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)

مقدمه

شروع صنعت برق در سال ۱۸۸۰
و ظهور دو سیستم رقیب

تولید و انتقال توان DC
(بوسیله توماس ادیسون در آمریکا دنبال می‌شد)

تولید و انتقال توان AC
(در اروپا آغاز و بوسیله نیکلا تسلا به طرحی عملی و قابل اجرا تبدیل گردید. این طرح توسط جرج وستینگهاوس تکمیل شد)

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

مقدمه

تکمیل پروژه تولید توان نیاگارا در سال ۱۸۹۶ براساس سیستم تسلا و دستگاه هیدروالکتریکی

خط انتقال بلند ۲۰ مایلی (۳۲/۲ کیلومتر) فشار قوی با ولتاژ ۱۱ kv

شهر بوفالو

آشکار شدن برتری سیستم AC بر سیستم DC

موفقیت پروژه نیاگارا موجب مقبولیت عمومی و گسترش سریع سیستم AC گردید

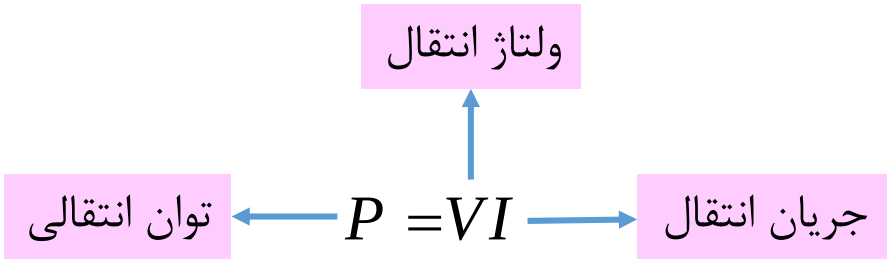
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

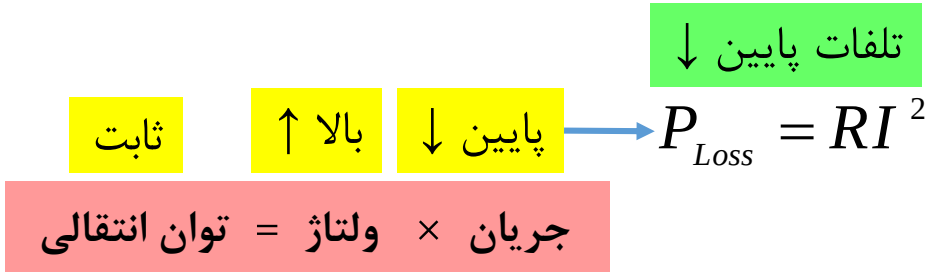
❑ مقدمه

❖ عامل اصلی موفقیت سیستم AC

➢ **استفاده از ترانسفورماتورهای با بازده بالا:**

- در ابتدای خط با استفاده ترانسفورماتور، ولتاژ تولید شده توسط ژنراتور AC براحتی افزایش یافته و موجب کاهش تلفات سیستم و فرایند انتقال می‌گردد.
- سپس مجدداً بوسیله ترانسفورماتور، ولتاژ به سطح مورد نظر مصرف‌کننده‌های صنعتی و خانگی کاهش می‌یابد.





سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مقدمه

❖ ویژگی‌های سیستم‌های AC

- قابلیت انتقال ولتاژ بالا (و در نتیجه کاهش تلفات انتقال) و برطرف‌سازی مشکل انتقال توان در مسافت‌های طولانی
- امکان اتصال سیستم‌های قدرت مجزا به یکدیگر و تشکیل یک شبکه به هم پیوسته قدرت
- سیستم‌های AC شامل مدارهای اکتیو و راکتیو و متغیرهای مربوطه بوده که ترکیب این متغیرها تعیین‌کننده بیشینه توان قابل انتقال و تلفات می‌باشد.
- عبور توان راکتیو در خطوط انتقال متناوب موجب بروز مسائل حاد و اعمال محدودیت‌های شدید بر سیستم‌های انتقال می‌شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مقدمه

❖ ویژگی‌های سیستم‌های DC

✓ تجسم سیستم DC از نظر تئوری آسان است.

✓ تنها مقادیر حقیقی جریان، ولتاژ و مقاومت وجود داشته و قانون ساده اهم بیان‌گر رابطه ساده بین آن‌هاست.

- بدلیل محدودیت‌های انتقال، مراکز تولید متعدد، مستقل و پراکنده می‌باشند.
- مراکز تولید به تنهایی توانایی تأمین بیش از چند مایل مربع را برای بارهای محلی ندارند.
- بدلیل عدم امکان بالابردن ولتاژ DC، می‌بایست ولتاژ تولیدی برابر ولتاژ بار بوده و به دلیل ایمنی تا حد امکان کم باشد.
- مشکلات عملی انتقال توان بالا در سیستم DC بالاست. به دلیل تلفات RI^2، انتقال توان حتی مقادیر کم در بیش از چند مایل، عملی نبود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مقدمه

❖ جمع‌بندی

- بعد از بیش از نیم قرن، مجدداً سیستم انتقال DC با تکنولوژی پیشرفته برای غلبه بر مسائل و مشکلات موجود در انتقال توان در مسافت‌های طولانی، احیاء شده است.
- ادوات الکترونیک قدرت که برای رفع مشکلات سیستم‌های AC بکار می‌روند، فرایند انتقال HVDC را میسر ساخته است.
- علی‌رغم وجود رقابت بین سیستم‌های انتقال AC و DC، این دو سیستم مکمل هم بوده و با هم پاسخ بهینه سیستم را نتیجه می‌دهند.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

➢ **قسمت‌های اصلی یک سیستم قدرت متناوب:**

- ژنراتورها (ماشین‌های سنکرون چرخان)
- خطوط انتقال فشار قوی، فوق توزیع و توزیع
- بارها (سنکرون، غیرسنکرون و پسیو-بارها ممکن است توان اکتیو و (یا) توان راکتیو مصرف کنند)
- تجهیزات حفاظتی

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

➢ **سیستم انتقال پیشرفته:**

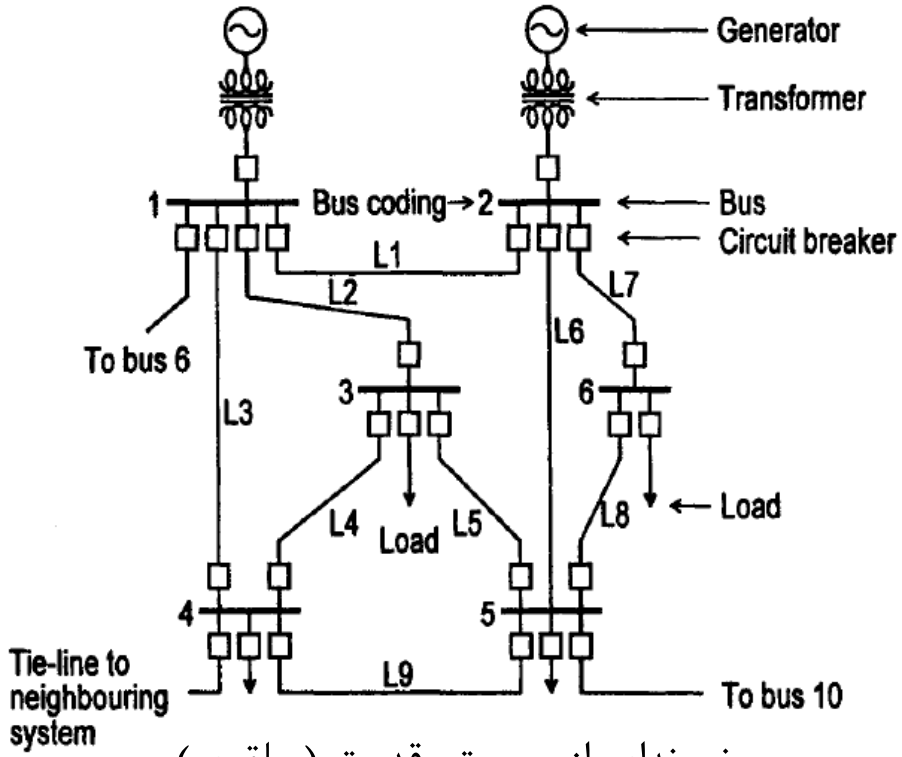
- شبکه پیچیده‌ای از خطوط انتقال که تمام پست‌های نیروگاهی و نقاط عمده باردهی سیستم قدرت را به هم متصل می‌سازد.
- خطوط انتقال حامل توان می‌باشند. توان می‌تواند در هر کدام از جهت‌های سیستم انتقال جاری شده و عملکردها و اهداف اقتصادی را برآورده سازد.
- سیستم‌های AC مجزا را می‌توان با استفاده از خطوط انتقال بصورت سنکرون به هم متصل نمود و یک شبکه بزرگ بوجود آورد که در آن، بین سیستم‌ها انرژی مبادله می‌شود.
- در چنین شبکه‌ای، در زمان‌های معین، برخی سیستم‌ها توان صادر و برخی دیگر نیز توان دریافت می‌کنند و در برخی دیگر فقط توان از شبکه انتقال آن‌ها عبور می‌کند.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ سیستم‌های انتقال ابتدایی و امروزی

- سیستم‌های انتقال امروزی، عمدتاً حلقوی‌اند که ترکیبی از مسیرها را برای دست‌یابی به قابلیت انعطاف مطلوب فراهم می‌آورند.
- سیستم‌های انتقال اولیه (و سیستم‌های فوق توزیع و توزیع کنونی) اکثراً شعاعی‌اند که توان را از ژنراتور به بار معلومی می‌رسانند.



