

تأثیر مد کنترلی STATCOM بر پایداری ولتاژ

علی زارع

باشگاه پژوهشگران جوان شاخه ارسنجان، ali_zare@ee.iust.ac.ir

چکیده

STATCOM یکی از رایج‌ترین ادوات FACTS می‌باشد که برای بهبود پایداری ولتاژ ب کار گرفته می‌شود. با وجود این که مطالعات زیادی در این زمینه صورت گرفته، در هیچ‌یک به بررسی تأثیر مد کنترلی عنصر STATCOM بر پایداری ولتاژ پرداخته نشده است. این مقاله تأثیر مد کنترلی STATCOM بر بهبود پایداری ولتاژ بررسی می‌کند؛ برای این منظور علاوه بر مد کنترل ولتاژ شین، مدهای کنترل راکتانس، توان راکتیو تزریقی و توان اکتیو تزریقی STATCOM بررسی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها بر شبکه‌ی استاندارد سی شین IEEE تأثیر چشم‌گیر مد کنترلی انتخابی برای STATCOM بر پایداری ولتاژ را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی

مد کنترلی، پخش بار پیوسته، پایداری استاتیکی ولتاژ، STATCOM

۱- مقدمه

مطالعاتی آنها ارائه شده است. در اکثر منابع یاد شده به موضوع جایابی عنصر STATCOM پرداخته شده است. در [۱۲]، علاوه بر جایابی عنصر، ظرفیت بهینه آن نیز با استفاده از الگوریتم درخت تصمیم برای یک شبکه خاص محاسبه شده است.

در با وجود این که مطالعات گسترده‌ای در این زمینه انجام شده است. اما در تمامی این مقالات STATCOM در مد کنترل ولتاژ بکار گرفته شده است و تاکنون پژوهشی در زمینه تأثیر مد کنترلی STATCOM بر عملکرد STATCOM در بهبود پایداری ولتاژ انجام نشده است. این پژوهش به بررسی میزان تأثیر مد کنترلی STATCOM بر پایداری ولتاژ می‌پردازد. ساختار کلی این مقاله به صورت زیر می‌باشد:

در بخش دوم معرفی کوتاهی از روش‌ها و شاخص‌های پایداری ولتاژ ارائه می‌شود. در بخش سوم روش حل مسئله بیان شده است. در بخش چهارم STATCOM و مدهای کنترلی آن مطرح می‌شود. در بخش پنجم نتایج شبیه‌سازی‌ها بر شبکه ۳۰ شین IEEE ارائه و

یافتن نقطه کاری بحرانی تنها بخشی از تحلیل پایداری ولتاژ است و بررسی تأثیرات تغییرات شرایط شبکه بر نقطه کاری بحرانی از اهمیت زیادی برخوردار است [۱]. لازم است فاکتورهای مؤثر بر پایداری ولتاژ و چگونگی تأثیرگذاری هر کدام از آنها مشخص گردد. روش‌های تحلیل و شاخص‌های مختلفی برای مطالعه پایداری ولتاژ ارائه شده‌اند. پژوهش‌هایی که تاکنون و با استفاده از روش‌ها و شاخص‌های مختلف انجام شده‌اند، تأثیر قابل توجه STATCOM بر پایداری ولتاژ را نشان داده‌اند. در [۲-۶] به روش پخش پیوسته و با استفاده از نرم‌افزار PSAT و UPFLOW اثر STATCOM بر پایداری ولتاژ بررسی شده است که تأثیر قابل توجه STATCOM را نشان می‌دهد. همچنین منابع [۷-۱۰] نیز با بکارگیری روش مودال و شاخص کوچک‌ترین مقدار تکین نتایج مشابه بدست آورده‌اند. روش پخش بار بهینه نیز برای تحلیل عملکرد STATCOM بکار رفته است که نتایجی مشابه روش پخش بار پیوسته را نشان می‌دهد [۵]. در [۱۱] فهرستی از تحقیقات انجام شده در زمینه تأثیر STATCOM بر پایداری ولتاژ و روش‌های

در مورد نتایج بحث شده است. در نهایت در بخش ششم نتایج مقاله جمع بندی شده است.

۲- روش های مطالعه پایداری ولتاژ

تحلیل تاثیرات شرایط سیستم بر پایداری ولتاژ با استفاده از تحلیل حساسیت و بر پایه شاخص های مختلفی انجام پذیر است. شاخص های مختلفی که در این زمینه پیشنهاد شده است در [۱۳] به دو دسته کلی دسته بندی شده اند: (الف) شاخص های بر پایه حالت و (ب) شاخص های بر پایه اغتشاش بزرگ.

