سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

مدرس: کاظم وارثی (kzm.varesi@gmail.com)

تعداد واحد: ۳ (نظری)

پیش‌نیاز: -

هم‌نیاز: الکترونیک صنعتی

هدف: آشنایی با مبانی و ساختارهای انتقال جریان متناوب انعطاف‌پذیر

- **مقدمه:** تعاریف و مفاهیم FACTS.
- **مبدل‌های منبع ولتاژ**
- **مبدل‌های منبع جریان**
- **جبران‌سازهای موازی استاتیک (شامل SVC و STATCOM)**
- **جبران‌سازهای سری استاتیک (شامل SSSC، TCSC، TSSC و GCSC)**
- **جبران‌سازهای ترکیبی سری و موازی (شامل IPFC و UPFC)**
- **تنظیم‌کننده‌های زاویه فاز و ولتاژ استاتیک (شامل TCPAR و TCVR)**

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مراجع درس

[۱] دکتر احمد فریدون درافشان، آشنایی با FACTS، نشر مهندسین مشاور قدس نیرو، بهار ۱۳۸۴.

[۲] دکتر محمدرضا حقی‌فام، مهندس مهدی رسول‌زاده حقیقی، سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر AC (FACTS)، کمیته تحقیقات شرکت سهامی برق منطقه‌ای هرمزگان.

[3] R. M. Mathur, R. K. Varma, Thyristor-based FACTS Controllers, Wiley-IEEE, 2002.

[4] V. K. Sood, HVDC and FACTS Controllers, Springer, 2004.

[5] G. Hingorani, L. Gyugyi, Understanding FACTS, Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, Wiley-IEEE Press, 1999.

[6] E. Acha, FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, Wiley, 2004.

[7] X. P. Zhang, C. Rehtanz, B. Pal, Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, 2nd edition, Springer, 2012.

[8] Y. H. Song, Flexible ac Transmission Systems (FACTS), IET Press, 1999.

[9] K. R. Padiyar, FACTS Controllers in Power Transmission and Distribution, 2007.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❖ ارزیابی:

- پروژه: ۱۰ نمره
- پایان‌ترم: ۱۰ نمره
- حضور و غیاب: ۱ نمره (اضافی)

❖ روند پروژه:

۱. **انتخاب مقاله معتبر (چاپ شده در مجلات معتبر، ارائه شده بعد از سال ۲۰۱۵) با موضوع مورد علاقه (یک هفته)**
۲. **ارائه گزارش فارسی –صرفاً ترجمه– (دو هفته)**
۳. **تجزیه و تحلیل کامل مقاله انتخابی و روابط ارائه شده در آن و تحویل گزارش دوم (دو هفته)**
۴. **پیشنهاد ایده(های) جدید، پیاده‌سازی آن در مقاله، انجام شبیه‌سازی‌های مربوطه و ارائه گزارش سوم (سه هفته، قابل تمدید تا ۵ هفته)**
۵. **آماده‌سازی مقاله برای ارائه در کنفرانس‌های معتبر نمایه شده در IEEE (دو هفته)**
۶. **ارائه شفاهی کارهای انجام گرفته، در قالب فایل پاور پوینت برای سایر اعضاء کلاس، در موعد مقرر (بر اساس زمان‌بندی تعیین شده).**

- **توجه:** هر گام از روند پروژه، دارای نمره‌بندی جداگانه می‌باشد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❖ لطفاً برای دریافت اطلاعات تکمیلی درباره این درس، به آدرس: **سایت دانشکده مهندسی برق، آموزش، دروس کارشناسی ارشد، ادوات FACTS** مراجعه بفرمایید.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS

❖ دسته‌بندی کنترل‌کننده‌های FACTS

I. کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

a. جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))
b. خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))
c. شیفت‌دهنده فاز (Phase Shifter)

II. کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

a. جبران‌گرهای سنکرون استاتیکی (Static Synchronous Compensators (STATCOM))
b. جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی (Static Synchronous Series Compensators (SSSC))
c. کنترل‌کننده یکپارچه عبور توان (Unified Power Flow Controller (UPFC))
d. کنترل‌کننده عبور توان بین‌خطی (Interline Power Flow Controller (IPFC))
e. ...

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌سازی سری

- با استفاده از این نوع جبران‌سازی می‌توان پایداری و میزان بارگذاری شبکه‌های انتقال ولتاژ بالارا افزایش داد.
- در جبران‌سازی سری، مقداری از افت ولتاژ القایی خط توسط ولتاژ خازنی اعمالی جبران می‌شود. به عبارت دیگر، این نوع جبران‌سازی مبتنی بر کاهش راکتانس مؤثر خط می‌باشد.
- توان راکتیو تولیدی خازن سری با مربع جریان خط متناسب است. بنابراین، می‌توان ادعا کرد که خازن سری دارای تأثیر خود-تنظیمی می‌باشد. هنگام افزایش بارگذاری خط، توان راکتیو تولیدی خازن سری نیز افزایش می‌یابد و برعکس.
- تأثیر جبران‌سازی سری بر سیستم قدرت را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

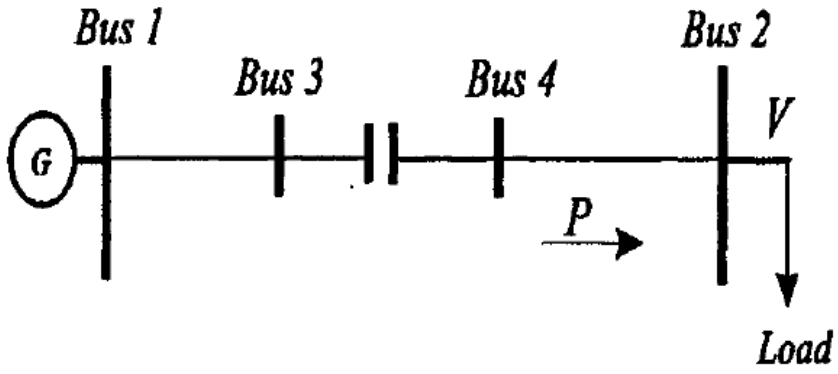
۱) تنظیم ولتاژ حالت دائمی و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ
۲) بهبود پایداری گذرای زاویه روتور
۳) کنترل پخش بار

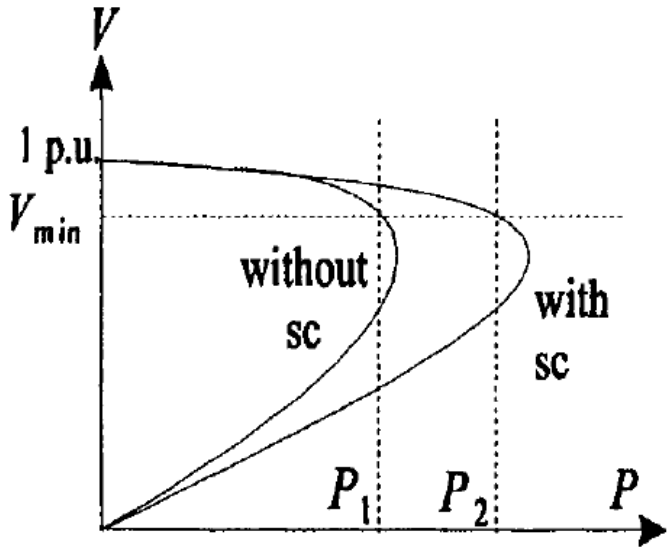
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