نمونه‌ای از سیستم قدرت (حلقوی)

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

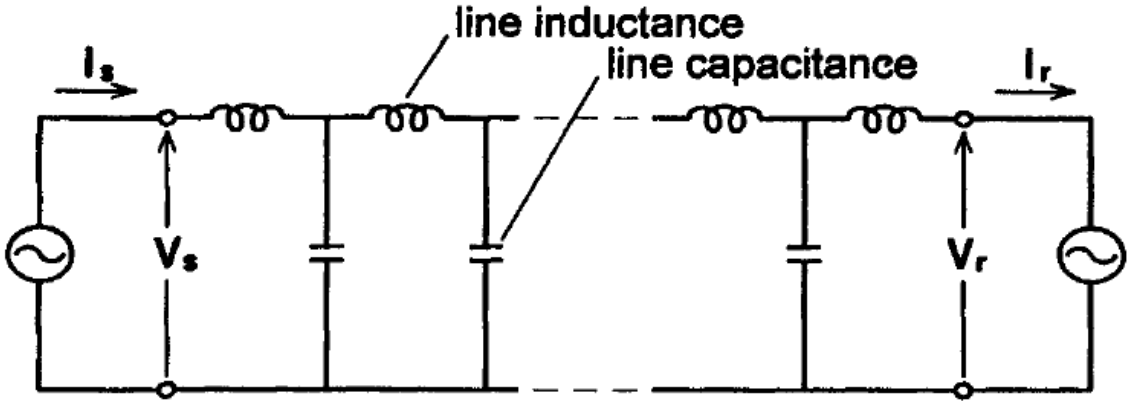
❖ روابط پایه:

- مدل ساده دو ماشینه: برای حفظ عمومیت فرض می‌شود ژنراتورهای ابتدا و انتهای خط معرف دو سیستم AC مستقل بوده که برای تبادل توان با یک خط انتقال به هم وصل شده‌اند.
- پارامترهای توزیع شده مدل خط انتقال AC:

  ۱- مقاومت سری، ۲- اندوکتانس سری، ۳- هدایت (رسانایی) و ۴- خازن موازی
- رفتار خط عمدتاً توسط عناصر راکتیو مدار یعنی اندوکتانس سری (l) و خازن موازی (c) تعیین می‌گردد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

اصول انتقال توان متناوب



یک خط انتقال بدون تلفات بصورت عناصر فشرده

- حروف پررنگ معرف فازورهای ولتاژ و جریان می‌باشند.
- ***l***: اندوکتانس سری واحد طول خط
- ***c***: خازن موازی واحد طول خط
- **λ**: طول موج
- **β**: تعداد موج‌های کامل در واحد طول خط
- ***a***: طول خط

دامنه ولتاژ (ژنراتور) ابتدای خط

دامنه ولتاژ (ژنراتور) انتهای خط

زاویه بین ولتاژ ابتدا و انتهای خط (زاویه بار یا زاویه انتقال)

$$\delta = \angle V_s - \angle V_r$$

توان قابل انتقال

$$P = \frac{V_s V_r}{Z_0 Sin(\theta)} Sin(\delta)$$

امپدانس مشخصه یا امپدانس هجومی

$$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$$

طول الکتریکی خط بر حسب رادیان

$$\begin{cases} \theta = \beta a \\ \beta = \dfrac{2\pi}{\lambda} = \dfrac{2\pi}{Tv} = \dfrac{2\pi f}{v} = \dfrac{2\pi f}{\frac{1}{\sqrt{lc}}} = 2\pi f \sqrt{lc} = \omega\sqrt{lc} \end{cases}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ بار طبیعی:

- خط انتقال بدون تلفات در بار طبیعی یا امپدانس هجومی (ضربه‌ای)، ایده‌آل بوده و توان انتقالی برابر است با:
- در بار طبیعی، دامنه ولتاژ در طول خط ثابت است. ولتاژ و جریان در هر نقطه خط هم‌فازند.
- توان انتقالی در بار طبیعی (P_0) مستقل از طول خط است.

ولتاژ نامی خط

توان انتقالی ← $P_0 = \frac{V_0^{\,2}}{Z_0}$ → امپدانس هجومی (مشخصه) خط

- در بار طبیعی، تبادل توان راکتیو کاملاً متعادل بوده و خط بطور ذاتی بصورت شنت (موازی) جبران‌سازی می‌شود. یعنی توان راکتیو تولیدی توسط خازن‌های موازی خط دقیقاً برابر توان راکتیو جذب شده توسط راکتانس سری خط است. توان راکتیو انتقالی از خط صفر است.
- بنابراین، بهترین توان انتقالی از خط برابر بار طبیعی است. چون بار در طی شبانه روز تغییر می‌کند، بهتر است بار عبوری به بار طبیعی تبدیل شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ نیازهای خط انتقال در شرایط کاری مختلف

- **شرایط بی‌باری یا کم‌باری:** در بارهای سبک‌تر (از بار طبیعی)، خط انتقال در حالت **فوق جبران** قرار دارد. افزایش ولتاژ دو سر راکتانس سری خط که ناشی از جریان شارژ خازن‌های موازی خط است، بیشتر از افت ولتاژ ناشی از عبور بار است. بنابراین، ولتاژ در طول خط افزایش یافته و در میانه خط به بیشینه مقدار خود می‌رسد. چون جریان شارژ خازنی اضافی از ژنراتورها (یا سیستم‌های AC) دو سر خط نیز عبور می‌کند، آن‌ها نیز باید توان راکتیو (خازنی) متناظر را جذب نمایند. به جبران‌کننده راکتیوی نیاز است که توان راکتیو مصرف کند و ولتاژ را پایین نگه دارد و همزمان از جریان یافتن توان‌های راکتیو به سوی ژنراتورها و ایجاد ناپایداری، جلوگیری نماید.

- **شرایط بارداری:** اگر باردهی خط انتقال بیش از بار طبیعی باشد، حالت **زیر جبران** پدید می‌آید. در این حالت، اضافه ولتاژ ناشی از خازن‌های موازی خط کمتر از افت ولتاژ ناشی از عبور جریان بار است. بنابراین، ولتاژ در طول خط کاهش می‌یابد تا در میانه خط به کمینه مقدار خود برسد. در چنین وضعیتی، تقاضای خالص توان راکتیو خط (راکتانس‌های سری) باید توسط ژنراتورهای ابتدا و انتهای خط (یا سیستم‌های AC) تأمین شود. نیاز به جبران کننده راکتیوی است که توان راکتیو تولید نماید تا ولتاژ و قدرت قابل انتقال خط را بالا ببرد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ نیازهای خط انتقال در شرایط کاری مختلف

- **اختلالات سیستم (نوسانات توان و زاویه):** نیاز به وسائلی است که باعث میرائی نوسانات توان و زاویه سیستم گردد، یعنی وسائلی که بتوانند توان اکتیو هم تولید و هم جذب کنند تا نوسانات توان مستهلک شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه در مدل ساده خط کوتاه:**

- خطوط با طول الکتریکی کوتاه: اثر خازن موازی در خطوط انتقال کوتاه‌تر از ۱۰۰ مایل، اندک بوده و قابل اغماض است.

$$\sin(\theta) \cong \theta \Rightarrow Z_0 \sin(\theta) \cong Z_0 \theta = Z_0 \beta a = \sqrt{\frac{l}{c}} \times \omega \sqrt{lc}\, a = l\,\omega a = L\,\omega = X_L$$

$$P = \frac{V_s V_r}{Z_0 Sin(\theta)} Sin(\delta) \cong \frac{V_s V_r}{X_L} Sin(\delta) = \frac{V^2}{X_L} Sin(\delta)$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **راه‌کارهای افزایش توان انتقالی:**

- افزایش ولتاژهای ابتدا (V_s) و انتهای خط (V_r)
- کاهش راکتانس سری خط (X_L)

۱. نصب خطوط موازی
۲. جبران‌سازی راکتیو موازی وسط خط
۳. استفاده از خازن‌های سری در خط
۴. تزریق ولتاژی به خط با زاویه فاز مخالف افت ولتاژ روی راکتانس سری خط

$$P = \frac{V_s V_r}{X_L} Sin(\delta)$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه:**

- اثر اغماض خازن موازی در خطوط انتقال:

$$\sin(\theta) \le \theta \Rightarrow Z_0 \sin(\theta) \le Z_0 \theta = X_L \quad \Rightarrow \quad \left.\begin{aligned} P_{real} &= \frac{V_s V_r}{Z_0 Sin(\theta)} Sin(\delta) \\ P_{estimated} &= \frac{V_s V_r}{X_L} Sin(\delta) \end{aligned}\right\} \xrightarrow{Z_0 \sin(\theta) \le X_L} P_{real} \ge P_{estimated}$$

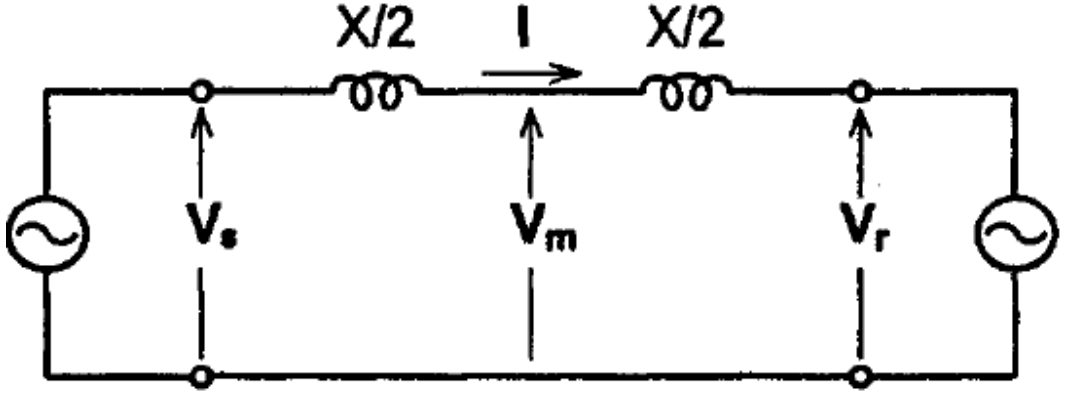
- خازن‌های موازی خط تمایل دارند تا توان قابل انتقال خط را افزایش دهند. به عبارت دیگر، چشم‌پوشی از خازن خط از دیدگاه حداکثر توان قابل انتقال (حالت ماندگار گذرا) بدترین حالت ممکن است، اما بر ملاحظات حاکم بر کنترل عبور توان (که بهره‌برداری از خط انتقال و کاربرد ادوات FACTS را نیز تعیین می‌کند) بی‌تأثیر است.
- خازن‌های خط در بی‌باری یا بارهای سبک، باعث ایجاد اضافه ولتاژ می‌شوند. مشکلات اضافه ولتاژ در خطوط بی‌بار یا کم‌بار را معمولاً می‌توان با استفاده از سلف‌های موازی (که دائم در مدار بوده یا بوسیله کلید کنترل می‌شوند) و یا با تغییر تحریک ژنراتور به نحو مطلوبی برطرف کرد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

