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. ...

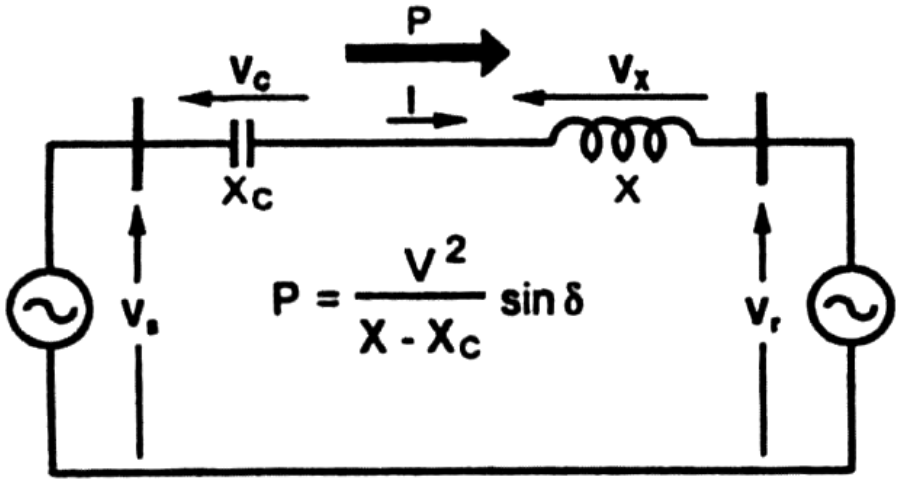
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

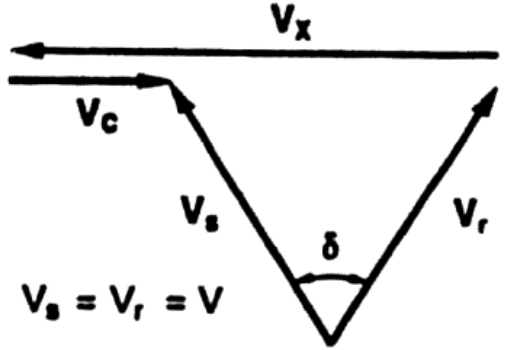
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ روش جبران‌سازی سری متداول

- با اضافه کردن خازن سری به خط انتقال، قسمتی از راکتانس سلفی خط انتقال (X) توسط راکتانس خازن (X_C) جبران می‌شود، که منجر به راکتانس جدید خط ($X_{new}=X-X_C$) می‌گردد. بدین ترتیب، بیشینه توان قابل انتقال از خط (با فرض یکسان بودن ولتاژ ابتدا و انتهای خط) افزایش می‌یابد.

$$P = \frac{V^2}{X - X_C}\sin(\delta) = \frac{V^2}{X_{new}}\sin(\delta)$$





سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- بنابراین اگر یک منبع ولتاژ در فرکانس اصلی که دامنه آن متناسب با جریان خط باشد به صورت سری به خط تزریق شود، یک جبران‌سازی یکسانی نسبت به حالت خازن سری در فرکانس اصلی به وجود می‌آید. از نظر ریاضی، این منبع ولتاژ به صورت روبرو تعریف می‌شود:

$$V_C = -jKXI$$

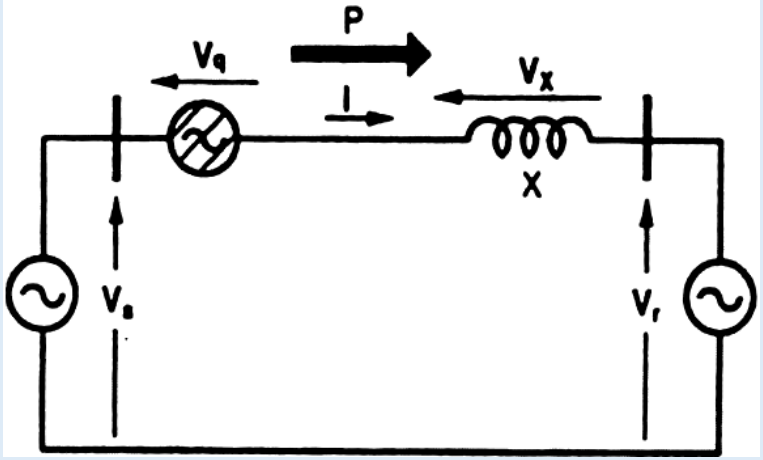
- V_C: فازور ولتاژ جبران‌سازی تزریق شده، I: فازور جریان خط، X: راکتانس سری خط و K: درجه جبران‌سازی سری است.
- بنابراین $KX=X_C$ نشان‌دهنده خازن سری مجازی است که همان ولتاژ جبران‌سازی لازم را فراهم می‌سازد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- تفاوت منبع ولتاژ سنکرون (جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی SSSC) با خازن سری و TCSC: ولتاژ تزریق‌شده توسط خازن سری و TCSC به خط، با جریان خط متناسب است، در حالی‌که SSSC قادر است تا هر ولتاژ دلخواهی را در هر جریان خط ایجاد کند. به عبارت دیگر، SSSC قادر است تا در صورت تغییر جریان خط، ولتاژ جبران را ثابت نگه دارد و یا اینکه دامنه ولتاژ جبرانی تزریقی را مستقل از دامنه جریان خط کنترل نماید.