۲-۱- شاخص های بر پایه حالت

این شاخص ها تنها از اطلاعات مربوط به نقطه کاری سیستم برای تعیین حد پایداری استفاده می کنند. در واقع نقطه کاری سیستم می تواند شرایط شبکه را شبیه سازی کند و با استفاده از اطلاعات نقطه کاری شرایط و ویژگی های سیستم را می توان به دست آورد [۱۳]. برخی از این شاخص ها عبارتند از:

۲-۱-۱- ذخیره توان راکتیو

میزان ذخیره توان راکتیو در دسترس از جمله شاخص های ساده اما بسیار مهم می باشد. با پایان یافتن ذخیره توان راکتیو شبکه دیگر توان تامین توان راکتیو افزایش بار را ندارد و ولتاژ شبکه شروع به کم شدن می کند بنابر این در بهترین حالت حد پایداری با حداکثر ظرفیت تولید توان راکتیو شبکه برابر است و میزان ذخیره توان راکتیو می تواند شاخصی برای نزدیکی به نقطه فروپاشی ولتاژ باشد. از این شاخص گاهی به عنوان یک شاخص بر پایه اغتشاشات بزرگ نیز استفاده می شود.

۲-۱-۲- افت ولتاژ

میزان افت ولتاژ در طول بارگذاری سیستم قدرت یکی از شاخص های بسیار رایج می باشد. مشکل عمده این شاخص رفتار بسیار غیر خطی پروفیل ولتاژ است که این موضوع با نصب ادوات جبران ساز توان راکتیو تشدید شده و عملاً نتایج این شاخص را غیر قابل اعتماد می کند.

۲-۱-۳- تلفات توان حقیقی و راکتیو

هنگامی که سیستم قدرت به نقطه کار بحرانی نزدیک می شود، تلفات توان به شکل نمایی افزایش می یابد. این ویژگی در برخی از پژوهش ها به عنوان یک شاخص برای تعیین پایداری ولتاژ بکار گرفته شده است.

۲-۱-۴- کوچکترین مقدار ویژه و کوچکترین مقدار تکین ماتریس ژاکوبین

از آنجا که تجزیه متعامد ماتریس ژاکوبین کاربرد بسیاری دارد، مقادیر تکین در سیستم های قدرت بکار گرفته شده اند. تجزیه مقدار تکین ماتریس A که یک ماتریس واقعی $n*m$ است به صورت زیر تعریف می شود:

$$A = QSP^T = \sum_{i=1}^n s_i q_i p_i^T \quad (1)$$

که در آن S یک ماتریس قطری $n*n$ و Q, P ماتریس هایی $n*n$ و متعامد هستند. درایه های قطری S را مقادیر ویژه ماتریس A می نامند. ستون های $q_1, q_2, q_3, \dots, q_n$ از ماتریس Q را بردارهای تکین راست و ستون های $p_1, p_2, p_3, \dots, p_n$ از ماتریس P را بردارهای تکین چپ می نامند. با انتخاب مناسب Q و P می توان مقادیر تکین را به صورت نزولی مرتب کرد $(s_1 \geq s_2 \geq \dots \geq s_n \geq 0)$.

برای یک ماتریس متقارن و حقیقی A مقادیر تکین برابر جذر مقادیر ویژه ماتریس AA^T یا $A^T A$ می باشد. بنابراین برای یک ماتریس متقارن و حقیقی مقادیر تکین برابر قدر مطلق مقادیر ویژه خواهند بود. اگر کوچکترین مقدار تکین صفر باشد آنگاه ماتریس A یک ماتریس تکین است. از این رو کوچکترین مقدار ویژه ماتریس هنگامی که به سمت صفر میل می کند برای تحلیل فروپاشی ولتاژ استاتیکی بکار می رود. کوچکترین مقدار ویژه ماتریس ژاکوبین پخش بار که فاصله بین نقطه کار سیستم تا حد پایداری ولتاژ سیستم را نشان می دهد، به عنوان شاخص پایداری ولتاژ تعریف شده است. به طور مشابه کوچکترین مقدار ویژه نیز می تواند به عنوان شاخص پایداری ولتاژ شود [۱]، [۷-۱۰].

۲-۲- شاخص های بر پایه اغتشاش بزرگ

شاخص های مبتنی بر اغتشاشات بزرگ برای تغییرات غیرخطی در اثر افزایش های بزرگ بار و یا خطاهای بزرگ در سیستم قدرت استفاده می شوند [۱]. این شاخص ها در مقایسه با شاخص های حالت اعمال شده، احتیاج به محاسبات بیشتری دارند اما بسیار قابل اعتمادتر می باشند. حد پایداری در این شاخص ها به صورت ماکزیمم افزایش ممکن MW و یا MVAR بارها و یا هر دوی آنها با افزایش آرام بارها از نقطه کار عادی تعریف می شود. در عمل روش های بر پایه شاخص های اغتشاشات بزرگ از مقادیر مشابه ای استفاده می کنند، اما روش های محاسبه ای متفاوتی دارند. برخی از روش های اصلی این گروه عبارتند از :

۲-۲-۱- پخش بار متوالی

یکی از روش‌هایی که برای محاسبه بیشینه بارپذیری بکار گرفته می‌شود، استفاده از پخش بار متوالی است. اگر چه این روش دارای بازده بالایی نیست؛ اما امکان مدل‌سازی کنترل‌های مختلف و همچنین حدود بهره‌برداری را به راحتی فراهم می‌کند و بنابراین در برخی پژوهش‌ها بکار گرفته شده است [۱۴].

