

امروزه در شبکه‌های قدرت ژنراتورهای سنکرون متعددی وجود دارد که وظیفه تولید توان را بر عهده دارند. با توجه به اینکه توان خروجی ژنراتورها در حالت گذرا تابعی از زوایای نسبی ولتاژ پشت راکتانس گذرای ژنراتورها، اندازه این ولتاژها و امپدانس خطوط می‌باشد. لذا چنانچه بتوان زوایای نسبی، اندازه ولتاژها و یا امپدانس خطوط را به سرعت در جهت کمک به تعادل توان در سیستم تغییر داد. علاوه بر افزایش امنیت سیستم، بهره‌برداری اقتصادی از امکانات موجود، میسر می‌شود. با پیشرفت ابزارهای الکترونیک قدرت، ادواتی تحت عنوان ادوات انعطاف‌پذیر سیستم‌های انتقال<sup>۱</sup> (FACTS) به سیستم‌های قدرت وارد شده‌اند که می‌توانند تعادل توان در سیستم را به گونه‌ای تغییر دهند که به حفظ پایداری کمک شایانی نمایند. خازن سری کنترل شده با تریستور<sup>۲</sup> (TCSC) یکی از ادوات FACTS مهم برای کاهش طول الکتریکی خط و میراسازی نوسانات سیستم می‌باشد [۱].

## ۱-۱ تاریخچه

طرح اصلی خازن سری کنترل شده با تریستور در سال ۱۹۸۶ توسط "ویتایاتیل" و دیگران تحت عنوان "روش تنظیم سریع امپدانس" پیشنهاد شد. متعاقب آن استفاده از این تجهیزات و طراحی کنترل‌کننده‌های مناسب برای آن‌ها به جهت تامین پایداری سیستم‌های قدرت در دستور کار محققین صنعت برق و کنترل قرار گرفت. در سال ۱۹۹۲ kunar.p. مقدمه‌ای بر مشکلات مطرح در بحث پایداری سیستم‌های قدرت ارائه نمود و در قالب یک گزارش جامع، بحث مفاهیم پایه و مدل‌های اجزاء مختلف سیستم‌های قدرت را طرح نمود و کنترل‌کننده‌ها را به طرز مناسبی طبقه‌بندی نمود. در سال ۱۹۹۵ johan et al مدلی نمونه از TCSC را ارائه کرد که برای مطالعات پایداری دینامیکی و پایداری گذرای شبکه مناسب باشد. پس از آن مطالعات گسترده‌ای بر روی تأثیر حضور TCSC بر پایداری گذرا و انواع روش‌های جایابی آن و بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده TCSC با توابع هدفی شامل پارامترهایی که در جهت بهبود پایداری گذرا عمل می‌کنند، انجام گرفته است [۲].

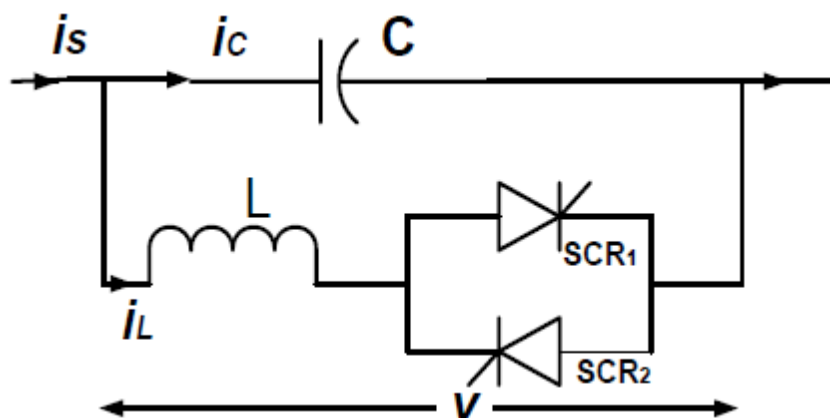
## ۱-۲ خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)

جبران‌ساز راکتانس خازنی، شامل یک بانک خازنی سری است که با یک راکتور کنترل شونده با تریستور موازی شده است تا راکتانس خازنی سری با تغییرات یکنواخت فراهم آید.

---

1. Flexible AC Transmission System  
2. Thyristor Controlled Series Capacitor

در واقع یک راکتور متغیر مثل یک راکتور قابل کنترل با تریستور<sup>۱</sup> (TCR)، به دو طرف یک خازن سری متصل می‌شود. زمانی که زاویه آتش TCR، ۱۸۰ درجه است، راکتور غیر هادی می‌شود و خازن سری امپدانس عادی خود را دارد. با شروع کاهش زاویه آتش به کمتر از ۱۸۰ درجه، امپدانس خازنی افزایش می‌یابد. در طرف دیگر زمانی که زاویه آتش ۹۰ درجه است راکتور به طور کامل هادی می‌شود و امپدانس کلی، حالت القایی پیدا می‌کند زیرا امپدانس راکتور طوری طراحی شده است که بسیار کمتر از امپدانس خازن سری باشد. در زاویه آتش ۹۰ درجه، TCSC به محدود ساختن جریان خطا کمک می‌کند. TCSC می‌تواند یک واحد منفرد بزرگ یا مجموعه یک بانک خازنی باشد. رابطه (۱-۱) ارتباط بین زاویه هدایت TCR و امپدانس معادل TCSC را نشان می‌دهد.