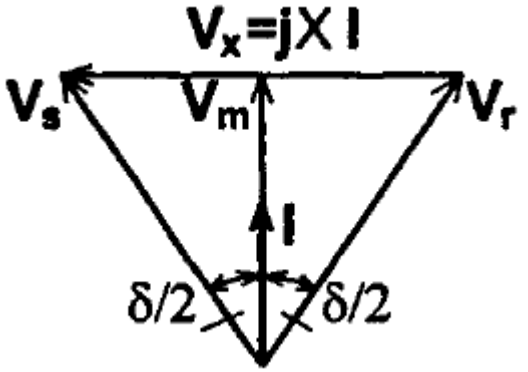
❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه**–استفاده از فازورها و روابط مداری برای تشریح اصول کنترل توان عبوری از خط توسط ادوات FACTS:

- با چشم‌پوشی از خازن موازی خط داریم:



سیستم دو ماشینه با خط انتقال سلفی



دیاگرام فازوری

$$\begin{cases} V_s = Ve^{j\frac{\delta}{2}} = V\left[\cos(\frac{\delta}{2}) + j\sin(\frac{\delta}{2})\right] \\ V_r = Ve^{-j\frac{\delta}{2}} = V\left[\cos(\frac{\delta}{2}) - j\sin(\frac{\delta}{2})\right] \end{cases} \Rightarrow V_m = \frac{V_s + V_r}{2} = V\cos(\frac{\delta}{2})\angle 0 \Rightarrow I = \frac{V_s - V_r}{jX_L} = \frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2})\angle 0$$

ولتاژ نقطه وسط

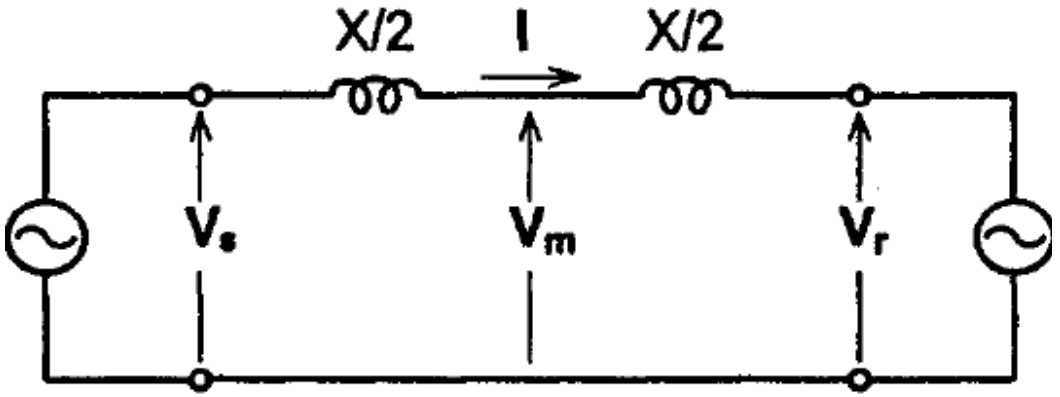
جریان عبوری از خط

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

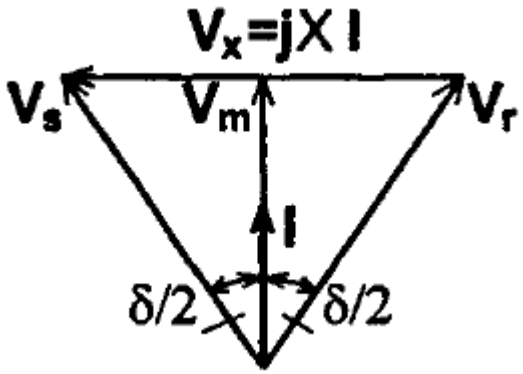
❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه**–استفاده از فازورها و روابط مداری برای تشریح اصول کنترل توان عبوری از خط توسط ادوات FACTS:

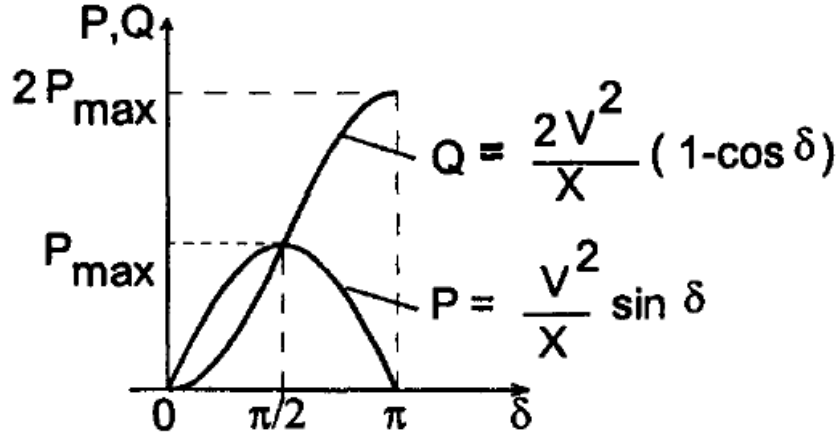
- با فرض بدون اتلاف بودن خط (برابری توان در تمام نقاط از قبیل ابتدا، انتها و یا وسط خط) داریم:



سیستم دو ماشینه با خط انتقال سلفی



دیاگرام فازوری



منحنی توان-زاویه

$$P = V_m I \cos(\overbrace{\angle V_m - \angle I}^{0}) = \overbrace{V}^{V_m} \cos(\frac{\delta}{2}) \times \overbrace{\frac{2V}{X_L}}^{I} \sin(\frac{\delta}{2}) = \frac{2V^2}{X_L} \overbrace{\cos(\frac{\delta}{2}) \times \sin(\frac{\delta}{2})}^{\frac{\sin(\delta)}{2}} = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta)$$

توان انتقالی از خط

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه**–استفاده از فازورها و روابط مداری برای تشریح اصول کنترل توان عبوری از خط توسط ادوات FACTS:

- با فرض بدون اتلاف بودن خط (برابری توان در تمام نقاط از قبیل ابتدا، انتها و یا وسط خط) داریم:

$$P = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta)$$

$$Q_s = V_s I \sin(\overbrace{\angle V_s - \angle I}^{\frac{\delta}{2}}) = \overbrace{V_s}^{V} \times \overbrace{\frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2})}^{I}\sin(\frac{\delta}{2}) = \frac{2V^2}{X_L}\overbrace{\sin(\frac{\delta}{2})\times\sin(\frac{\delta}{2})}^{\frac{1-\cos(\delta)}{2}} = \frac{V^2}{X_L}(1-\cos(\delta))$$

توان راکتیو ابتدای خط

$$Q_r = V_r I \sin(\overbrace{\angle V_r - \angle I}^{-\frac{\delta}{2}}) = \overbrace{-V_r}^{V} \times \overbrace{\frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2})}^{I}\sin(\frac{\delta}{2}) = -\frac{2V^2}{X_L}\overbrace{\sin(\frac{\delta}{2})\times\sin(\frac{\delta}{2})}^{\frac{1-\cos(\delta)}{2}} = -\frac{V^2}{X_L}(1-\cos(\delta)) = -Q_s$$

توان راکتیو انتهای خط

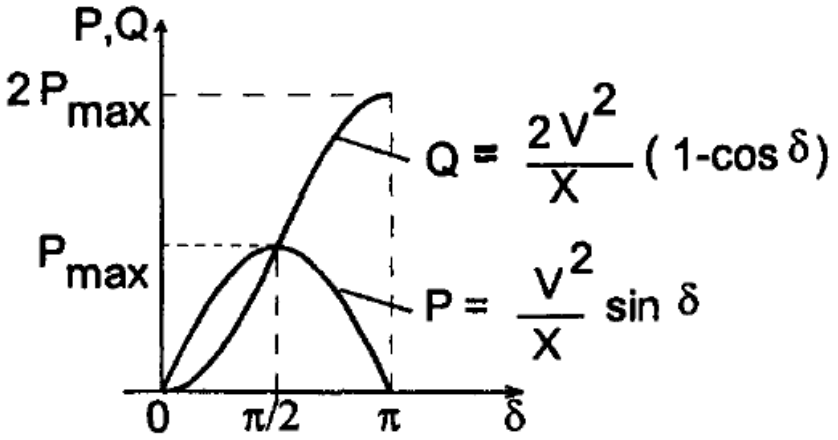
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ **روابط پایه**–استفاده از فازورها و روابط مداری برای تشریح اصول کنترل توان عبوری از خط توسط ادوات FACTS:

- با فرض بدون اتلاف بودن خط (برابری توان در تمام نقاط از قبیل ابتدا، انتها و یا وسط خط) داریم:

$$\begin{cases} P = \dfrac{V^2}{X_L}\sin(\delta) \\ Q_s = -Q_r = \dfrac{V^2}{X_L}(1-\cos(\delta)) \end{cases}$$