۲-۲-۲- پخش بار پیوسته

روش پیوسته یک روش ریاضی دنبال‌کننده‌ی مسیر برای حل معادلات غیرخطی سیستم است. با استفاده از این روش ما می‌توانیم شاخه‌ی حل را در اطراف نقطه‌ی بحرانی، بدون مشکل دنبال کنیم. این ویژگی روش پیوسته را به یک روش محبوب برای یافتن نقطه‌ی بحرانی سیستم قدرت تبدیل کرده است. پخش بار پیوسته بر مبنای یک فرآیند پیش‌بینی - اصلاح است. این روش این مزیت را دارد که محدودیت‌های عملی مثل محدودیت حرارتی، ولتاژ و پایداری ولتاژ کاملاً محاسبه می‌شوند. همچنین از آنجا که نمودارهای V_P را در اختیار ما قرار می‌دهد، اطلاعات دقیق و جامعی از وضعیت سیستم را در شرایط مختلف علاوه بر حد پایداری را در اختیار ما قرار می‌دهد. این روش رایج‌ترین روش در پژوهش‌ها در چند سال اخیر بوده است. این روش مشکل زمان‌بر بودن روش پخش بار متوالی را تا حدود زیادی حل می‌کند [۲-۶].

۲-۲-۳- روش‌های بر پایه‌ی بهینه‌سازی

بیشینه حد پایداری ولتاژ را می‌توان به وسیله مسائل غیرخطی بهینه‌سازی فرمول‌بندی کرد. هدف این مسئله مشخص کردن بیشینه حد پایداری ولتاژ یک سیستم قدرت با در نظر گرفتن افزایش بار کل سیستم برای تعیین بارپذیری سیستم با در نظر گرفتن قیود ولتاژ شین‌های ژنراتوری و تجهیزات سیستم است.

این مسئله بهینه‌سازی را می‌توان با روش‌های غیرخطی حل نمود. مسئله حد پایداری ولتاژ در اینجا بسیار به پخش بار پیوسته شبیه است. تنها تفاوت مهم بین این دو روش این است که در اینجا تنها می‌توان حد پایداری ولتاژ را تعیین نمود.

۳- روش حل مسئله

از آنجا که نصب ادوات FACTS یک اغتشاش بزرگ در سیستم می‌باشد بنابر این از شاخص‌های بر پایه‌ی حالت سیستم نمی‌توان استفاده کرد؛ در این پژوهش با توجه به مزایای روش پخش بار پیوسته از این روش برای تحلیل پایداری ولتاژ استفاده می‌شود. الگوریتم این روش به صورت زیر می‌باشد:

گام اول پیش‌بینی: در این گام از یک نقطه کاری قابل قبول

شروع نموده و بارها به صورت یکسان افزایش داده می‌شود:

$$P_{Li} = \lambda P_{Li0} \quad (۲)$$

$$Q_{Li} = \lambda Q_{Li0} \quad (۳)$$

که در آن P_{Li0} و Q_{Li0} به ترتیب توان حقیقی و راکتیو بارها در نقطه کاری اولیه و λ ضریب افزایش بار است.

معادلات پخش بار در اینجا با افزودن متغیر ضریب افزایش بار به صورت $f(x, \lambda) = 0$ تعریف می‌شود؛ با خطی‌سازی این معادلات داریم:

$$df(x, \lambda) = f_x dx + f_\lambda d\lambda \quad (۴)$$

برای حل این مسئله به یک معادله‌ی دیگر نیز احتیاج داریم اگر ما مقداری غیر صفر برای یکی از بردارهای شیب (dx ها) انتخاب کنیم و مقدار تغییر را ± 1 قرار دهیم آن‌گاه معادله‌ی خارجی ما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$t_k = \pm 1 \quad (۵)$$

که در آن t_k عنصر غیر صفر بردار شیب dx است. با ترکیب (۴) و (۵) داریم:

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \pm 1 \end{bmatrix} \quad (۶)$$

که برداری است که یکی از عناصر آن غیر صفر است. از حل معادلات بالا نقطه حل بعدی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} + \sigma \begin{bmatrix} dx \\ d\lambda \end{bmatrix} \quad (۷)$$

که در اینجا x^* و λ^* نقطه‌ی بعدی را نشان می‌دهد و σ طول گام است.