۱) تنظیم ولتاژ حالت دائمی و جلوگیری از فروپاشی ولتاژ

- در بارگذاری سبک خط، هنگامی‌که افت ولتاژ القایی (ناشی از راکتانس سری) خط کوچک است، ولتاژ تولیدی جبران‌ساز سری نیز کوچک است. اما، در بارگذاری‌های سنگین که افت ولتاژ خط نیز افزایش می‌یابد، میزان ولتاژ تولیدی جبران‌ساز سری نیز افزایش می‌یابد. بنابراین، در هر شرایط بارگذاری، جبران‌ساز سری قادر است تا ولتاژ سیستم را در مقدار مطلوب تنظیم نماید.
- همچنین، جبران‌ساز سری قادر است تا با کاهش راکتانس مؤثر خط، ناحیه پایداری ولتاژ را نیز توسعه دهد. این ویژگی می‌تواند از وقوع فروپاشی ولتاژ جلوگیری کند.



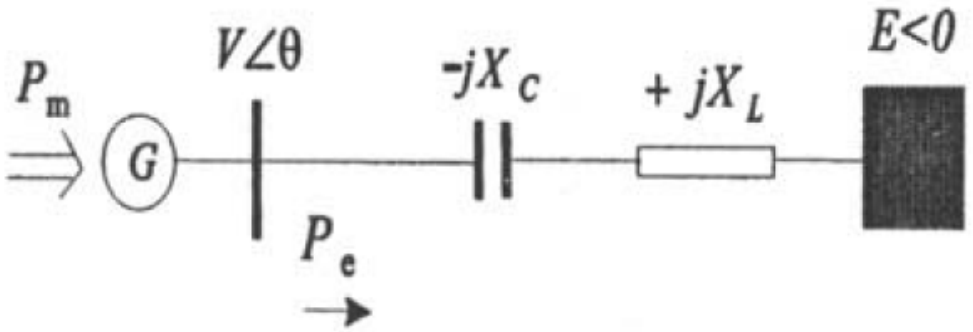


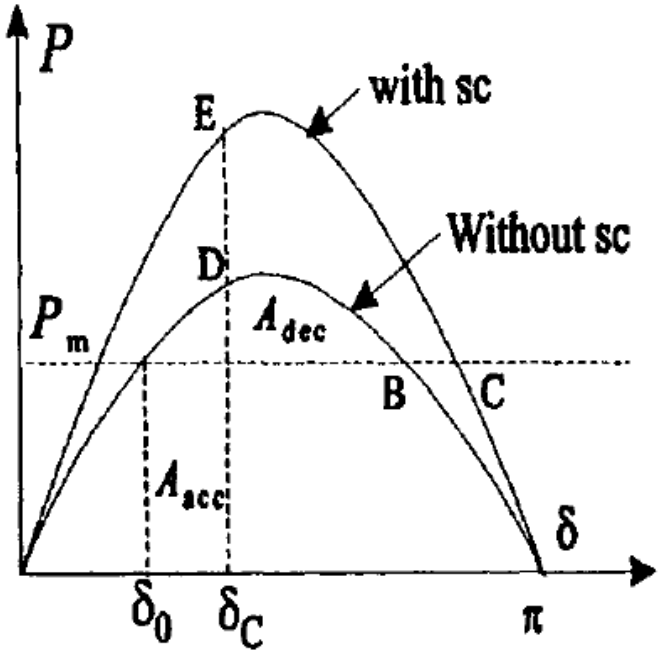
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

۲) بهبود پایداری گذرای زاویه روتور

- سیستم نمونه تک‌ماشینه با باس بینهایت مفروض است. از معیار "برابری ناحیه‌ها" برای بیان تأثیرگذاری جبران‌سازی سری در بهبود پایداری گذرا استفاده می‌شود. شرط پایدار ماندن سیستم عبارتست از: $A_{dec} > A_{acc}$
- شکل زیر مؤید افزایش قابل‌توجه حاشیه پایداری سیستم، هنگام استفاده از جبران‌سازی سری می‌باشد. این جبران‌ساز با کاهش راکتانس مؤثر خط، منحنی P-δ سیستم را به سمت بالا منتقل می‌کند (افزایش توان قابل انتقال و افزایش حاشیه پایداری).





سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

۳) کنترل پخش بار

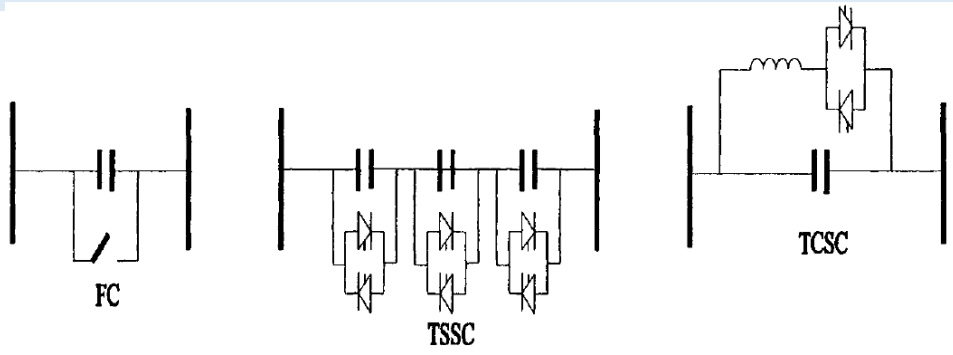
- از جبران‌سازی سری می‌توان برای کنترل پخش بار سیستم در حالت دائمی بهره برد. جبران‌سازی خطوط انتقال با ظرفیت حرارتی کافی، می‌تواند اضافه‌بارهای احتمالی خطوط موازی دیگر را فرونشاند.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ الگوهای جبران‌سازی سری

- خطوط انتقال می‌تواند با استفاده از خازن‌های سری ثابت و یا بصورت مؤثرتر توسط خازن‌های سری قابل کنترل توسط کلیدهای تریستوری جبران‌سازی شوند. خازن‌های سری قابل کنترل، به دو روش زیر قابل تحقق می‌باشند:
  - ✓ جبران‌سازی بوسیله خازن سری کلیدزنی‌شده با تریستور (TSSC)
  - ✓ جبران‌سازی بوسیله خازن سری کنترل‌شونده با تریستور GTO (GCSC)
  - ✓ جبران‌سازی بوسیله خازن سری کنترل‌شونده با تریستور (TCSC)
- جبران‌ساز TSSC از ترکیب موازی تریستورهای موازی-معکوس با بخشی از بانک خازنی سری تشکیل می‌شود. بدین ترتیب، بخش‌های خازن جبران می‌توانند بصورت مقادیر گسسته خیلی سریع در مدار قرار گیرند یا از آن خارج شوند. GCSC نیز گونه مشابه TSSC است که در آن امکان کنترل میزان خازن اعمالی، از طریق کنترل زاویه آتش کلیدها فراهم است.
- جبران‌ساز TCSC از ترکیب موازی یک راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR) و یک بانک خازنی تشکیل می‌شود. ساختار TCSC این قابلیت را فراهم می‌سازد تا راکتانس خازنی فرکانس پایه جبران‌ساز در محدوده وسیعی بطور ملایم و صاف قابل کنترل باشد.