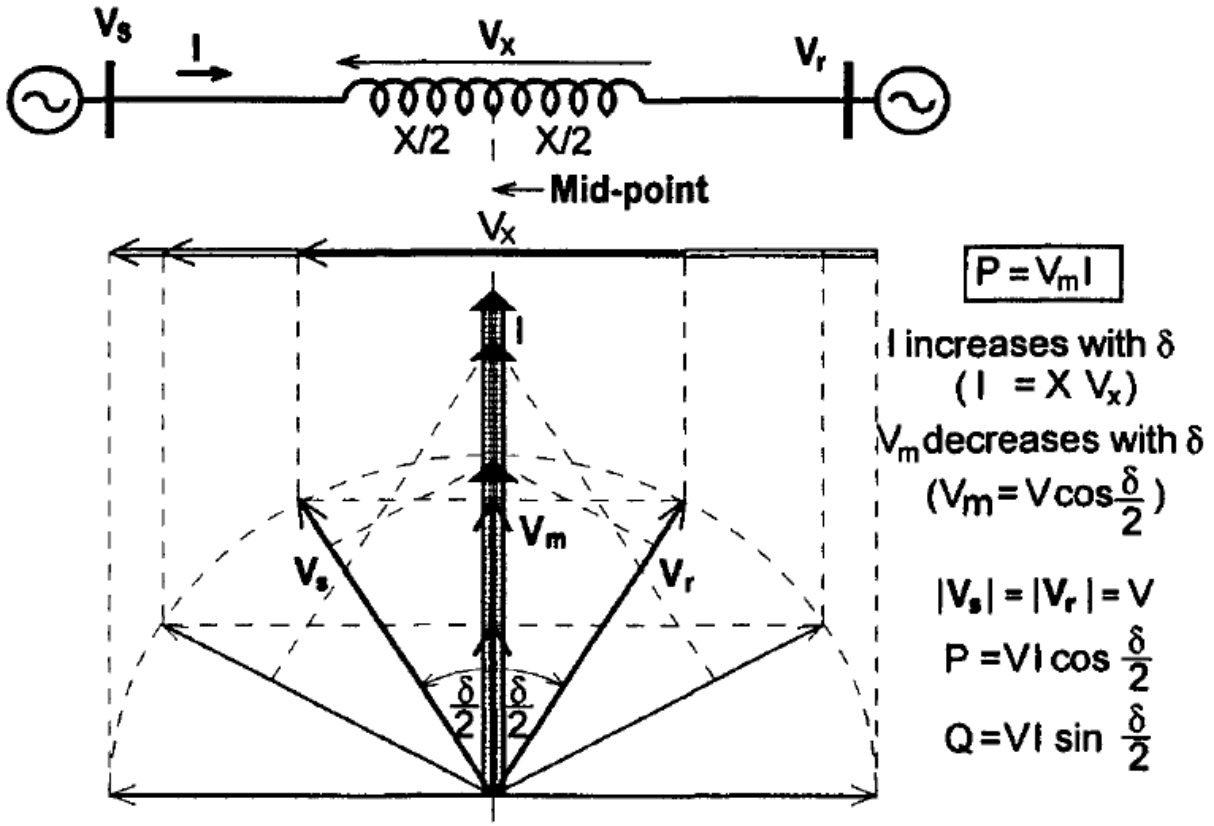


منحنی توان–زاویه

- اگر ولتاژ ($V_s = V_r = V$) ثابت و اندوکتانس خط انتقال ثابت باشد، توان انتقالی بوسیله زاویه بار (δ) قابل کنترل است.
- بدون تغییر توان راکتیو مورد نیاز ابتدا و انتهای خط نمی‌توان توان اکتیو را کنترل کرد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب



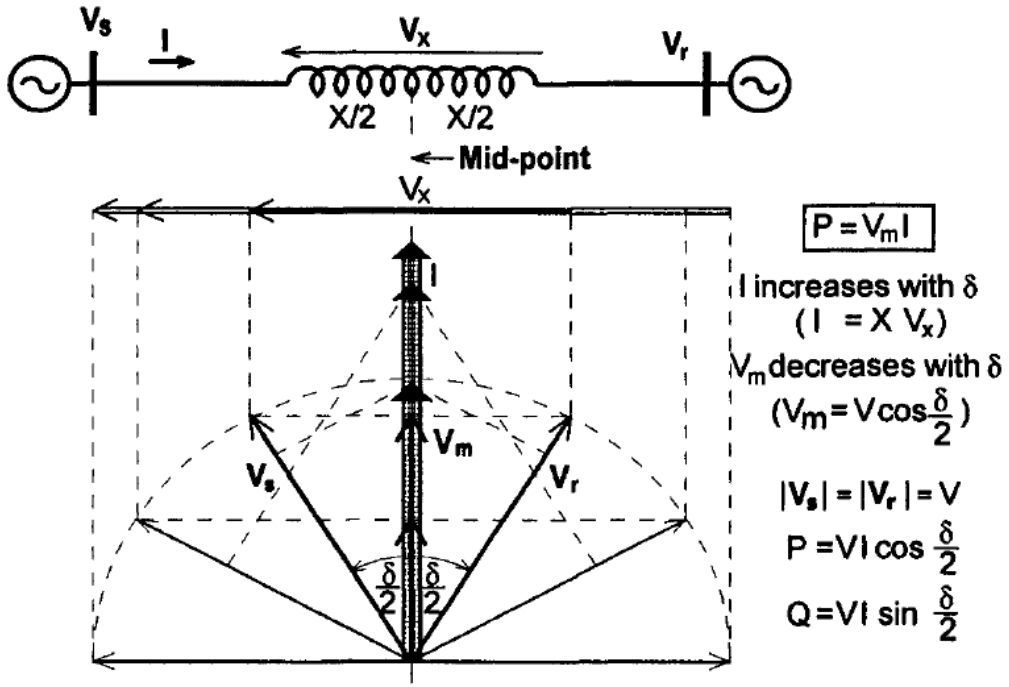
تغییرات متقابل توان اکتیو، راکتیو و ولتاژ خط انتقال بر حسب زاویه بار

$$\begin{cases} V_m = V\cos(\frac{\delta}{2}) \angle 0 \\ I = \frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2}) \angle 0 \\ V_X = jIX_L = 2V\sin(\frac{\delta}{2}) \angle 90 \\ P = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta) \\ Q_s = -Q_r = \frac{V^2}{X_L}(1-\cos(\delta)) \end{cases}$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

اصول انتقال توان متناوب

- با افزایش زاویه بار δ، ولتاژ دو سر راکتانس سری خط V_x متناسب با فازور جریان خط I افزایش می‌یابد.
- با نزدیک شدن از دو انتها به سمت وسط خط، ولتاژ کاهش یافته و در نقطه میانی به کمینه مقدار خود می‌رسد.
- با افزایش زاویه بار δ، ولتاژ نقطه میانی کاهش می‌یابد.
- ولتاژ و جریان نقطه میانی خط هم‌فاز می‌باشند. پس، حاصل‌ضرب ولتاژ-جریان در این نقطه برابر توان انتقال‌یافته از خط می‌باشد.
- افزایش زاویه بار در بازه $0 < \delta < \frac{\pi}{2}$ منجر به افزایش توان انتقالی و در بازه $\frac{\pi}{2} < \delta$ منجر به کاهش آن می‌شود.



$$
\begin{cases}
V_m = V\cos(\frac{\delta}{2})\angle 0 \\
I = \frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2})\angle 0 \\
V_X = jIX_L = 2V\sin(\frac{\delta}{2})\angle 90 \\
P = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta) \\
Q_s = -Q_r = \frac{V^2}{X_L}(1-\cos(\delta))
\end{cases}
$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ اصول انتقال توان متناوب

❖ حدود حالت ماندگار انتقال توان

- حد تئوریک انتقال توان: بیشینه توان قابل انتقال از یک خط بدون اتلاف برابر $P_{max} = V^2/X$ است.
- حد حرارتی انتقال توان: توان انتقالی از یک خط انتقال واقعی با مقاومت R، به تلفات حرارتی RI^2 بستگی دارد. زیرا، در درجه حرارت معینی، ویژگی‌های هادی به شکل غیرقابل برگشت‌پذیری تغییر می‌کند.

➢ عموماً حد توان انتقالی در خطوط بلند توسط X و در خطوط کوتاه توسط R تعیین می‌شود.

➢ به ازاء مقادیر نسبتاً بزرگ R بطوریکه نسبت X/R کوچک باشد ($X/R<5$)، توان راکتیو عبوری از خط افزایش می‌یابد به نحوی که مقدار مجاز توان قابل انتقال ناشی از این امر، کمتر از مقدار مجاز توان قابل انتقال در اثر حرارت (حد حرارتی) می‌باشد.

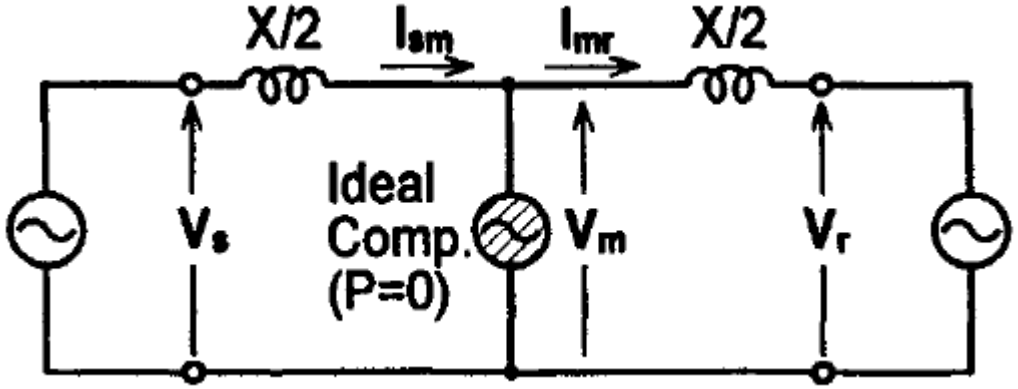
- بارهای متناوب معمولاً به دامنه ولتاژ و بعضاً به فرکانس حساس‌اند. سیستم‌های قدرت معمولاً در فرکانس ثابت (۵۰ یا ۶۰ هرتز) کار می‌کنند.
- ولتاژ سیستم‌های قدرت ممکن است اندکی تغییر کند. این تغییرات نباید از محدوده (٪۵+ و ٪۱۰-) تجاوز کند. این حد مجاز تغییر ولتاژ ممکن است عامل اصلی در محدود کردن توان انتقالی در خطوط شعاعی بلند (بدون تولید در انتهای خط) و خطوطی که در امتداد خود بارهای متعددی را تغذیه می‌کنند (*tapped lines*)، باشد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