منبع ولتاژ سنکرون به عنوان یک SSSC

- ولتاژ تزریقی توسط SSSC با Vq نمایش داده شده است.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

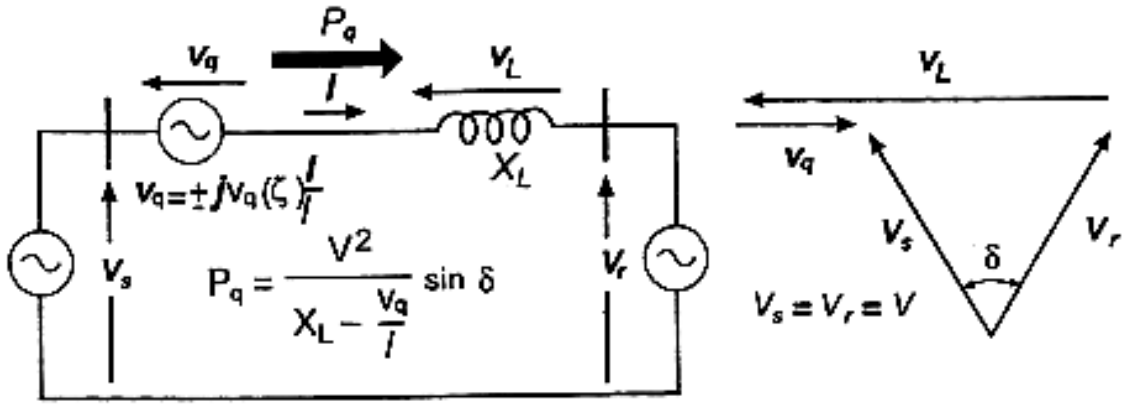
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- در جبران سری رایج، جریان خط به اندازه ۹۰ درجه از ولتاژ خط جلوتر است (حالت پیش‌فاز). با اعمال فرایند کنترلی ساده می‌توان ولتاژی تولید و به خط اعمال کرد که به اندازه ۹۰ درجه از جریان خط جلوتر باشد (حالت پس‌فاز). بدین ترتیب، جبران‌گر بصورت یک امپدانس سلفی عمل کرده و راکتانس خط را افزایش می‌دهد.
- عبارت کلی زیر را می‌توان برای ولتاژ تزریقی توسط SSSC یعنی Vq بیان نمود:

$$V_q = \pm j \frac{V_q(\zeta)}{I} \mathrm{I}$$

- $V_q(\zeta)$ دامنه ولتاژ جبرانی تزریقی $(0 \le V_q(\zeta) \le V_{q,max})$ و ζ پارامتر کنترلی است.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