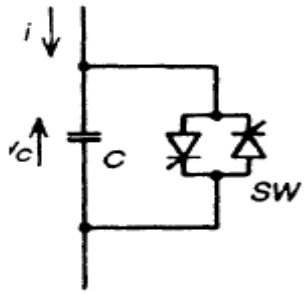


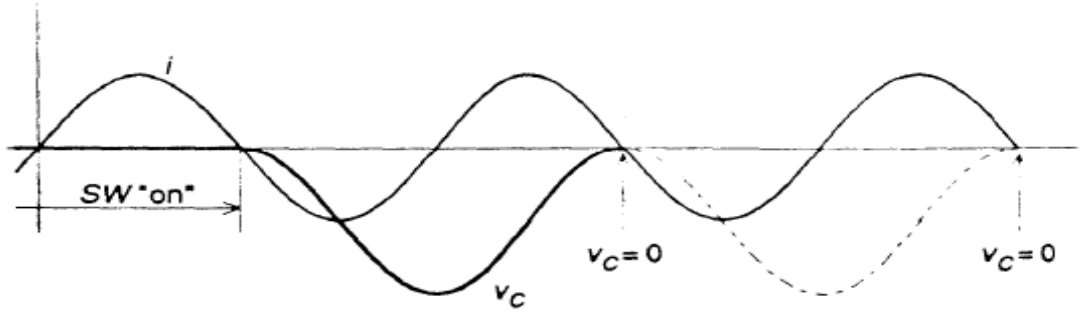
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کلیدزنی‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC))

- این وسیله از کلیدهای تریستوری برای ورود و خروج سریع بانک‌های جبران‌ساز خازنی سری در پله‌های منفصل استفاده می‌کند.
- اگر کلید (تریستورها) روشن (در حال هدایت) باشند، خازن جبران‌ساز بای-پس می‌شود. در غیر این‌صورت، خازن جبران‌ساز در مدار قرار می‌گیرد. خازن معادلی که از این طریق می‌تواند در مدار قرار گیرد برابر است با: $0<C<(C/m)$
- از TSSC در شرایط چند مرحله‌ای می‌توان استفاده کرد، عمل کلیدزنی در جریان صفر اتفاق می‌افتد. با توجه به این حالت از سوییچ خوردن کلیدها، با وجود شارژ و دشارژ شدن خازن‌ها، تعویض پلاریته صورت نگرفته است.





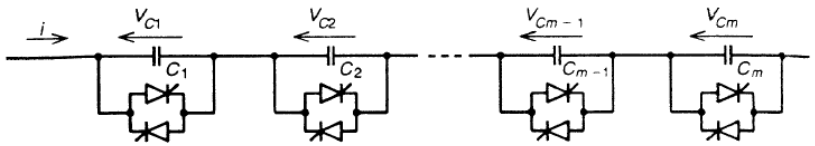


Figure 6.10 Basic Thyristor-Switched Series Capacitor scheme.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کلیدزنی‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Switched Series Capacitor (TSSC))

- مشخصه ولتاژ-جریان یک TSSC چهاربخشی: افزایش پله‌ای خازن‌ها در مدار، سبب کاهش خازن مؤثر سری شده و باعث ایجاد جهش‌های پله‌ای در مشخصه TSSC می‌شود. به طور کلی، کنترل در این حالت، نسبت به جبران‌سازی سری GCSC انعطاف‌پذیری کمتر و معایب بیشتری از نظر ولتاژ وارد بر جبران‌ساز دارد.

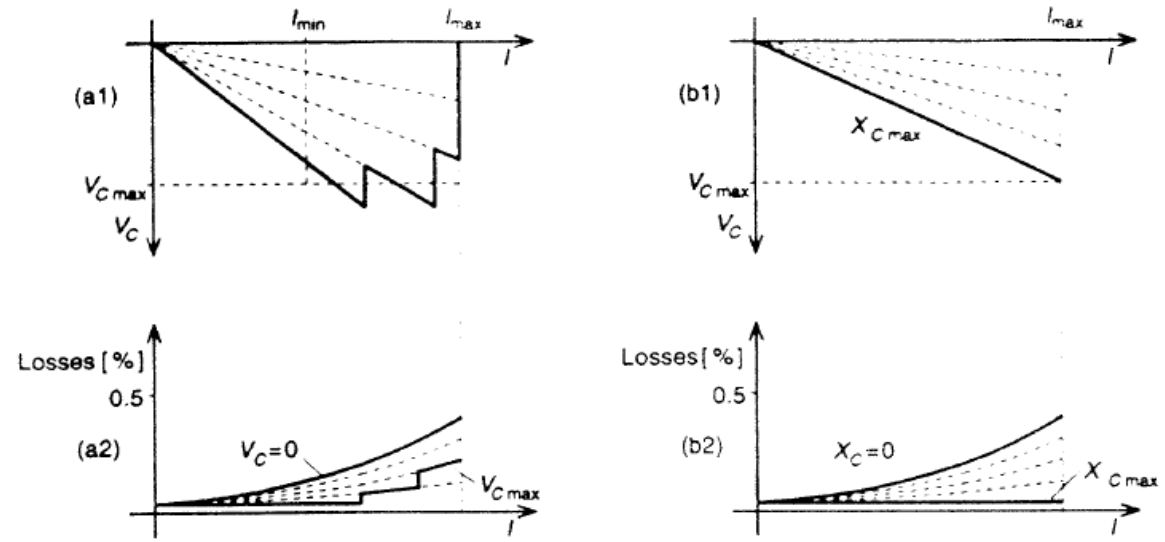


Figure 6.12 Attainable V-I (compensating voltage vs. line curre-a) cha:acterists of the TSSC when operated in voltage control (al) and reactance control (bl) modes, and the associated loss vs. line current characteristics (a2 and b2, respectively).