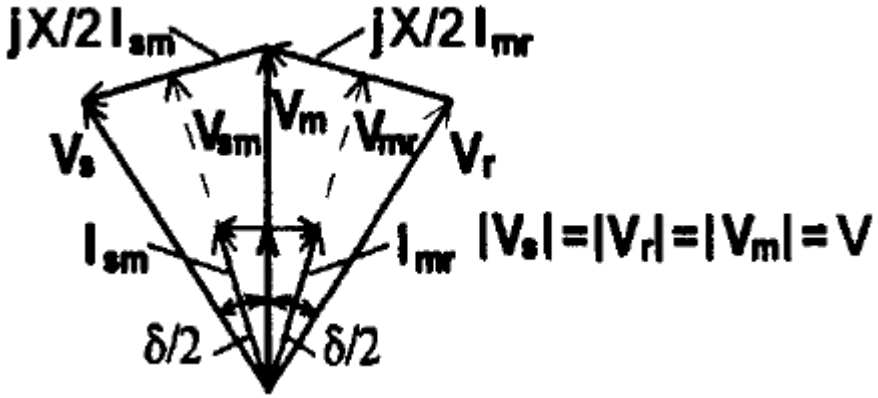
❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل

- جبران‌گر (ایده‌آل) در نقطه میانی خط و بصورت موازی با آن نصب می‌شود. در حالت ایده‌آل، جبران‌گر را یک منبع ولتاژ سینوسی (با فرکانس اصلی سیستم قدرت) و هم‌فاز با ولتاژ نقطه میانی خط در نظر می‌گیریم. دامنه ولتاژ جبران‌گر برابر دامنه ولتاژ ابتدا و انتهای خط در نظر گرفته می‌شود.
- جبران‌گر خط را به دو قسمت مساوی با راکتانس‌های $(X/2)$ تقسیم می‌کند. قسمت اول، توان را از ابتدای خط به وسط خط و قسمت دوم، توان را از وسط خط به انتهای آن منتقل می‌کند.
- جبران‌گر وسط خط، تنها به تبادل توان راکتیو با خط می‌پردازد.



سیستم دو ماشینه بدون اتلاف با جبران‌سازی ایده‌آل موازی

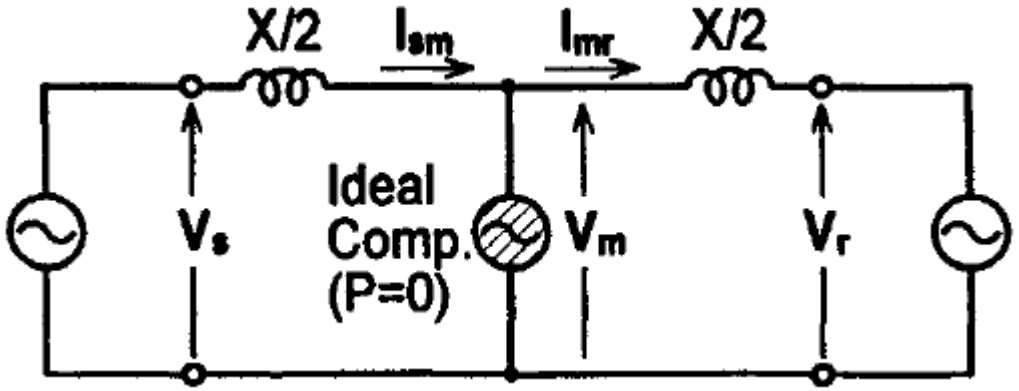


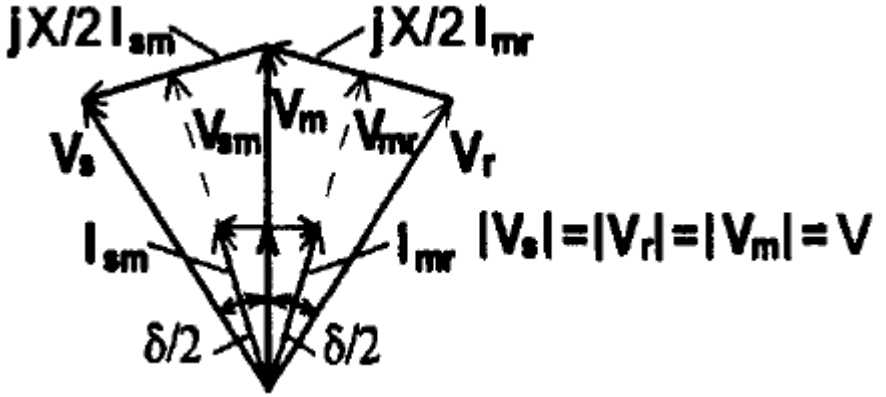
دیاگرام فازوری

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل





توان انتقالی $P = V_{sm} I_{sm} = V_{mr} I_{mr} = V_m I$

$$\begin{cases} V_m = V\cos(\frac{\delta}{2}) \Rightarrow V_{sm} = V_{mr} = V\cos(\frac{\delta}{4}) \\ I = \frac{2V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2}) \Rightarrow I_{sm} = I_{mr} = I = \frac{4V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{4}) \end{cases}$$

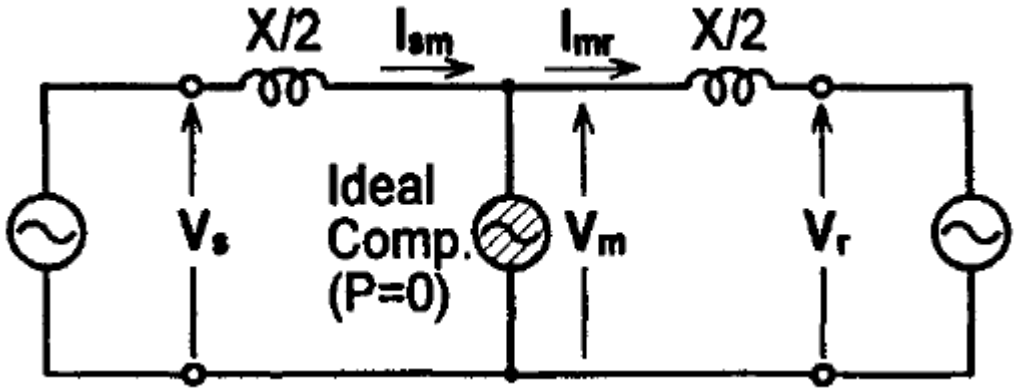
$$P = \overbrace{V\cos(\frac{\delta}{4})}^{V_{sm}=V_{mr}} \times \overbrace{\frac{4V}{X_L}\sin(\frac{\delta}{4})}^{I_{sm}=I_{mr}=I} = \frac{4V^2}{X_L}\overbrace{\cos(\frac{\delta}{4})\sin(\frac{\delta}{4})}^{\frac{\sin(\frac{\delta}{2})}{2}}$$

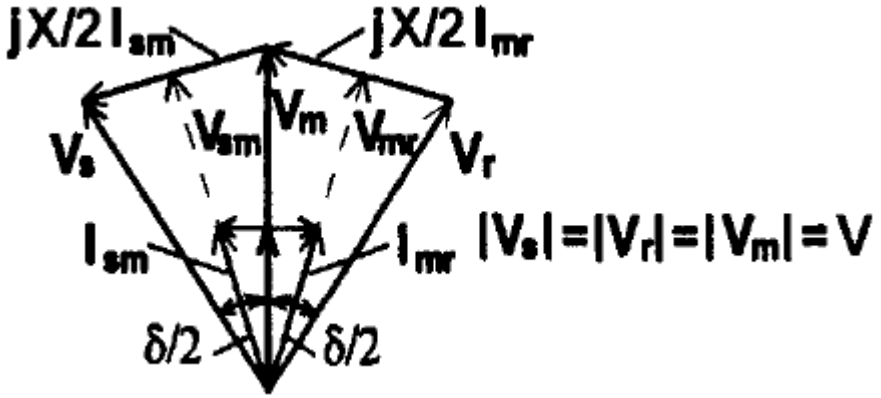
$$P = \frac{2V^2}{X_L}\sin(\frac{\delta}{2})$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل





توان راکتیو عبوری از خط

$$Q = V_s I_{sm} \sin(\frac{\delta}{4}) = V_r I_{mr} \sin(\frac{\delta}{4}) = \overbrace{V}^{V_s = V_r} \times \frac{4V}{X_L} \overbrace{\sin(\frac{\delta}{4})}^{I_{sm} = I_{mr} = I} = \frac{4V^2}{X_L} \overbrace{\sin(\frac{\delta}{4})\sin(\frac{\delta}{4})}^{\frac{1-\cos(\frac{\delta}{2})}{2}}$$

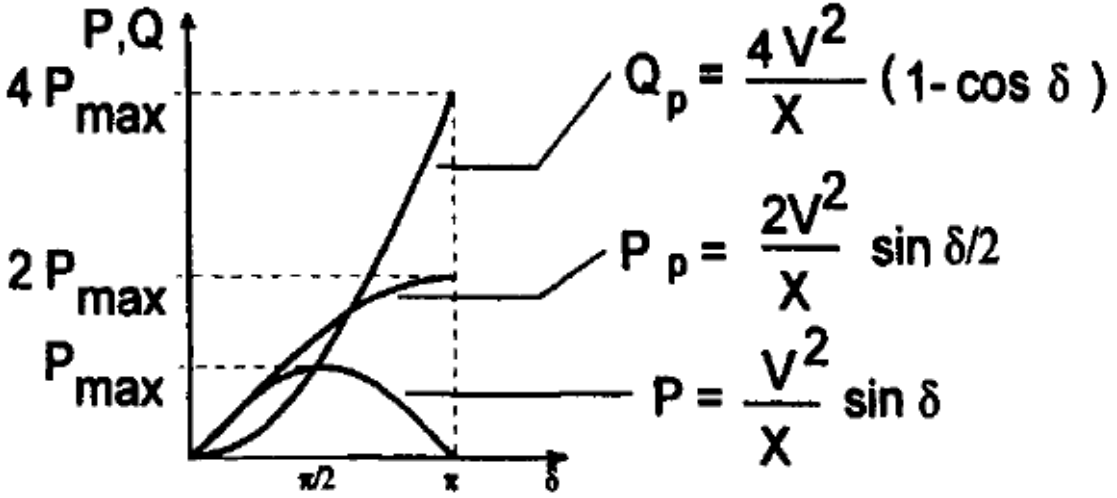
$$Q = \frac{2V^2}{X_L} 1 - \cos(\frac{\delta}{2})$$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل

- بیشینه توان قابل انتقال دو برابر شده است اما در مقابل، توان راکتیو مورد تقاضا در جبران‌گر (و در ژنراتورها ابتدا و انتهای خط) نیز بسرعت افزایش می‌یابد.