گام دوم تصحیح: در این مرحله معادلات پخش بار همراه با جواب گام پیش‌بینی (۷) به عنوان نقطه‌ی شروع حل می‌شوند. الگوریتم پخش بار نیوتن افزایش یافته، معادله‌ی خارجی را نیز شامل می‌شود و λ نیز به عنوان متغیر تعریف می‌شود. بنابراین معادلات به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (۸)$$

η که از این معادلات بدست می‌آید مقدار پیش‌بینی شده برای مقدار پارامتر x_k است. معادلات (۸) را می‌توان با روش تکرار شونده‌ی نیوتن به صورت زیر حل کرد:

$$\begin{bmatrix} f_x & f_\lambda \\ e_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} f(x, \lambda) \\ x_k - \eta \end{bmatrix} \quad (۹)$$

و در نهایت :

$$\begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^* \\ \lambda^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{bmatrix} \quad (10)$$

۴-۱- توابع چند کنترلی STATCOM

در کاربردهای عملی STATCOM یکی از پارامترهای زیر برای کنترل استفاده می‌شود:

(۱) اندازه ولتاژ شینی که STATCOM در آن نصب شده است.

(۲) میزان توان راکتیو تزریقی به شینی که STATCOM در آن نصب شده است.

(۳) امپدانس STATCOM

در میان این گزینه، کنترل ولتاژ شینی که STATCOM در آن نصب شده است، از دیگر توابع کنترلی بیشتر رایج است. دیگر کنترل‌های ممکن به‌طور کامل در پخش بار مورد بررسی قرار نگرفته‌اند. شرح ریاضی توابع کنترلی مطرح شده در زیر آورده شده است:

۴-۱-۱- مد کنترلی ۱: کنترل ولتاژ شین

محدودیت کنترل ولتاژ شین به‌صورت زیر است:

$$V_i - V_i^{spec} = 0 \quad (11)$$

که در آن V_i^{spec} ولتاژ کنترلی مرجع می‌باشد.

۴-۱-۲- مد کنترلی ۲: کنترل توان راکتیو

در این مد کنترلی، توان راکتیو تولیدی STATCOM نسبت به یک توان راکتیو مرجع کنترل می‌شود. محدودیت کنترل توان به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_i - Q_i^{spec} = 0 \quad (12)$$

که Q_i^{spec} توان راکتیو تعیین شده مرجع کنترل است.

۴-۱-۳- مد کنترلی ۳: کنترل امپدانس معادل

یک STATCOM را می‌توان با یک راکتانس معادل‌سازی کرد. در این مد کنترلی، ولتاژ V_{sh} به گونه‌ای کنترل می‌شود تا راکتانس معادل STATCOM برابر راکتانس مرجع تعیین شده ثابت بماند. محدودیت کنترل امپدانس به‌صورت زیر بیان می‌شود:

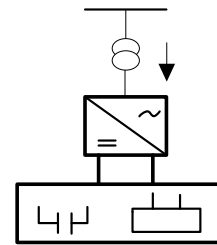
$$X_{shunt} - X_{shunt}^{spec} = 0 \quad (13)$$

که در آن X_{shunt}^{spec} راکتانس مرجع کنترل STATCOM است و X_{shunt} راکتانس معادل STATCOM است. X_{shunt} که تابعی از متغیرهای حالت V_i و V_{sh} است، به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

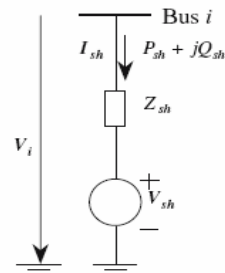
$$X_{shunt} = \text{Im}\left(\frac{V_{sh}}{I_{sh}}\right) = \text{Im}\left[V_{sh} Z_{sh} / (V_i - V_{sh})\right] \quad (14)$$

۴- STATCOM

یکی از رایج‌ترین ادوات FACTS کانورتی STATCOM می‌باشد که به‌طور گسترده در شبکه‌های برق نصب شده است. نظر به کاربرد وسیع STATCOM در شبکه‌های قدرت، برای استفاده کامل از ظرفیت‌های مختلف کنترلی آن، مدل‌سازی توابع چندکنترلی STATCOM در کنترل و بهره‌برداری حالت پایداری شبکه قدرت مورد توجه قرار گرفته‌اند. چندین تابع چند کنترلی برای STATCOM وجود دارد که در اینجا به آنها پرداخته می‌شود [۵]. یک STATCOM معمولاً برای کنترل ولتاژ به‌وسیله جبران‌سازی موازی توان راکتیو استفاده می‌شود. یک STATCOM عموماً شامل یک ترانسفورماتور ترویج و یک اینورتر و یک خازن DC است که در شکل (۱) نشان داده شده است. برای تحلیل حالت پایدار می‌توان از تبادل توان اکتیو بین سیستم AC و STATCOM صرفه نظر نمود و فرض کرد که فقط توان راکتیو بین شبکه و STATCOM مبادله می‌شود. بر مبنای اصول عملکرد STATCOM، مدار معادل شکل (۲) برای آن پیشنهاد می‌شود [۵].