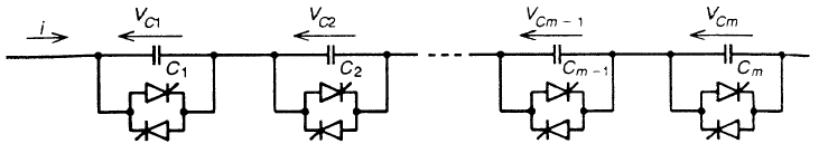


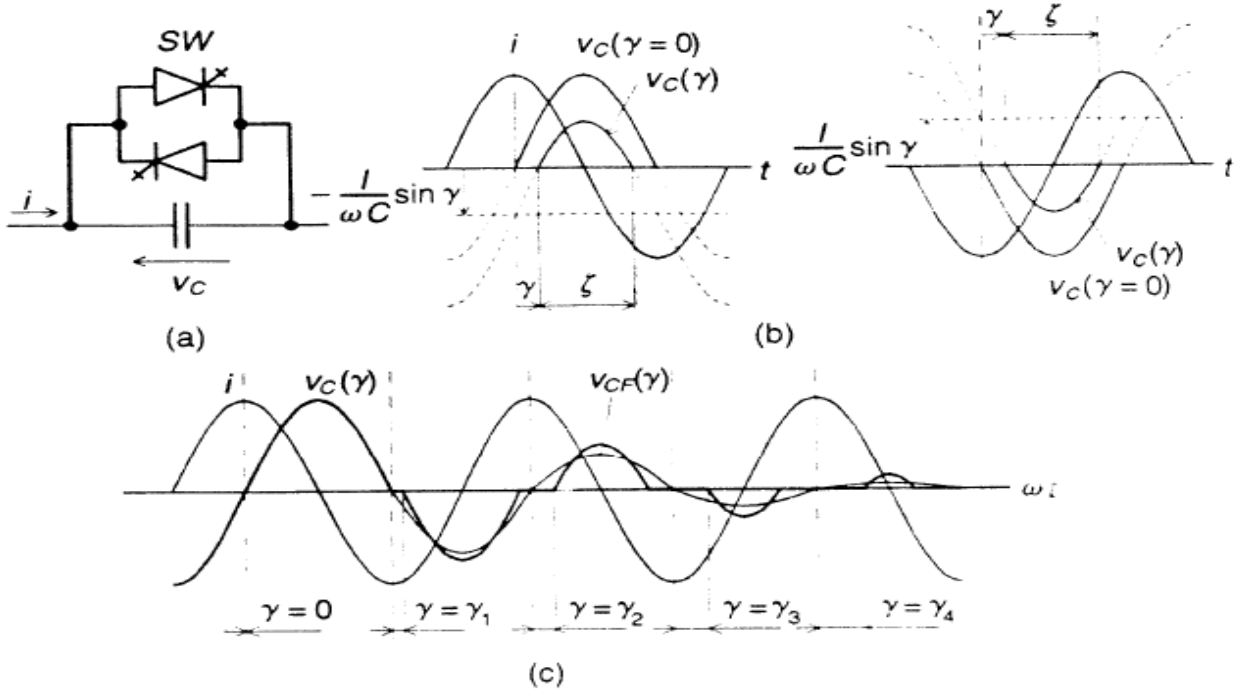
Figure 6.10 Basic Thyristor-Switched Series Capacitor scheme.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کنترل‌شونده با GTO (GTO Controlled Series Capacitor (GCSC))

- در این جبران‌ساز، هدف تغییر ولتاژ خازن از طریق کنترل زاویه آتش کلیدهاست.
- هنگام بسته بودن کلید (حال هدایت)، ولتاژ خازن بدلیل بای-پس شدن برابر صفر است. اما هنگام باز بودن کلید (در حالت قطع)، خازن وارد مدار شده و جریان خط از آن عبور کرده و در دو سر آن ایجاد ولتاژ می‌کند. مدت زمان روشن یا خاموش بودن کلیدها از طریق زاویه گاما (γ) که بیانگر زاویه تأخیر در قطع کلید است، کنترل می‌شود $0\leq\gamma\leq(\pi/2)$. $V_c(\gamma)$ بیانگر ولتاژ خازن و i نشانگر جریان خط است.

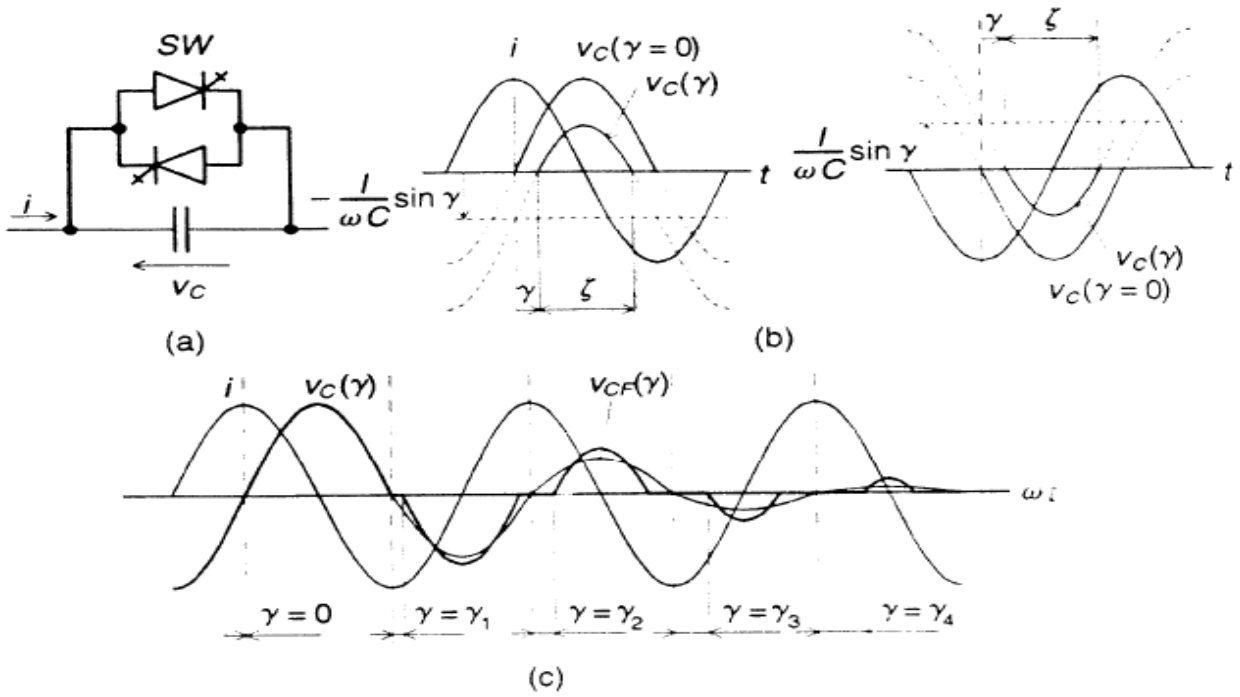


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کنترل‌شونده با GTO (GTO Controlled Series Capacitor (GCSC))