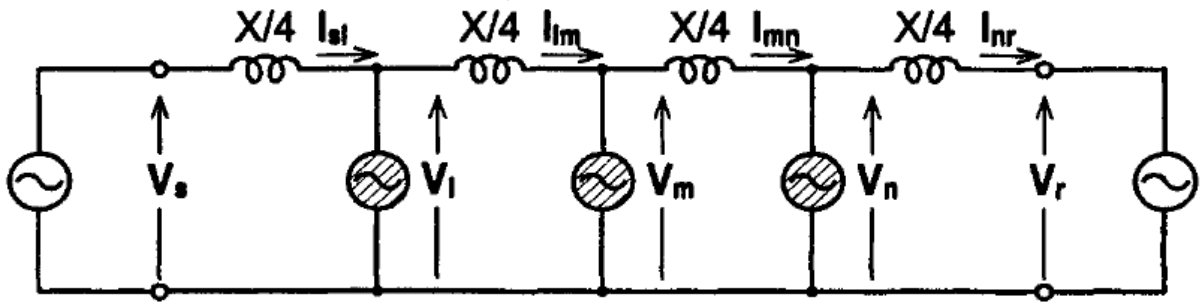
رابطه بین توان اکتیو، راکتیو و زاویه بار δ در حضور یک جبران‌گر ایده‌آل موازی

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

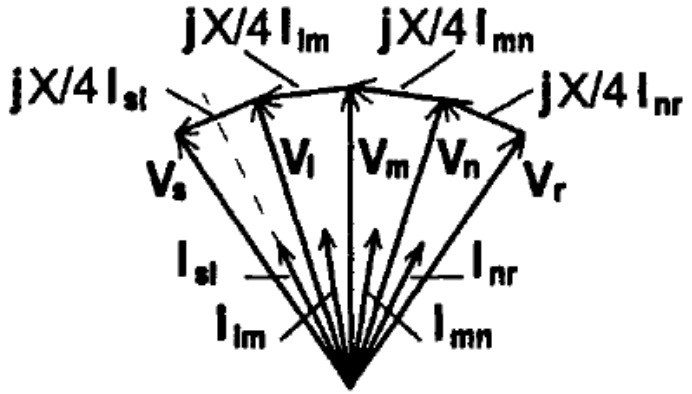
❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل

- با افزایش تعداد جبران‌سازهای موازی، تغییرات ولتاژ بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته و پروفیل ولتاژ تقریباً ثابت می‌شود.
- اگر تعداد جبران‌گرها به اندازه کافی باشد، جبران بصورت یکنواخت شده و سیستم همان ویژگی‌های حالت بار طبیعی را خواهد داشت، با این تفاوت که محدودیتی در انتقال توان وجود نداشته و در هر بار، پروفیل ولتاژ مسطح خواهد بود.
- برای دست‌یابی به این شکل از جبران، باید سرعت پاسخ جبران‌گرهای موازی سریع، ظرفیت جذب و تولید توان راکتیو آن‌ها نامحدود باشد، تا صرف‌نظر از تغییرات بار، دامنه ولتاژ خط انتقال را در مقدار مورد نظر ثابت نگه دارد.
- در ابتدا فرض می‌شد جبران‌سازهای سنکرون (کندانسور) گزینه مناسبی برای جبران خطوط انتقال بلند هستند اما، این جبران‌سازها در شرایط دینامیکی سیستم، عملکرد مناسبی نداشتند. به همین دلیل، راکتورهای اشباع‌شونده (*Saturating Reactors*) جایگزین آن‌ها شدند.



سیستم دو ماشینه بدون اتلاف با سه جبران‌سازی ایده‌آل موازی



دیاگرام فازوری

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران موازی ایده‌آل

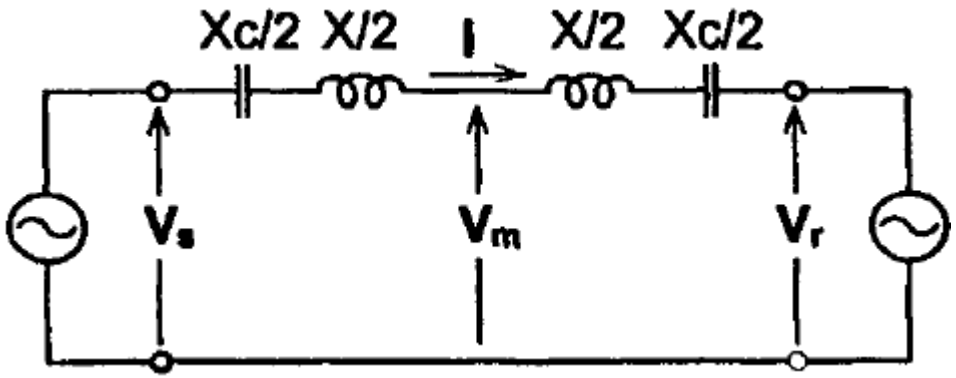
- با فرض وجود تعداد کافی جبران‌گرهای موازی ایده‌آل در خط، در بی‌باری که توانی منتقل نمی‌شود، ولتاژ تمام جبران‌گرها هم‌فاز بوده و توان راکتیو تولید شده توسط خازن‌های خط را جذب می‌کنند. با افزایش بار (افزایشδ)، زاویه فاز نسبی بین ولتاژ جبران‌گرهای مجاور افزایش یافته اما توان راکتیو جذب شده توسط آن‌ها تا رسیدن به بار طبیعی (که در آن توان راکتیو صفر می‌شود) کاهش می‌یابد.
- برای بارهای بزرگ‌تر از بار طبیعی، جبران‌گرها باید توان راکتیو تولید کنند تا پروفیل ولتاژ ثابت بماند.
- در بارهای سنگین، زاویه فاز نسبی بین جبران‌گرهای موازی بسیار زیاد می‌شود. پس، کاهش ولتاژ بزرگی بین آن‌ها بوجود می‌آید. برای رفع این مشکل باید از تعداد جبران‌گرهای بیشتری استفاده کرد و تعداد قطعات خط را بیشتر کرد.
- جبران یک خط بصورت ایده‌آل مستلزم آن است که با تغییر بار از صفر تا چندین برابر بار طبیعی، امپدانس ضربه‌ای (موجی) خط نیز بطور پیوسته تغییر کرده تا پروفیل ولتاژ ثابت بماند. اگر مسأله پایداری و قابلیت اطمینان سیستم نیز در نظر گرفته شود، انجام این کار بسیار پیچیده و پرهزینه خواهد بود.
- عملی بودن جبران به روش تقسیم خط بوسیله جبران‌گرها، با استفاده از جبران‌گرهای استاتیک کنترل‌شده تایریستوری در سیستم قدرت Hydro-Quebec در خط انتقال ۷۳۵ کیلوولت با طول ۶۰۰ مایل که مجتمع نیروگاه آبی James Bay را به مونترال متصل می‌کند و توان ۱۲۰۰ مگاوات را منتقل می‌کند، به اثبات رسیده است.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

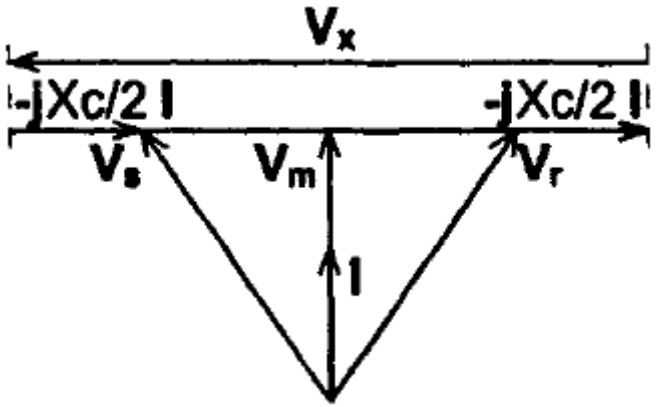
❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران سری

- ایده اصلی این جبران‌سازی، کاهش راکتانس مؤثر خط انتقال بین فرستنده و گیرنده (X) است.
- امپدانس خازن سری، بخشی از راکتانس خط را خنثی کرده و در نتیجه امپدانس مؤثر خط انتقال کم می‌شود (مانند این است که خط انتقال، کوتاه‌تر می‌شود).



سیستم دو ماشینه بدون اتلاف با جبران‌سازی خازن سری

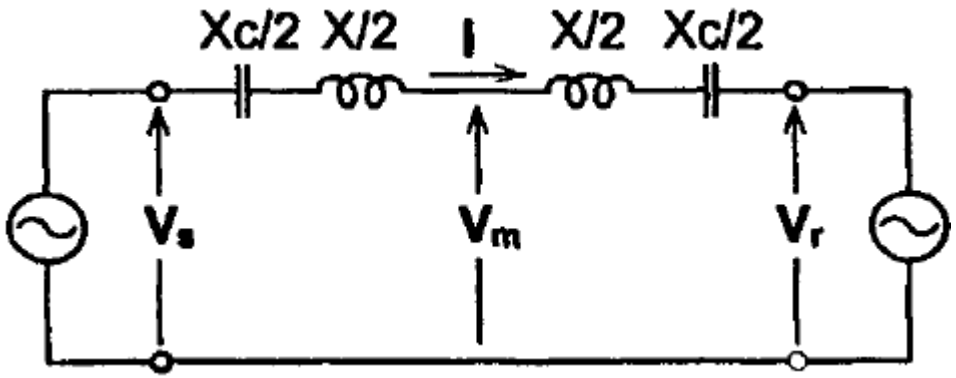


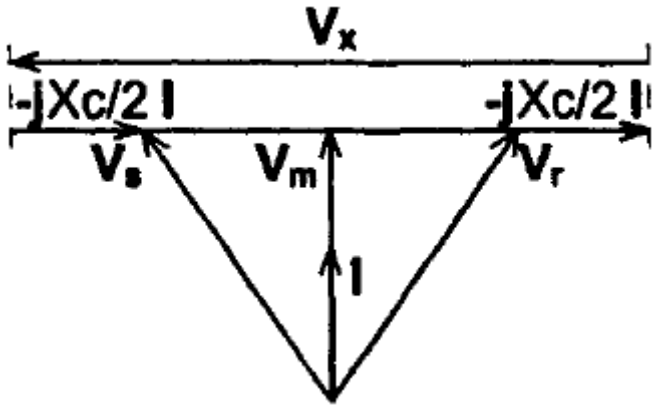
دیاگرام فازوری

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران سری (جبران‌ساز خازن سری)





