improvement of total transfer capability using TCSC and SVC", Power engineering society summer meeting, IEEE, Vol. 2, 15-19, pp. 944-948.
33. Yorino, N.; El-Araby, E.E.; Sasaki, H. & Harada, S. (Feb. 2003), "A new formulation for FACTS allocation for security enhancement against voltage collapse", IEEE Trans, on power systems, Vol. 18, No. 1, pp.3-10.
34. Zhang, J.; Wen, J.Y.; Cheng, S.J. & Jia, M. (Nov. 2007), "A novel SVC allocation method for power system voltage stability enhancement by normal forms of diffeomorphism", IEEE Trans. on power systems, Vol. 22, No. 4, pp.1819-1825.
35. Zimmerman, R.D. & Murillo-Sanchez .C.E. (September 21, 2007), "A MATLAB power system, simulation package".