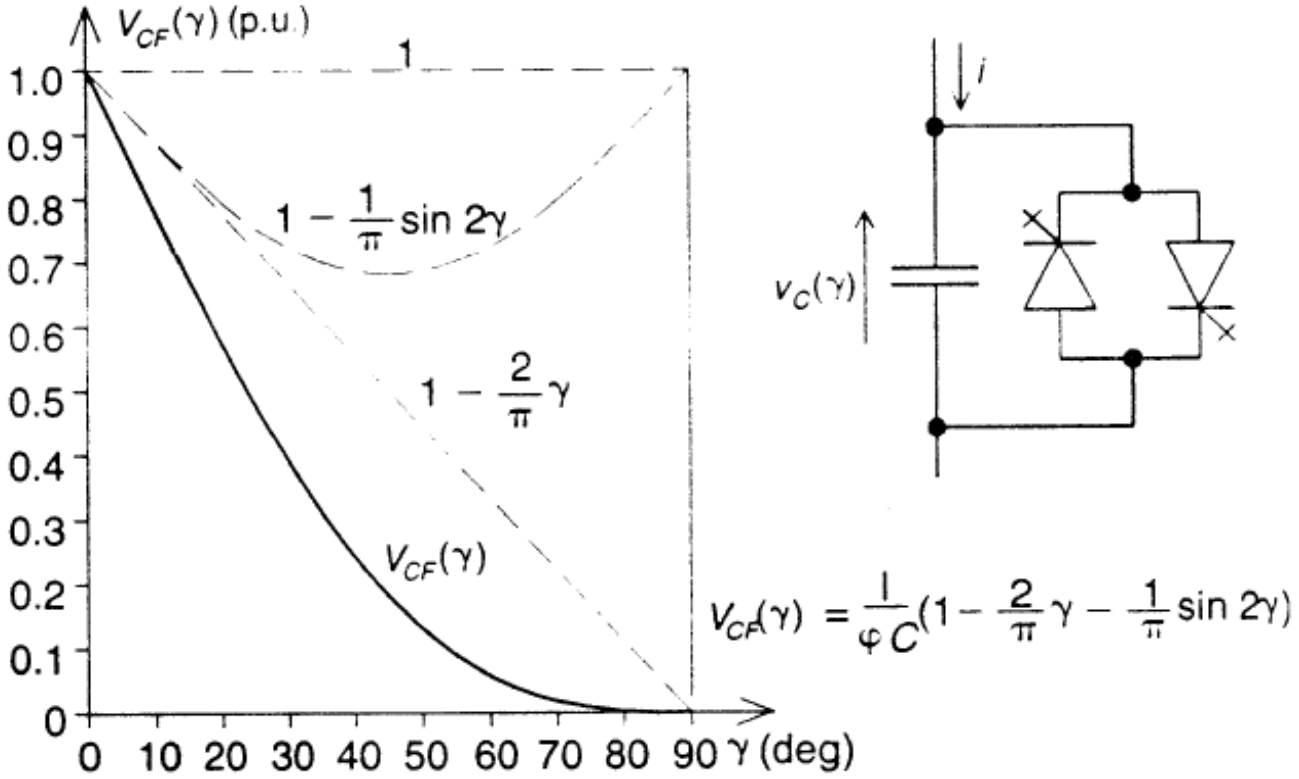
- شکل b بیانگر جبران‌سازی در زاویه تأخیر صفر ($\gamma=0$) است. در این شکل ولتاژ با یک تأخیر نسبت به جریان دیده می‌شود. بیشینه ولتاژ خازن در این حالت ($\gamma=0$) مشاهده می‌شود.
- شکل c نشانگر تغییرات پیوسته زاویه تأخیر γ در یک دوره زمانی از عملکرد جبران‌ساز است. مطابق شکل c، با افزایش γ، ولتاژ تزریقی خازن رو به کاهش است. ζ بیانگر زاویه قطع کلید است. در اولین صفر شدن ولتاژ خازن، کلید دوباره بسته خواهد شد. رابطه زیر بیانگر ولتاژ خازن، براساس تغییرات اندازه خازن و زاویه γ بوده و رابطه بعدی مولفه اصلی این ولتاژ را نشان می‌دهد.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کنترل‌شونده با GTO (GTO Controlled Series Capacitor (GCSC))



$$v_C(t)=\frac{1}{C}\int_{\gamma}^{\omega t} i(t)dt=\frac{I}{\omega C}(\sin\omega t-\sin\gamma)$$

$$V_{CF}(\gamma)=\frac{I}{\omega C}(1-\frac{2}{\pi}\gamma-\frac{1}{\pi}\sin 2\gamma)$$

$$X_C(\gamma)=\frac{1}{\omega C}(1-\frac{2}{\pi}\gamma-\frac{1}{\pi}\sin 2\gamma)$$

پس GCSC می‌تواند به عنوان یک امپدانس متغیر عمل کند

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ خازن سری کنترل‌شونده با GTO (GTO Controlled Series Capacitor (GCSC))

- رابطه زیر بیانگر ولتاژ خازن، براساس تغییرات اندازه خازن و زاویه γ بوده و رابطه بعدی مولفه اصلی این ولتاژ را نشان می‌دهد.
- رابطه زیر بیانگر هارمونیک‌های این نوع جبران‌ساز است. این جبران‌ساز فقط شامل هارمونیکهای فرد بوده و دامنه آن‌ها به زاویه تاخیر γ بستگی دارد.
- برای کاهش هارمونیک‌ها از روش کنترل مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این روش از m عدد GCSC سری با سهم هر یک $(1/m)$ از جبران‌سازی کل، استفاده می شود. یکی از جبران‌سازها همیشه در مدار بوده و بقیه بر حسب نیاز شبکه، قطع و وصل می‌شوند.

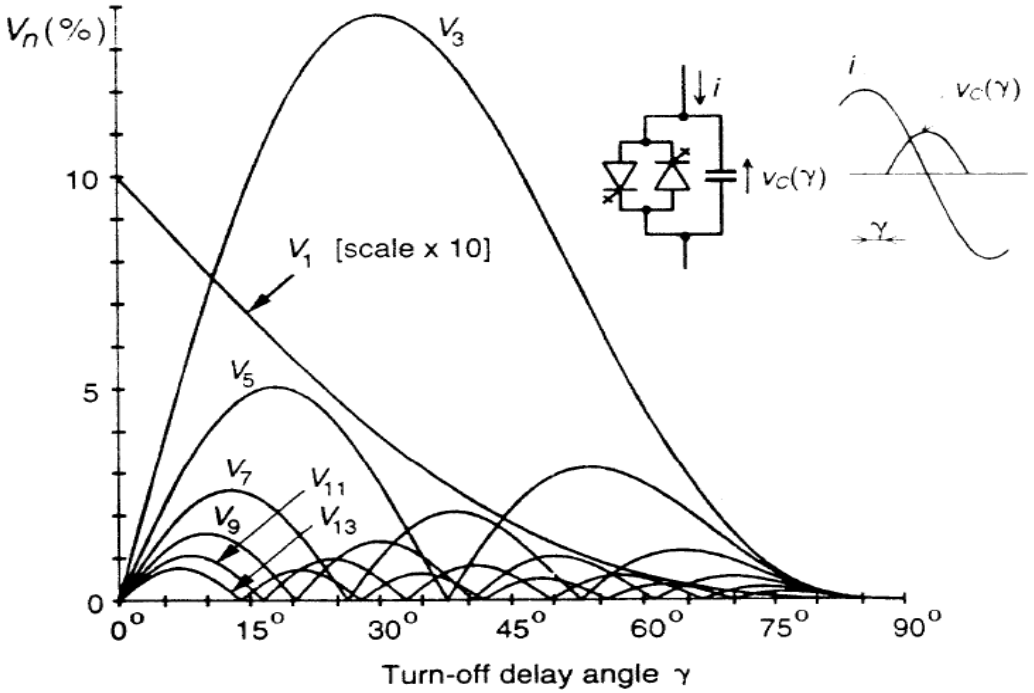


Figure 6.8 The amplitudes of the harmonic voltages, expressed as percents of the maximum fundamental capacitor voltage vs. the turn-off delay angle γ.