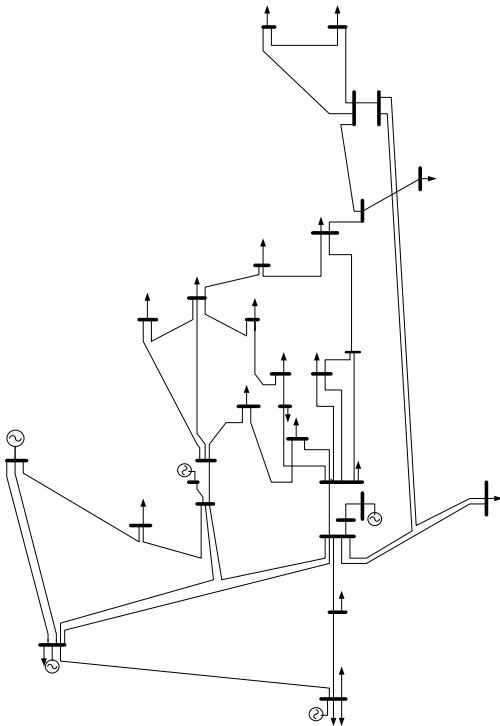


شکل ۱- شمای کلی STATCOM [۵]

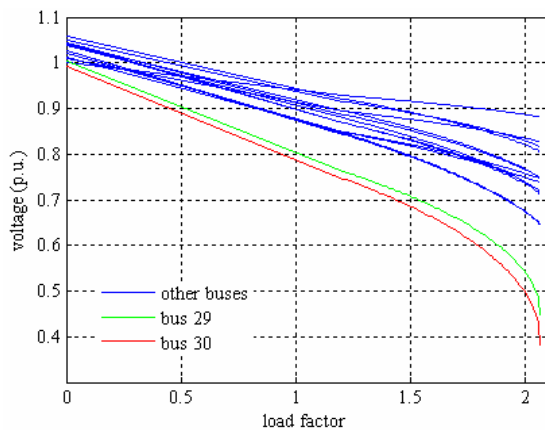


شکل ۲- مدار معادل STATCOM [۵]

منحنی V_P شین‌های باری شبکه قبل از نصب STATCOM در شکل (۴) نشان داده شده است. در این شکل به وضوح دیده می‌شود که شین‌های ۲۹ و ۳۰ ضعیف‌ترین شین‌های شبکه هستند و بیشترین احتمال فروپاشی ولتاژ در این شین‌ها وجود دارد. بنابراین مکان مناسب برای نصب عنصر FACTS موازی می‌باشند. با نصب یک STATCOM در مد کنترلی ولتاژ شینی از شبکه که به آن متصل است در شین ۲۹ بهبودی حدود ۱۳٪ را نشان می‌دهد (شکل (۵) و (۴) را مقایسه کنید).



شکل ۳- شبکه تست استاندارد ۳۰ شین IEEE



شکل ۴- منحنی V_P شین‌های باری قبل از نصب STATCOM

۴-۲- مدل چند کنترلی STATCOM در پخش بار

نیوتن

از آنجا که توان اکتیو مبادله شده با لینک DC, STATCOM همواره باید برابر صفر باشد، STATCOM فقط دارای یک درجه آزادی برای کنترل است. معادلات پخش بار نیوتن شامل معادلات قیود و عدم توازن توان شین‌های i و j و k و همچنین قیود کنترلی STATCOM به صورت زیر می‌باشد:

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial PE}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial PE}{\partial V_{sh}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\partial F}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial F}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial F}{\partial \theta_i} & \frac{\partial F}{\partial V_i} & \frac{\partial F}{\partial \theta_j} & \frac{\partial F}{\partial V_j} & \frac{\partial F}{\partial \theta_k} & \frac{\partial F}{\partial V_k} \\ \frac{\partial P_i}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial P_i}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_i}{\partial V_i} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_i}{\partial V_j} & \frac{\partial P_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_i}{\partial V_k} \\ \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_i}{\partial V_k} \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial P_j}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_j}{\partial V_j} & \frac{\partial P_j}{\partial \theta_k} & \frac{\partial P_j}{\partial V_k} \\ 0 & 0 & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial P_k}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial P_k}{\partial V_i} & \frac{\partial P_k}{\partial \theta_j} & \frac{\partial P_k}{\partial V_j} \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_j} & \frac{\partial Q_j}{\partial \theta_k} & \frac{\partial Q_j}{\partial V_k} \\ 0 & 0 & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_{sh}} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_{sh}} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_i} & \frac{\partial Q_k}{\partial \theta_j} & \frac{\partial Q_k}{\partial V_j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_{sh} \\ V_{sh} \\ \theta_i \\ V_i \\ \theta_j \\ V_j \\ \theta_k \\ V_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\Delta PE \\ -\Delta F \\ -\Delta P_i \\ -\Delta Q_i \\ -\Delta P_j \\ -\Delta Q_j \\ -\Delta P_k \\ -\Delta Q_k \end{bmatrix} \quad (15)$$

که در آن ΔP_i و ΔQ_i ($i = j, k$) به ترتیب عدم توازن توان اکتیو و راکتیو هر شین می‌باشد. همچنین V_{sh} و θ_{sh} (دو متغیر حالت و دو معادله‌ی دو سطر اول) متغیرهای حالت و معادلات مربوط به STATCOM هستند. از این دو معادله، اولین معادله، معادله‌ی تعادل توان اکتیو STATCOM است و دومین معادله مربوط به محدودیت کنترلی STATCOM است [۵]، [۱۵].