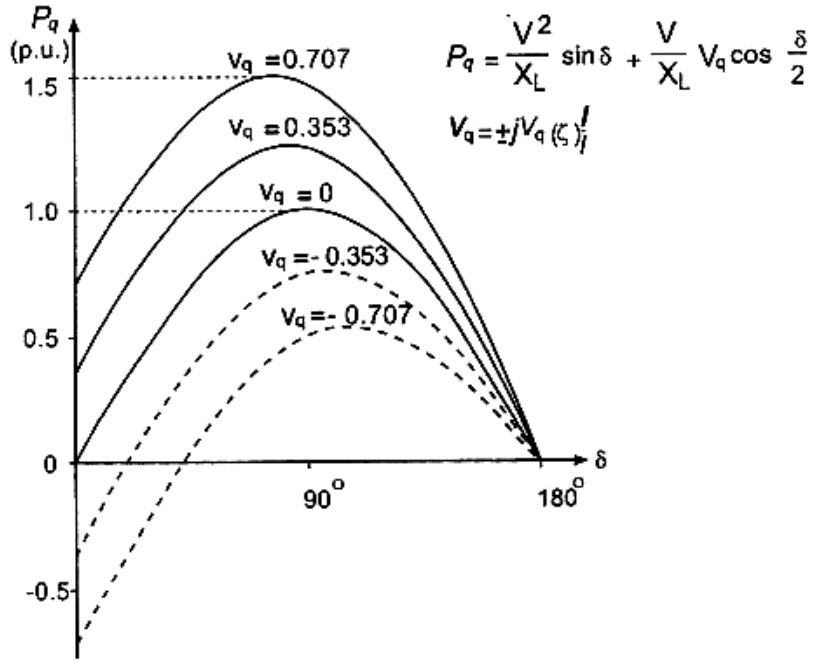
❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- رابطه P-δ یک سیستم دوماشینه که در آن از SSSC برای جبران‌سازی استفاده شده است بصورت زیر است:

$$P = \frac{V^2}{X}\sin\delta + \frac{V}{X}V_q\cos\frac{\delta}{2}$$

- نمودار P-δ بازاء Vqهای مختلف:

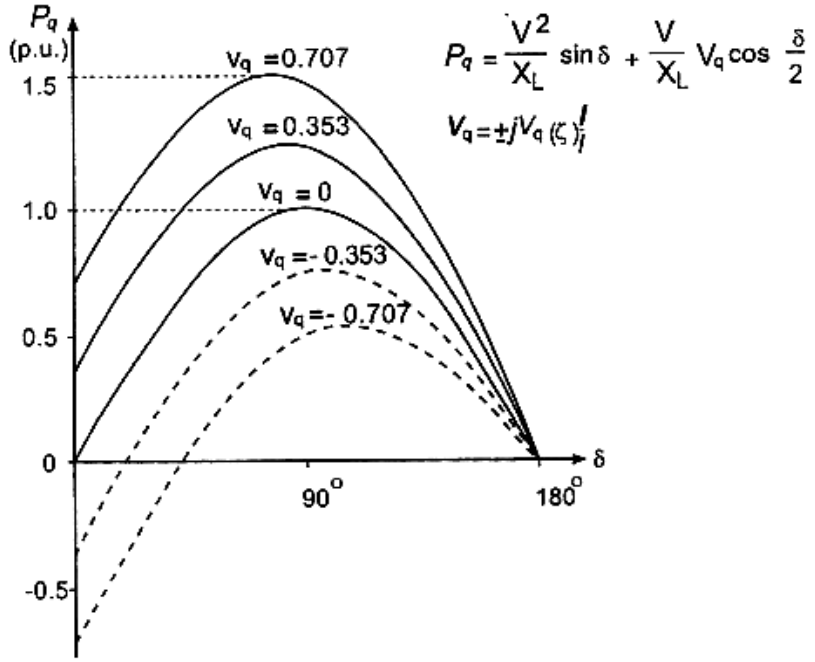


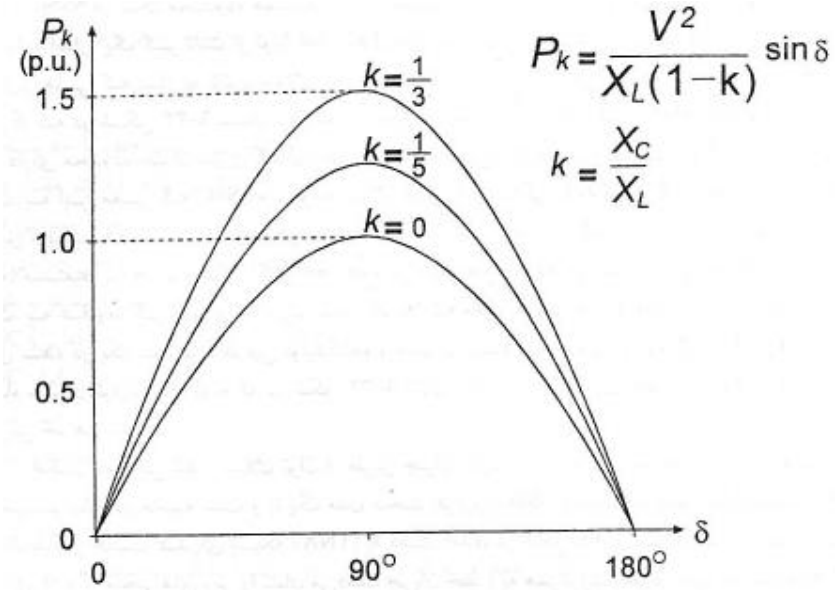
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- خازن سری، توان انتقالی را به اندازه درصد ثابتی از توان انتقالی خط جبران‌نشده در δ معلوم افزایش می‌دهد، اما SSSC توان انتقالی را به اندازه درصد ثابتی از حداکثر توان قابل انتقال خط جبران نشده در محدوده $0 \le \delta \le \pi/2$ (مستقل از δ) افزایش می‌دهد.
- از نقطه نظر عملی، کنترل عبور توان در حالت ماندگار با بهبود پایداری، با فرض ظرفیت یکسان برای SSSC و خازن سری، SSSC مزیت آشکاری نسبت به خازن سری کنترل شده دارد.
- در حالت ماندگار SSSC به طور قابل ملاحظه‌ای دارای محدوده کنترل وسیع‌تری نسبت به خازن سری در همان MVAr است.