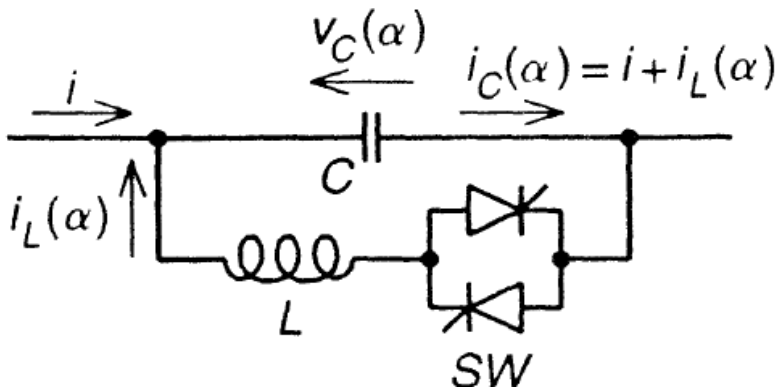
$$v_{Cn}(\gamma) = \frac{I}{\omega C}\frac{4}{\pi}\left\{\frac{\sin\gamma\cos(n\gamma) - n\cos\gamma\sin(n\gamma)}{n(n^2-1)}\right\}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- طرح اصلی خازن کنترل‌شده با تریستور، در ابتدا تحت عنوان روش تنظیم سریع امپدانس شبکه پیشنهاد شد. راکتور کنترل‌شده با تریستور به صورت موازی با خازن جبران‌ساز سری به کار می‌رود. در اجرای عملی TCSC، چندین جبران‌ساز از این نوع می‌توانند به صورت سری به هم متصل شوند، تا ولتاژ نامی و مشخصات عملکردی مطلوب بدست آید.
- نظریه اصلی در بکار بردن سلف موازی، در واقع به وجود آوردن یک خازن با تغییرات یکنواخت از طریق حذف بخشی از ظرفیت خازنی به وسیله TCR است.
- امپدانس TCSC و رابطه آن با زاویه α، مطابق زیر است. X_L :امپدانس راکتور، زاویه α: زاویه تأخیری است که از نقطه پیک ولتاژ خازن (یا معادل آن، نقطه صفر شدن جریان خط)، اندازه گیری شده است.



$$X_{TCSC}(\alpha) = \frac{X_C X_L(\alpha)}{X_L(\alpha) - X_C}$$

$$X_L(\alpha) = X_L \frac{\pi}{\pi - 2\alpha - \sin(\alpha)}, \quad X_L \le X_L(\alpha) \le \infty$$

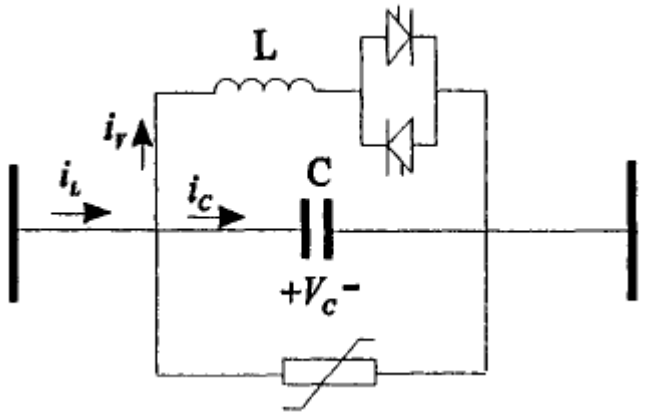
راکتانس سلف به مراتب کوچک‌تر از راکتانس بانک خازنی است

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- بانک خازنی دارای مقاومت ۱۰-۳۰ اهم بر فاز است. مقدار نامی جریان مؤثر پیوسته عبوری از تریستورها برابر ۱۵۰۰ الی ۳۰۰۰ آمپر است. اندوکتانس سلف (با هسته هوایی) حدود چند میلی‌هانری است. از یک مقاومت متغیر اکسید-فلزی برای حفاظت از اضافه ولتاژ در دو سر خازن استفاده شده است.
- مشخصه TCSC بستگی به راکتانس نسبی امپدانس‌های بانک‌خازنی ($X_C = \frac{1}{C\omega_n}$) و شاخه تریستوری ($X_L(\alpha)$) دارد.



فرکانس تشدید

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_n \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}$$

رابطه بین فرکانسهای تشدید و شبکه

$$\lambda = \frac{\omega_R}{\omega_n} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}}\ ,\ 2 \le \lambda \le 4$$

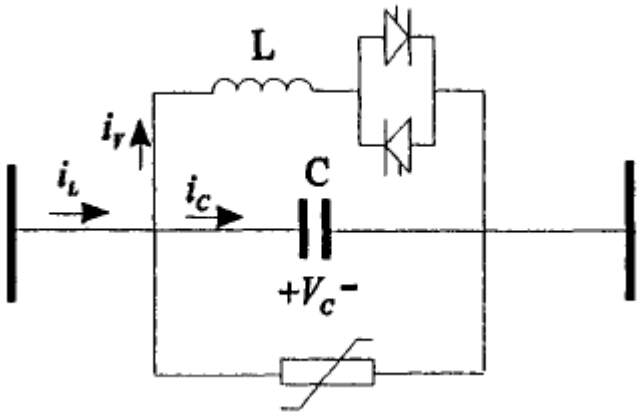
راکتانس سلف به مراتب کوچک‌تر از راکتانس بانک خازنی است

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- مدهای کاری مختلفی را می‌توان برای TCSC متصور شد. راکتانس ظاهری TCSC برای هر مد متفاوت است.



مؤلفه اصلی ولتاژ TCSC

راکتانس ظاهری

$$X_{app} = \mathrm{Im}\left(\frac{V_{C1}}{I_{L1}}\right)$$

مؤلفه اصلی جریان TCSC

معیار افزایندگی (Boosting Factor)

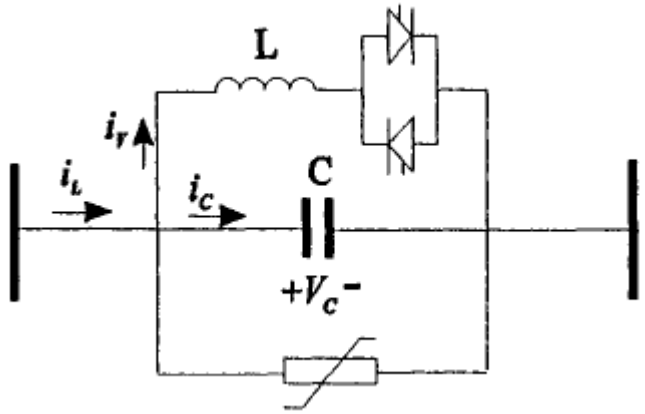
$$K_B = \frac{X_{app}}{X_C}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- **حالت قطع (Blocking mode):** در این مد فرمانی به تریستورها داده نمی‌شود، بنابراین در حالت قطع باقی می‌مانند. در این حالت، TCSC بصورت یک خازن سری ثابت با معیار افزایندگی واحد (یک) عمل می‌کند. بنابراین، معیار افزایندگی TCSC برابر یک است.
- جریان TCSC به اندازه ۹۰ درجه از ولتاژ آن عقب‌تر است.