30 29

۵- نتایج شبیه‌سازی

در این پژوهش با استفاده از تحلیل حساسیت و به روش پخش بار پیوسته تأثیر مدهای کنترلی STATCOM بر پایداری ولتاژ بر روی شبکه استاندارد IEEE ۳۰ شین بررسی شده است. (مشخصات کامل شبکه در منبع [۱۶] داده شده است). برای این منظور یک برنامه در نرم افزار MATLAB با استفاده از الگوریتم پیشنهادی برای پخش بار پیوسته (CPF) که در [۱] پیشنهاد شده است (بخش ۲ را ببینید) و با اضافه نمودن مدل چند کنترلی STATCOM پیشنهاد شده در [۵] و [۱۵] نوشته شده است. تمامی مقادیر در اینجا بر مبنای ۱۰۰ MVA و ولتاژ مبنای هر شین (۱۱، ۳۳ و ۱۳۲ کیلو ولت) پرنیوت شده‌اند. مقادیر مربوط به STATCOM نیز بر مبنای ۱۰۰ MVA و ۳۳ کیلو ولت پرنیوت شده‌اند.

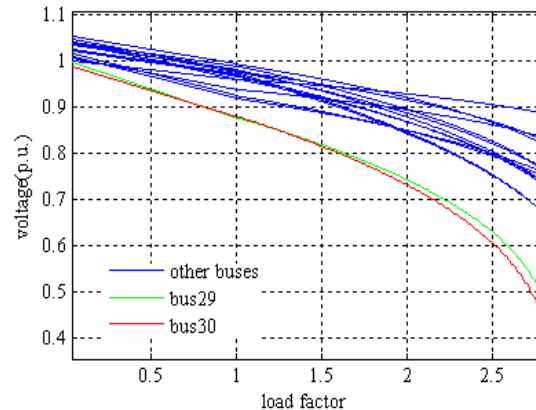
18

22

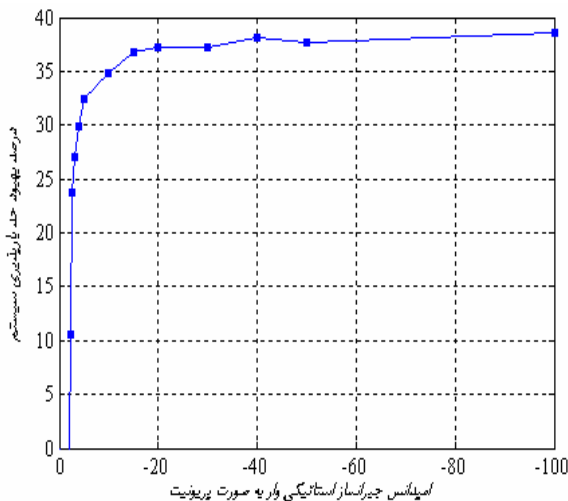
19 21

16 20

این STATCOM در یکی از شین‌های حساس سیستم (شین ۲۹) نصب شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود، تأثیر تغییر امپدانس STATCOM از حدود صفر تا منفی بیست پریونیت بسیار چشم‌گیر است (با افزایش امپدانس افزایشی در حدود ۴۰ درصد در میزان بهبود پایداری ولتاژ دیده می‌شود)؛ اما افزایش بیشتر اندازه راکتانس تأثیر ناچیزی در بهبود حد پایداری دارد (این بهبودی برای افزایش اندازه راکتانس از بیست تا صد پریونیت کمتر از یک و نیم درصد است). این به این معنا است که اگر STATCOM در این مد کنترلی و با امپدانس ۲۰ پریونیتی کنترل شود حد پایداری ولتاژ حدود ۴۰ درصد بیشتر از حالت قبل (مد کنترلی ولتاژ شین) افزایش می‌یابد.



شکل ۵- منحنی V_P شین‌های باری بعد از نصب STATCOM در شین ۲۹



شکل ۶- منحنی حد بارپذیری - امپدانس STATCOM

۵-۲- حساسیت پایداری ولتاژ نسبت به توان راکتیو

تزریقی STATCOM

شکل (۷) نشان می‌دهد که افزایش توان راکتیو تزریقی STATCOM تأثیر مثبتی بر بهبود حد پایداری ولتاژ دارد که رشد این تأثیر مثبت با افزایش توان تزریقی راکتیو کاهش می‌یابد. نکته دیگری که در این منحنی دیده می‌شود این است که اثر مثبت این مد کنترلی نسبت به مد کنترلی راکتانس بسیار کمتر است. در مجموع این حالت با وجود آن که از مد کنترلی ولتاژ شین عمل‌کرد بهتری دارد اما نسبت به مد کنترلی راکتانس چندان مناسب به نظر نمی‌رسد. توجه به این نکته که تامین توان راکتیوی که در اینجا در فرض شده است (حدود یک پریونیت) با مشکلات زیادی همراه است.