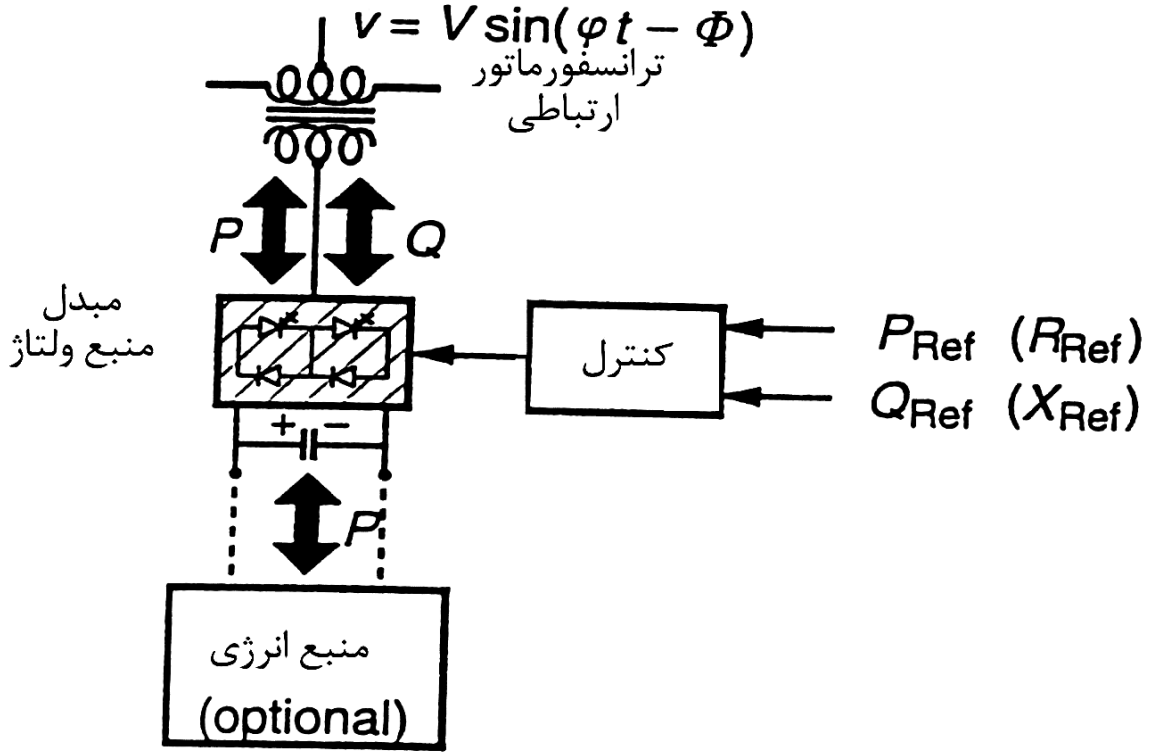


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- SSSC شامل یک مبدل منبع ولتاژ به صورت اینورتر است که توسط یک ترانسفورماتور به صورت سری در خط قرار می‌گیرد. وجود یک منبع انرژی برای تولید ولتاژ dc در دو سر خازن و تأمین تلفات اینورتر لازم است.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- کاربردهای خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC) برای SSSC هم معتبر است.
- این کاربردها شامل:
- کنترل توان، ولتاژ و پایداری گذرا است.
- اینکه SSSC می‌تواند ولتاژ سری خازنی و سلفی در خط تولید کند وسعت کاری این وسیله را توسعه می‌دهد.
- در کنترل توان، SSSC می‌تواند توان خط را افزایش یا کاهش دهد و در پایداری امکان بهتری برای میراسازی نوسانات می‌دهد.
- در این مورد، وجود ترانسفورماتور سری در مقایسه با TCSC یک عیب محسوب می‌شود. وجود این ترانسفورماتور علاوه‌بر افزایش هزینه، با اضافه کردن یک راکتانس اضافی، کارآیی SSSC را کم می‌کند.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- اگر منبع انرژی DC بتواند تولید کافی داشته باشد, ولتاژ تزریق شده V_c را می‌توان از نظر اندازه و زاویه فاز کنترل نمود.
- بنابراین SSSC قادر است تا تبادل توان‌های اکتیو و راکتیو با سیستم داشته باشد.
- اگر تنها جبران‌سازی توان راکتیو مطرح باشد، اندازه منبع انرژی کاملاً کوچک می‌شود و وجود یک خازن جهت عملکرد مبدل کافی است.
- در این حالت (در جبران‌سازی توان راکتیو) تنها اندازه ولتاژ قابل کنترل است، زیرا بردار ولتاژ تزریق شده عمود بر جریان خط است.
- در این حالت ولتاژ سری تزریق شده می‌تواند از جریان خط ۹۰ درجه جلوتر یا عقب‌تر باشد.
- بنابراین رفتار SSSC کاملاً شبیه یک خازن سری یا راکتور سری قابل کنترل است، فرق آن با خازن سری آن است که ولتاژ تزریق شده توسط SSSC به جریان خط مربوط نبوده و می‌تواند به طور مستقل کنترل شود و بنابراین در کم‌باری و پرباری مؤثر واقع گردد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

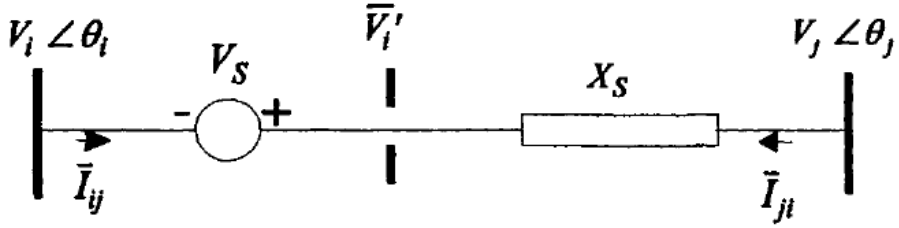
- مدل حالت دائمی SSSC برای پخش بار و تحلیل پایداری:
- در این بخش حالت کلی SSSC مفروض است (حالتی که SSSC قادر است تا هر دو توان اکتیو و راکتیو را با شکه مبادله کند).

- اگر مبدل منبع ولتاژ با یک منبع ولتاژ ایده‌آل V_s و راکتانس سری X_s مدل شود و V'_i نشان‌دهنده ولتاژ مجازی پشت راکتانس سری باشد، داریم:

$$V_i' = V_i + V_s$$

$$V_s = rV_i \angle \gamma$$

- V_s از نظر فاز و اندازه قابل کنترل است
- که در رابطه بالا، $0 \le \gamma \le 2\pi$ و $0 \le r \le r_{max}$