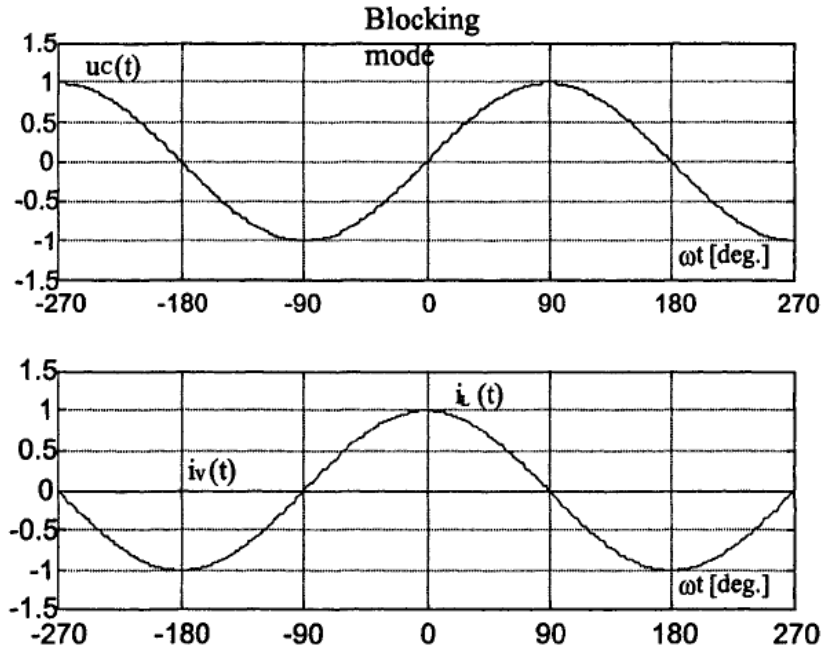


Figure 5.6 Waveforms of voltage and currents in block mode

ولتاژ خازن $V_C = jX_C I_L$

راکتانس ظاهری $X_{app} = \mathrm{Im}\left(\frac{V_{C1}}{I_{L1}}\right) = X_C$

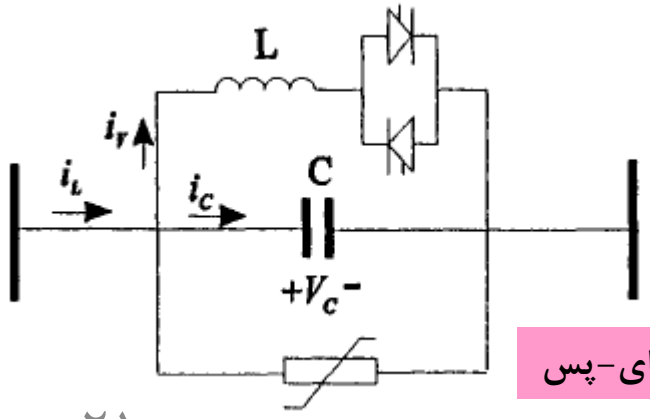
معیار افزایندگی (Boosting Factor) $K_B = \frac{X_{app}}{X_C} = 1$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- **حالت گذر (Bypass mode):** در این حالت، فرمان اعمالی به تریستورهای مستقیم و معکوس به ترتیب برابر ۹۰ و ۲۷۰ درجه می‌باشند. بنابراین تریستورها همواره در حالت هدایت باقی می‌مانند. بدین ترتیب، TCSC بصورت ترکیب موازی سلف (X_L) و خازن سری (X_C) عمل می‌کند که بسته به مقدار راکتور (L) و خازن (C) می‌تواند در یکی از دو حالت سلفی یا خازنی ثابت به فعالیت بپردازد.
- معمولاً با توجه به اینکه $(X_C/X_L) > 2$ است، جریان عبوری از راکتور به مراتب بیشتر از جریان عبوری از خازن است. می‌توان گفت که جریان عبوری از طریق راکتور بای-پس می‌شود. ولتاژ دو سر خازن در حالت بای-پس به مراتب کوچک‌تر از حالت قطع (Blocking) است.



ولتاژ خازن

$$X_{app} = \frac{X_C X_L}{X_C + X_L}$$

معیار افزایندگی

$$K_B = \frac{X_{app}}{X_C} = \frac{\frac{X_C X_L}{X_C + X_L}}{X_C} = \frac{X_L}{X_C + X_L} = \frac{1}{1 + \frac{X_C}{X_L}}$$

ولتاژ خازن در حالت بای-پس

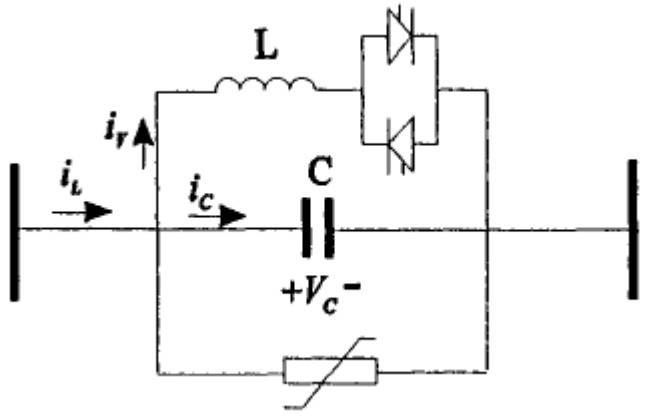
$$V_{C,By-pass} = jX_{app} I_L = jK_B X_C I_L = j\frac{X_C}{1 + \frac{X_C}{X_L}} I_L = V_{blocking} \frac{1}{1 + \frac{X_C}{X_L}}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- **حالت گذر (Bypass mode):** از آنجا که ولتاژ دو سر خازن در حالت بای-پس به مراتب کوچک‌تر از ولتاژ حالت قطع (Blocking) است، استفاده از این مد کاری در زمان‌های وقوع عیب (خطا) توصیه می‌شود.



ولتاژ خازن در حالت بای-پس

$$V_{C,By-pass} = jX_{app} I_L = V_{blocking} \frac{1}{1+\frac{X_C}{X_L}}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