امپدانس مؤثر خط انتقال $X_{eff} = X_L - X_C = X_L(1-k)$

درجه جبران سری $k = X_C / X_L \qquad 0 \le k < 1$

جریان خط جبران‌شده $I = \frac{2V}{(1-k)X_L}\sin(\frac{\delta}{2})$

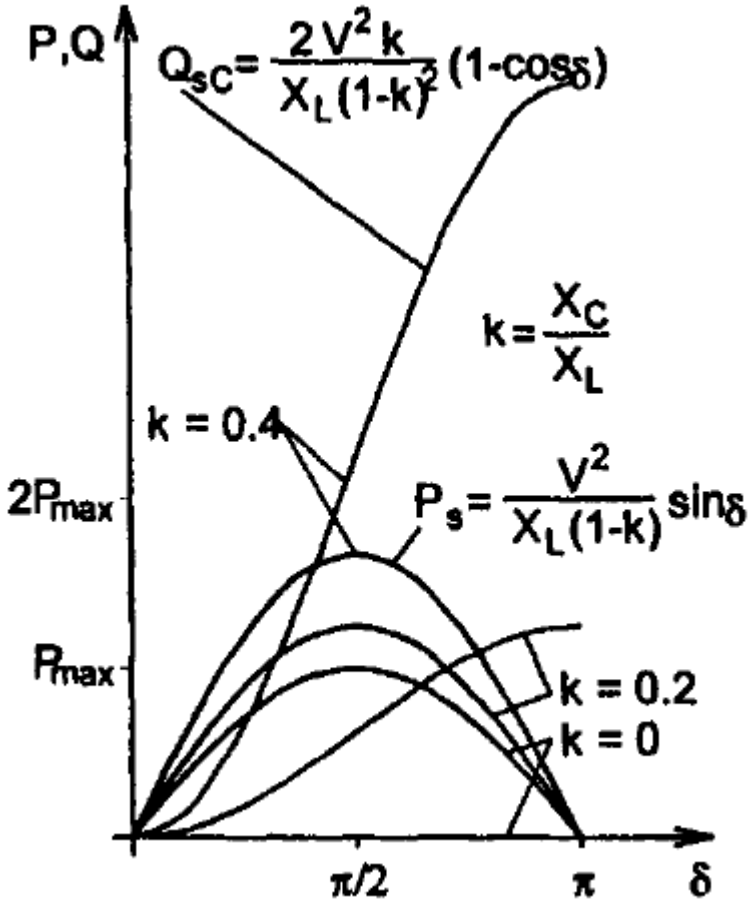
توان اکتیو انتقالی $P = V_m I = \frac{V^2}{(1-k)X_L}\sin(\delta)$

توان راکتیو تولیدی خازن سری $Q_C = I^2 X_C = \frac{2V^2}{X_L}\frac{k}{(1-k)^2}(1-\cos\delta)$

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران سری (جبران‌ساز خازن سری)



$$\begin{cases} P=\dfrac{V^2}{(1-k)X_L}\sin(\delta) \\ Q_C=\dfrac{2V^2}{X_L}\dfrac{k}{(1-k)^2}(1-\cos\delta) \end{cases}$$

رابطه بین توان اکتیو خط (P)، توان راکتیو تولیدی خازن سری (Q_C) و زاویه بار (δ) به ازاء مقادیر مختلف k

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ جبران سری (جبران‌ساز خازن سری)

- با افزایش k (ضریب جبران سری)، توان قابل انتقال افزایش می‌یابد.
- با افزایش k (ضریب جبران سری)، توان راکتیو تولیدی خازن سری بشدت افزایش می‌یابد.
- تغییر توان راکتیو تولیدی خازن سری با زاویه بار δ مشابه تغییر توان راکتیو خط است.
- در دهه‌های اخیر، در تمام دنیا از خازن سری برای جبران‌سازی خطوط انتقال بلند استفاده می‌شود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

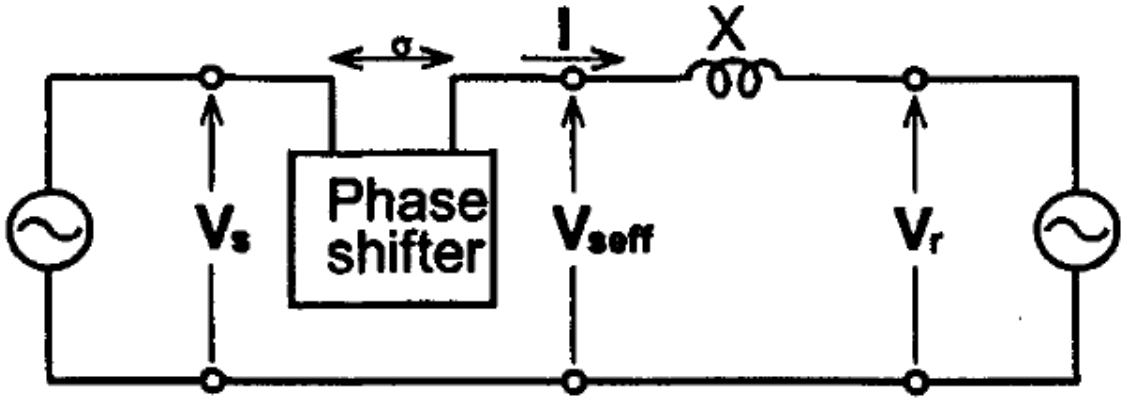
❖ کنترل زاویه فاز

- در سیستم‌های قدرت ممکن است زاویه انتقال لازم برای استفاده بهینه از یک خط خاص، با عملکرد مناسب کل سیستم انتقال در تضاد باشد. برای مثال؛
  - زمانی که توان بوسیله خطوط موازی با طول‌های الکتریکی متفاوت، بین دو شین انتقال یابد.
  - زمانی که دو شین بهم متصل‌اند اما اختلاف زاویه برای عبور توان مورد نظر کافی نیست.
- درچنین شرایطی اغلب از شیفت‌دهنده فاز (Phase Shifter) یا تنظیم‌کننده زاویه فاز (Phase Angle Regulator) استفاده می‌شود.

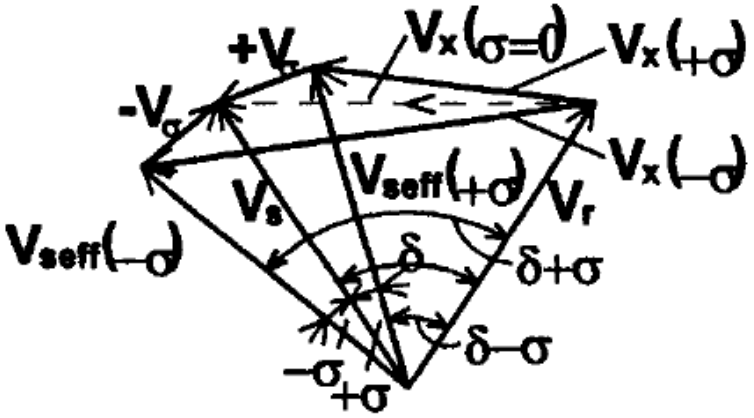
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ کنترل زاویه فاز



سیستم دو ماشینه بدون اتلاف به همراه شیفت‌دهنده فاز



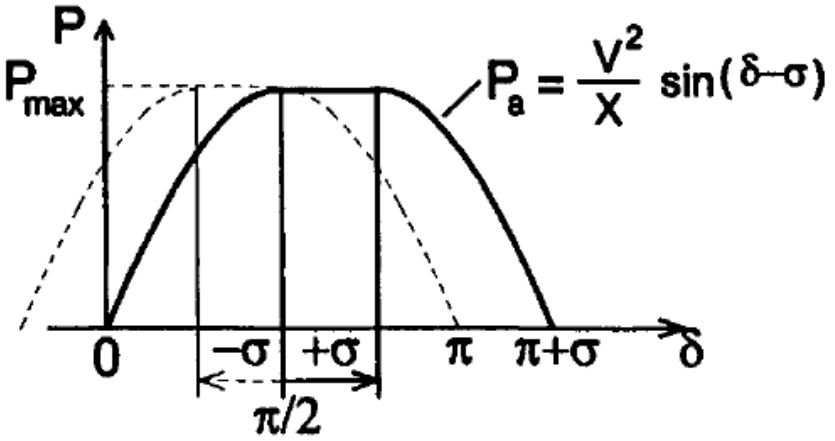
دیاگرام فازوری

- شیفت‌دهنده فاز را می‌توان بصورت یک منبع ولتاژ سینوسی (با فرکانس اصلی سیستم قدرت) با دامنه و زاویه فاز قابل کنترل در نظر گرفت.
- ولتاژ ابتدای خط (V_s) برابر است با مجموع ولتاژ (V_{seff}) و ولتاژ شیفت‌دهنده فاز (V_σ).
- با استفاده از شیفت‌دهنده فاز، می‌توان توان انتقالی را بطور مستقل از δ در مقدار مورد نظر، کنترل و نگهداری کرد.