شکل (۱-۱): ساختار خازن سری کنترل شده با تریستور

$$X_{TCSC}(\alpha) = X_C - \frac{X_C^2}{(X_C - X_P)} \frac{\sigma + \sin \sigma}{\pi} + \frac{4X_C^2}{(X_C - X_P)} \frac{\cos^2(\sigma/2) (k \tan(k\sigma/2) - \tan(\sigma/2))}{(k^2 - 1) \pi} \quad (1-1)$$

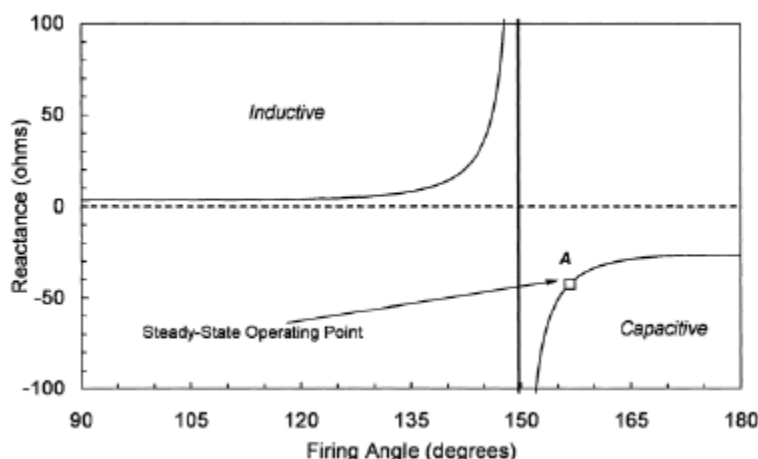
$X_C$  = راکتانس نامی خازن ثابت

$X_L$  = راکتانس سلف

$\sigma = 2(\pi - \alpha)$  = زاویه هدایت تریستورها

$k = \sqrt{\frac{X_C}{X_P}}$  = نسبت جبران سازی

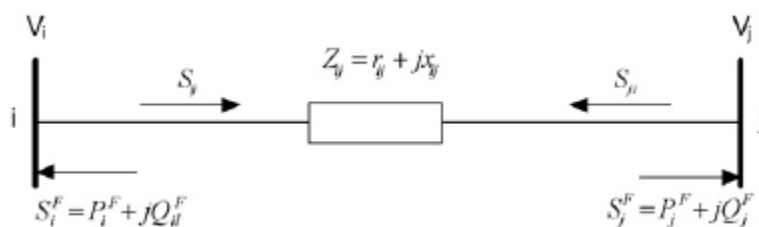
به این ترتیب، TCSC نمایش دهنده یک مدار موازی LC قابل تنظیم می‌باشد که با تغییر امپدانس راکتور کنترل شده با تریستور ( $X_L(\alpha)$ ) از مقدار حداکثر خود (بی نهایت) به مقدار حداقل آن ( $\omega L$ )، امپدانس TCSC تغییر می‌نماید. از لحاظ تئوری امپدانس حداکثر TCSC برابر بی نهایت و در حالتی رخ می‌دهد که بین سلف معادل و خازن حالت تشدید رخ دهد. شکل (۲-۱) نمودار تغییرات امپدانس TCSC را بر اساس زاویه آتش تریستورها نمایش می‌دهد، همانطور که از نمودار مشخص است امپدانس معادل می‌تواند در دو ناحیه القایی و خازنی قرار گیرد و این کار را می‌توان با تنظیم درست مدارهای کنترلی TCSC انجام داد [۲].



شکل (۲-۱): نمودار امپدانس- زاویه آتش TCSC

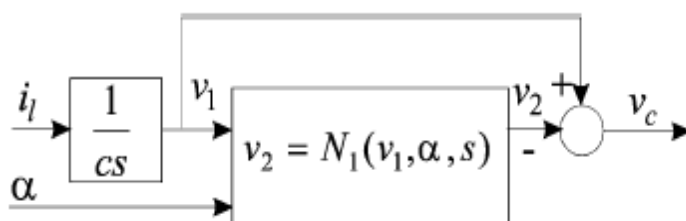
### ۳-۱ مدل سازی TCSC

به طور کلی برای اهداف مختلف مطالعه ادوات FACTS مدل سازی‌های متفاوتی انجام می‌گیرد. در مورد TCSC نیز این کار بر اساس نوع مطالعه صورت می‌پذیرد. برای مطالعات حالت دائمی و محاسبات پخش بار سیستم، مدل استاتیکی TCSC نیاز است. یکی از این مدل‌ها مدل تزریق می‌باشد که در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. این مدل TCSC را به گونه‌ای مدل می‌کند که مقدار مشخصی توان اکتیو و راکتیو را به یک گره تزریق می‌نماید به عبارت دیگر به صورت یک المان PQ مدل سازی می‌شود.



شکل (۳-۱): مدل تزریق TCSC

اما مدل سازی که برای مطالعات حالت گذرای سیستم انجام می گیرد به دلیل ماهیت غیرخطی این تحلیل باید به صورت شکل (۴-۱) مدل شود و قسمت غیر خطی نیز در آن گنجانده شود.



شکل (۴-۱): ساختار مدل های غیرخطی TCSC

در این مدل قسمت غیرخطی ولتاژ TCSC با بلوک  $v_2$  مدل شده است که تابعی غیرخطی از  $v_1$  زاویه آتش تریستورها، و فرکانس می باشد.

در این گزارش ابتدا تأثیر حضور TCSC بر عملکرد دینامیکی سیستم الکترومکانیکی با استفاده از تابع انرژی، بررسی می گردد سپس به بررسی روش های متفاوت جایابی TCSC در بهبود پایداری گذرای سیستم پرداخته می شود و در انتها به تحلیل تأثیر پارامترهای کنترل کننده TCSC بر پایداری گذرا و بهینه سازی این پارامترها پرداخته می شود. در این گزارش سعی شده است تا نتایج شبیه سازی مربوط به هر بخش در انتهای همان بخش ارائه گردد تا بین روش های مختلف به شکل بهتری صورت گیرد.