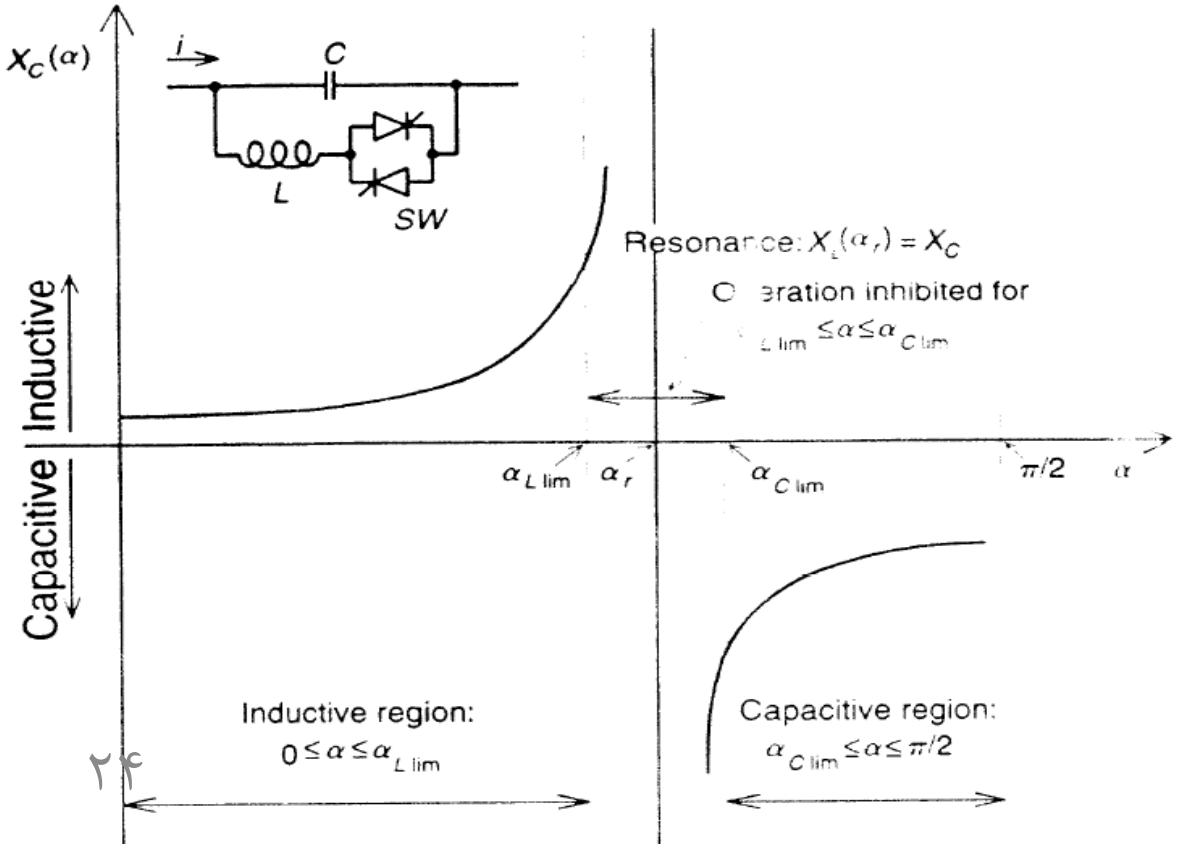
- **حالت افزایش خازنی (Capacitive boost mode):** در زوایای آتش بزرگ‌تر از ۹۰ درجه ($\alpha>90°$) ویژگی خازنی مدار بر ویژگی سلفی (سلف موازی)آن غلبه می‌کند. بنابراین، TCSC حالت خازنی به خود می‌گیرد. هرچه زاویه α بیشتر از ۹۰ باشد، مانند آن است که خازن بزرگ‌تری در مدار قرار گرفته است. این حالت، به عنوان مد کاری رایج TCSC در نظر گرفته می‌شود.
- معیار افزایندگی مربوط به این حالت، بین مقادیر متناظر حالات قطع (Blocking mode) و گذر (By-pass mode) قرار دارد. یعنی به یک نزدیک‌تر می‌شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- مشخصه TCSC (نحوه تغییر امپدانس جبران‌ساز با توجه به تغییرات زاویه تأخیر α) مطابق شکل زیر است.
- در زاویه تأخیری که امپدانس سلف و خازن برابر شده است، تشدید رخ داده است.
- رابطه زیر بیانگر هارمونیک‌های این نوع جبران‌ساز است. این جبران‌ساز فقط شامل هارمونیکهای فرد بوده و دامنه آن‌ها به زاویه تاخیر γ بستگی دارد.
- برای کاهش هارمونیک‌ها از روش کنترل مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این روش از m عدد GCSC سری با سهم هر یک $(1/m)$ از جبران‌سازی کل، استفاده می شود. یکی از جبران‌سازها همیشه در مدار بوده و بقیه بر حسب نیاز شبکه، قطع و وصل می‌شوند.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر تریستور (Thyristor Based FACTS Controllers)

❖ اصول کاری خازن سری کنترل‌شده بوسیله تریستور (Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC))

- مشخصه TCSC (نحوه تغییر امپدانس جبران‌ساز با توجه به تغییرات زاویه تأخیر α) مطابق شکل زیر است.
- در زاویه تأخیری که امپدانس سلف و خازن برابر شده است، تشدید رخ داده است.
- رابطه زیر بیانگر هارمونیک‌های این نوع جبران‌ساز است. این جبران‌ساز فقط شامل هارمونیکهای فرد بوده و دامنه آن‌ها به زاویه تاخیر γ بستگی دارد.
- برای کاهش هارمونیک‌ها از روش کنترل مرحله‌ای استفاده می‌شود. در این روش از m عدد GCSC سری با سهم هر یک $(1/m)$ از جبران‌سازی کل، استفاده می شود. یکی از جبران‌سازها همیشه در مدار بوده و بقیه بر حسب نیاز شبکه، قطع و وصل می‌شوند.

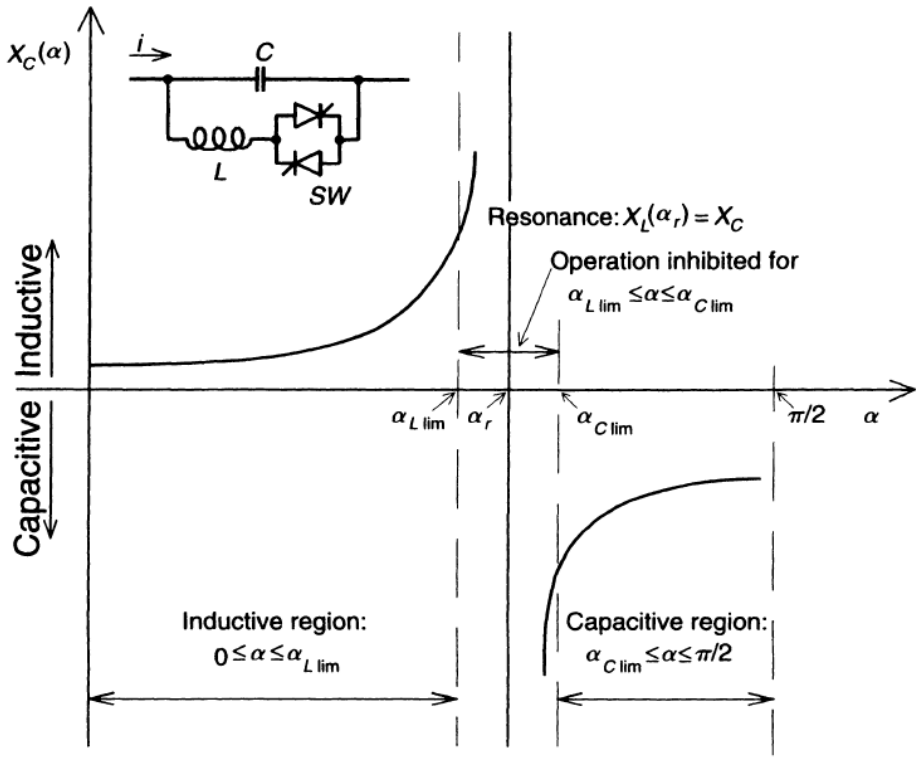


Figure 6.14 The impedance vs. delay angle α characteristic of the TCSC.