بر مبنای مدار معادل پیشنهاد شده برای STATCOM که در شکل (۲) نشان داده شده است، سه پارامتر داخلی مهم برای STATCOM وجود دارد که علاوه بر کنترل ولتاژ می‌توان با کنترل آنها نیز می‌توان عملکرد STATCOM را کنترل کرد. این کنترل معمولاً توسط کنترل یکی از سه پارامتر زیر انجام می‌شود:

- ۱- راکتانس STATCOM (X_{sh})
- ۲- اندازه ولتاژ خروجی کانورتر STATCOM (V_{sh})
- ۳- اختلاف زاویه ولتاژ خروجی کانورتر STATCOM و زاویه ولتاژ شین متصل به آن ($\theta_{sh} - \theta_l$) و یا معادل آن میزان توان اکتیو تزریقی STATCOM به شبکه که معمولاً برابر صفر است؛ اما در صورتی که در قسمت DC، STATCOM بجای خازن از منابع ذخیره انرژی استفاده شود، STATCOM توانایی تزریق توان اکتیو نیز خواهد داشت. این باعث بهبود عملکرد STATCOM برای افزایش کیفیت توان و بهره‌برداری متقارن شبکه می‌شود [۱۱].

برای بررسی این مدها با قرار دادن معادله قید مربوطه (معادلات مشابه (۱۱) تا (۱۳)) در معادلات پخش بار و انجام پخش بار پیوسته برای مقادیر مختلف هر پارامتر (راکتانس، توان اکتیو و راکتیو) میزان تغییرات بارپذیری بر مبنای تغییرات هر پارامتر مشخص می‌شود. در شکل‌ها ۷، ۶ و ۸ این تغییرات به صورت منحنی رسم شده‌اند. در این شکل‌ها یک منحنی بر نقاط بدست آمده تطبیق داده شده است. همچنین با تقسیم‌کردن تمام مقادیر بر حد بارپذیری سیستم در حالت مبنا درصد بهبود پایداری ولتاژ محاسبه شده است.

۵-۱- حساسیت پایداری ولتاژ نسبت به راکتانس

STATCOM

شکل (۶) میزان افزایش حد بارپذیری سیستم با تغییر امپدانس STATCOM از حدود صفر تا منفی صد پریونیت را نشان می‌دهد.

۶- نتیجه

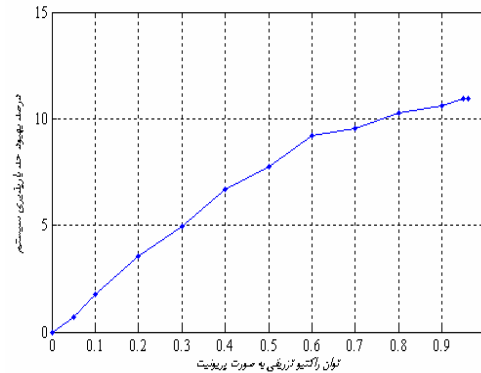
در این پژوهش تاثیرات مد کنترلی عنصر STATCOM بر عملکرد آن در بهبود پایداری ولتاژ بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها بر روی شبکه استاندارد سی شین IEEE تأثیر قابل توجه مد کنترلی بر عملکرد STATCOM را نشان می‌دهد. در مجموع نتایج تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که:

۱- برای بهبود پایداری ولتاژ بهترین مد کنترلی STATCOM کنترل راکتانس آن می‌باشد. در شبکه ۳۰ شین IEEE تأثیر افزایش امپدانس تا یک مقدار مشخص باعث افزایش قابل توجه پایداری ولتاژ می‌شود ولی در افزایش بیشتر امپدانس تأثیر مثبت چندانی ندارد. با این وجود راکتانس STATCOM دارای میزان بهینه‌ای است که STATCOM بهترین کارایی را در آن شرایط از خود نشان می‌دهد.

۲- اثر توان راکتیو تزریقی STATCOM بر افزایش حد پایداری ولتاژ اگرچه مثبت است اما این تأثیر کمتر از تأثیر افزایش امپدانس است. با توجه به این مد برای کنترل پیشنهاد نمی‌شود.
۳- تأثیر توان حقیقی تزریقی STATCOM بر افزایش حد پایداری ولتاژ اگرچه تا یک مقدار مشخص مثبت است اما افزایش بیشتر توان حقیقی می‌تواند حتی تأثیر منفی بر پایداری ولتاژ نیز داشته باشد.