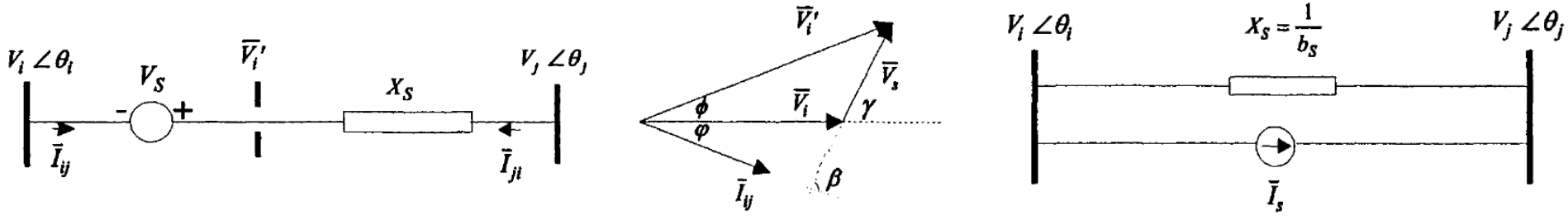


سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- مدل حالت دائمی SSSC برای پخش بار و تحلیل پایداری:
- مدل تزریق با جایگزین کردن Vs با یک منبع جریان $I_s=-jb_sV_s$ بصورت موازی با خط بدست می‌آید ($b_s=1/X$):



$$S_{is} = V_i(-I_s)^*$$

$$S_{js} = V_j(-I_s)^*$$

$$S_{is} = V_i[jb_s r V_i\angle\gamma]^*$$

$$S_{js} = V_j[-jb_s r V_i\angle\gamma]^*$$

$$S_{is} = -b_s r|V_i|^2\sin\gamma - jb_s r|V_i|^2\cos\gamma$$

$$S_{js} = b_s r|V_i||V_j|\sin(\theta_{ij}+\gamma) + jb_s r|V_i||V_j|\cos(\theta_{ij}+\gamma)$$

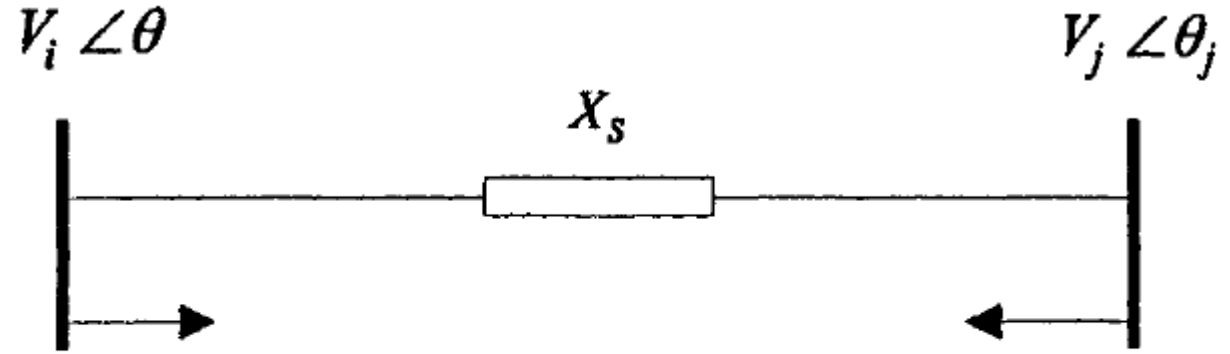
$$\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- مدل حالت دائمی SSSC برای پخش بار و تحلیل پایداری:
- بنابراین مدل منبع ولتاژ سری به صورت دو بار وابسته، مطابق زیر است:



$$P_{si} = rb_s V_i^2 \sin\gamma \qquad P_{sj} = -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ji} + \gamma)$$

$$Q_{si} = rb_s V_i^2 \cos\gamma \qquad Q_{sj} = -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma)$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی بر مبدل (Converter Based FACTS Controllers)

❖ جبران‌گر سری سنکرون استاتیکی Static Synchronous Series Compensators (SSSC)

- مدل حالت دائمی SSSC برای پخش بار و تحلیل پایداری:
- توان تولید شده توسط منبع ولتاژ سری (SSSC) برابر است با:

$$S = V_s I_{ij}^{*} = rV_i \angle\gamma \left[\frac{V_i' - V_j}{jX}\right]^{*}$$

- که در آن توان‌های اکتیو و راکتیو تولیدی SSSC بصورت زیر از هم جدا می‌شوند:

$$P = rb_s |V_i||V_j| \sin(\theta_i - \theta_j + \gamma) - rb_s |V_i|^2 \sin\gamma$$

$$Q = -rb_s |V_i||V_j| \cos(\theta_i - \theta_j + \gamma) + rb_s |V_i|^2 \cos\gamma + r^2 b_s |V_i|^2$$