۷- مراجع

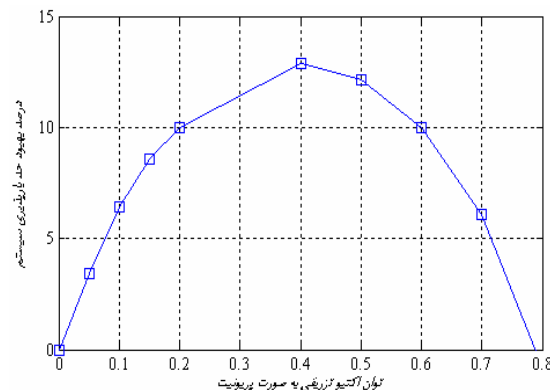
- [1] V.Ajjarapu, Computational Techniques for Voltage Stability Assessment and Control, Springer, 2006.
- [2] A. Kazemi, V. Vahidinasab, A. Mosallanejad; "Study of STATCOM and UPFC controllers for voltage stability evaluated by saddle-node bifurcation analysis", First International Power and Energy Conference, PECon 2006, Putrajaya, Malaysia, 2006, pp. 191-195.
- [3] N.Boonpirom, K.Paitoonwattanakij; "Static voltage stability enhancement using FACTS", The 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005, 2005, pp. 711 - 715.
- [4] A.Sode-Yome, N.Mithulananthan, K.Y.Lee; "Static voltage stability margin enhancement using STATCOM, TCSC and SSSC", IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, China, 2005, pp.1-6.



شکل ۷- منحنی حد بارپذیری - توان راکتیو تزریقی STATCOM

۵-۳- حساسیت پایداری ولتاژ نسبت به توان اکتیو تزریقی STATCOM

تأثیر توان اکتیو تزریقی STATCOM بر بهبود حد پایداری ولتاژ در شکل (۸) نشان داده شده است. تأثیر افزایش توان اکتیو بر بهبود پایداری ولتاژ از دو مد دیگر کمتر است و حتی با افزایش توان تزریقی از یک حد مشخص (در اینجا ۰/۴ پریونیت) تأثیر منفی بر میزان بهبودی پایداری ولتاژ دارد.



شکل ۸- منحنی حد بارپذیری - توان اکتیو تزریقی STATCOM

از مقایسه این سه مد کنترلی و مد کنترل ولتاژ شین به وضوح دیده می‌شود که میزان بهبود پایداری در مد کنترل ولتاژ شین حدود ۱۳٪، در مد کنترلی توان اکتیو تزریقی حداکثر حدود ۱۴ درصد، در مد کنترلی توان راکتیو تزریقی حداکثر حدود ۱۱ درصد است. اما مد کنترلی امپدانس میزان بهبودی پایداری ولتاژ بسیار بیشتر و در حدود ۳۸ درصد است به بیان دیگر بهترین بازده STATCOM در این مد کنترلی است.

- [5] X.P.Zhang, C.Rehtanz, B.Pal, **Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control**, Springer, Berlin, 2006, pp.189-216.
- [6] A. Sode-Yome, N. Mithulananthan, Kwang Y. Lee, “**A Comprehensive Comparison of FACTS Devices for Enhancing Static Voltage Stability**”, IEEE Power Engineering Society General Meeting, 24-28 June 2007, pp. 1 - 8.
- [7] A.R. Messina, M.A. Pe´rez, E. Herna´ndez; “**Co-ordinated application of FACTS devices to enhance steady-state voltage stability**”, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 44, Issue 6, 2003, pp. 259-267.
- [8] P.Kundur, B.Gao, G.K.Morison; “**Voltage stability evaluation using modal analysis**”, IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 7, Issue 4, Nov, 1992, pp.1529 – 1542
- [9] F.A.El-Sheikhi, Y.M.Saad, S.O.Osman, K.M.El-Arroudi; “**Voltage stability assessment using modal analysis of power systems including flexible AC transmission system (FACTS)** ”, Power Systems Engineering Conference, 7-9 May, 2003, pp. 105 – 108
- [10] J. M.Ramirez, J.L.Murillo-Pérez; “**Steady-State Voltage Stability with STATCOM**”, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 21, No. 3, 2006, pp.1453-1454.
- [11] W. Zhang, F. Li, L. M. Tolbert, “**Optimal Allocation of Shunt Dynamic Var Source SVC and STATCOM: A Survey.**” IEE International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM) October 31 - November 2, 2006, Hong Kong, China.
- [12] Eirini A. Leonidaki, Nikos D. Hatzargyriou, “**Investigation of Decision Trees (DTs) Parameters for Power System Voltage Stability Enhancement**”, Advances in Artificial Intelligence, Springer Berlin Heidelberg, Vol. 3955, 2006.
- [13] C.Taylor; “**Indices predicating voltage collapse including dynamic phenomena**” CIGRE Task Force 38.02.11, 1994.
- [14] S.Repo, “on-line voltage stability assessment of power system an approach of black-box modeling”, M.Sc.dissertation, Dept. Elect. Eng., tampere university of technology, 2001.
- [15] E.Acha, C.R.F.Esquivel, H. A. Pe´rez, C. A.Camacho; **FACTS:Modelling and Simulation in Power Networks**, John Wiley & Sons, New York, 2004,pp.191-195.
- [16] <http://www.ee.washington.edu/research/pstca/>