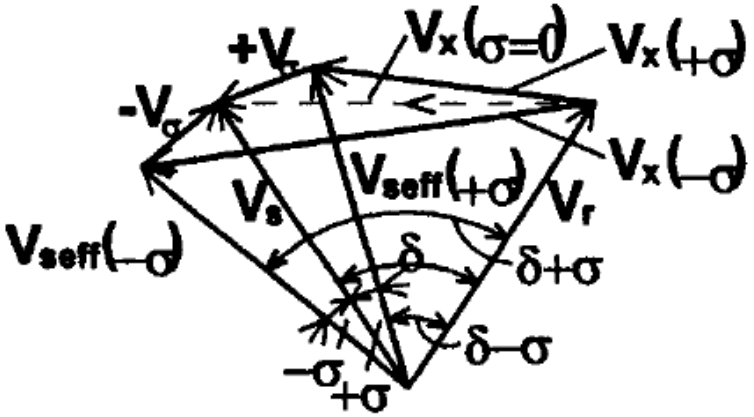
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ کنترل زاویه فاز



منحنی توان انتقالی بر حسب زاویه بار



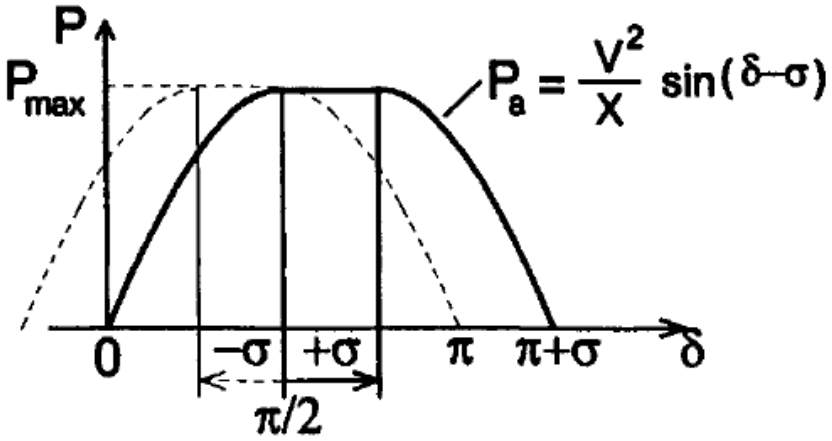
دیاگرام فازوری

- حتی پس از افزایش زاویه δ از $\frac{\pi}{2}$ (زاویه توان بیشینه)، می‌توان دامنه ولتاژ متعامد V_σ را به نحوی کنترل کرد که زاویه فاز مؤثر بین ولتاژ ابتدا و انتهای خط یعنی $(\delta - \sigma)$ برابر $\frac{\pi}{2}$ شود. بدین ترتیب می‌توان توان بیشینه را منتقل کرد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ کنترل زاویه فاز



منحنی توان انتقالی بر حسب زاویه بار

توان اکتیو انتقالی با استفاده از شیفت‌دهنده فاز

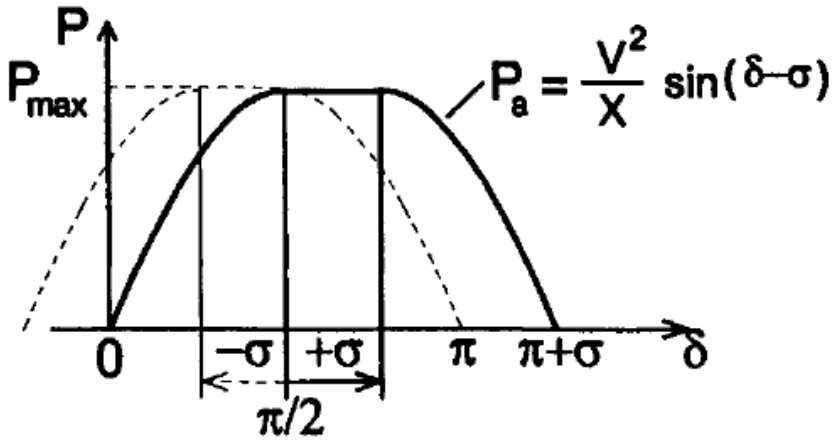
$$P = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta - \sigma)$$

- استفاده از شیفت‌دهنده فاز حد توان قابل انتقال را افزایش نمی‌دهد، اما توان انتقالی را در عمل بطور عمده‌ای افزایش می‌دهد.
- شیفت‌دهنده فاز از نظر تئوری منحنی P برحسب δ را به سمت راست انتقال داده و انتقال توان بیشینه را به ازاء هر مقدار زاویه δ در فاصله $\frac{\pi}{2} < \delta < \frac{\pi}{2} + \sigma$ میسر می‌سازد. اگر علامت ولتاژ شیفت‌دهنده فاز منفی شود، منحنی P برحسب δ به سمت چپ انتقال می‌یابد. در این حالت می‌توان توان انتقالی بیشینه را در بازه $\frac{\pi}{2} - \sigma < \delta < \frac{\pi}{2}$ از خط انتقال داد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران رایج در خطوط انتقال و کنترل توان عبوری

❖ کنترل زاویه فاز



منحنی توان انتقالی بر حسب زاویه بار

توان اکتیو انتقالی با استفاده از شیفت‌دهنده فاز

$$P = \frac{V^2}{X_L}\sin(\delta - \sigma)$$

- شیفت‌دهنده فاز هم توان اکتیو و هم توان راکتیو را می‌تواند تغییر دهد. VA شیفت‌دهنده فاز (نمایش داده شده با یک منبع ولتاژ) برابر است با:

VA شیفت‌دهنده فاز

$$VA = |V_\sigma||I| = V_\sigma I = \frac{4V^2}{X_L}\sin(\frac{\delta-\sigma}{2})\sin(\frac{\sigma}{2})$$

تعیین‌کننده دامنه ولتاژ تزریق شده توسط شیفت‌دهنده فاز

تعیین‌کننده جریان عبوری از شیفت‌دهنده فاز

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ محدودیت‌های دینامیکی انتقال توان

- در سیستم‌های قدرت AC، برای تولید توان الکتریکی و یا برای جبران توان راکتیو، از ماشین‌های سنکرون استفاده می‌شود.
- شرط اساسی برای تبادل توان مناسب، حفظ سنکرونیسم (هم‌زمانی) بین تمامی ماشین‌های سنکرون است (حفظ فرکانس سیستم قدرت در یک مقدار ثابت).
- بروز اغتشاشات دینامیکی متعدد در سیستم قدرت (از قبیل بروز عیب، عدم عملکرد صحیح تجهیزات کلیدزنی) موجب تغییرات ناگهانی شده و تعادل توان اکتیو را برهم می‌زند. در نتیجه، برخی از ماشین‌ها سرعت بیشتری یافته و برخی دیگر دارای سرعت کمتری می‌شوند.
- توانایی سیستم در بازگشت به شرایط حالت ماندگار و حفظ سنکرونیسم، معیار بسیار مهمی در بهره‌برداری و طراحی ظرفیت سیستم انتقال است.این توانایی بوسیله پایداری دینامیکی یا گذرای سیستم مشخص می‌شود.
- سیستم انتقال دارای پایداری گذراست، اگر پس از وقوع یک اغتشاش بزرگ، عملکرد سیستم به حالت عادی برگردد.
- سیستم انتقال دارای پایداری دینامیکی است، اگر پس از وقوع یک اغتشاش کوچک، عملکرد سیستم به حالت عادی برگردد. از طرف دیگر، ناپایداری دینامیکی بدین معنی است که ممکن است با وقوع یک اغتشاش کوچک، نوسانات مرتباً افزایش یافته و سنکرونیسم ژنراتورها از دست رود.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ محدودیت‌های دینامیکی انتقال توان

- در خلال اغتشاش‌های بزرگ و پس از آن، زاویه بار (انتقال) و توان انتقالی تغییر قابل ملاحظه‌ای داشته و حول مقدار حالت ماندگار نوسان می‌کنند. بدین دلیل، نقطه کار سیستم نباید به بیشینه توان قابل انتقال نزدیک باشد و باید حاشیه مناسبی برای نوسانات دینامیکی توان در نظر گرفت.
- ناپایداری ولتاژ: به پدیده فروپاشی ولتاژ که در اثر افزایش فزاینده بار رخ می‌دهد، ناپایداری ولتاژ گفته می‌شود.
- در پدیده فروپاشی یا ناپایداری ولتاژ، کاهش ولتاژ منجر به افزایش جریان بار و کاهش ضریب توان بار (موتور القایی) می‌شود که این مسئله خود نیز به کاهش بیشتر ولتاژ می‌انجامد.
- حد پایداری ولتاژ یک سیستم، بصورت P و V مشخص تعریف می‌شود و پس از آن، هر افزایشی در مقدار بار، به فروپاشی ولتاژ منجر می‌گردد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

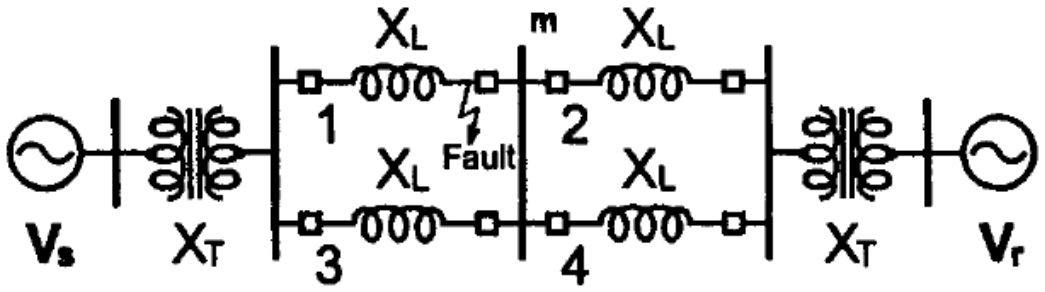
- در بخش‌های پیش مشاهده شد که جبران خط به روش سری یا موازی، بیشینه توان قابل انتقال را افزایش می‌دهد. پس با استفاده از روش‌های جبران (سری و یا موازی) و کنترل سریع و مناسب، می‌توان توان عبوری را تغییر داد، به نحوی که حد پایداری گذرا افزایش یافته، میرایی مناسبی در سیستم بوجود آید و از فروپاشی ولتاژ جلوگیری به عمل آید.
- همچنین می‌توان با استفاده از شیفت‌دهنده‌های فاز، زاویه انتقال را تغییر داده و توان عبوری را کنترل کرد. در این صورت اگر کنترل به اندازه کافی سریع انجام شود، پایداری گذرا و دینامیکی سیستم بهبود می‌یابد.
- در بخش بعدی، تأثیر روش‌های جبران‌سازی (موازی، سری و کنترل زاویه فاز) در بهبود پایداری گذرا و افزایش میرایی تشریح و با یکدیگر مقایسه می‌شوند. سپس، استفاده از جبران خازنی سری و موازی برای افزایش حد ناپایداری ولتاژ در خطوط انتقال شعاعی مورد بحث قرار می‌گیرد.

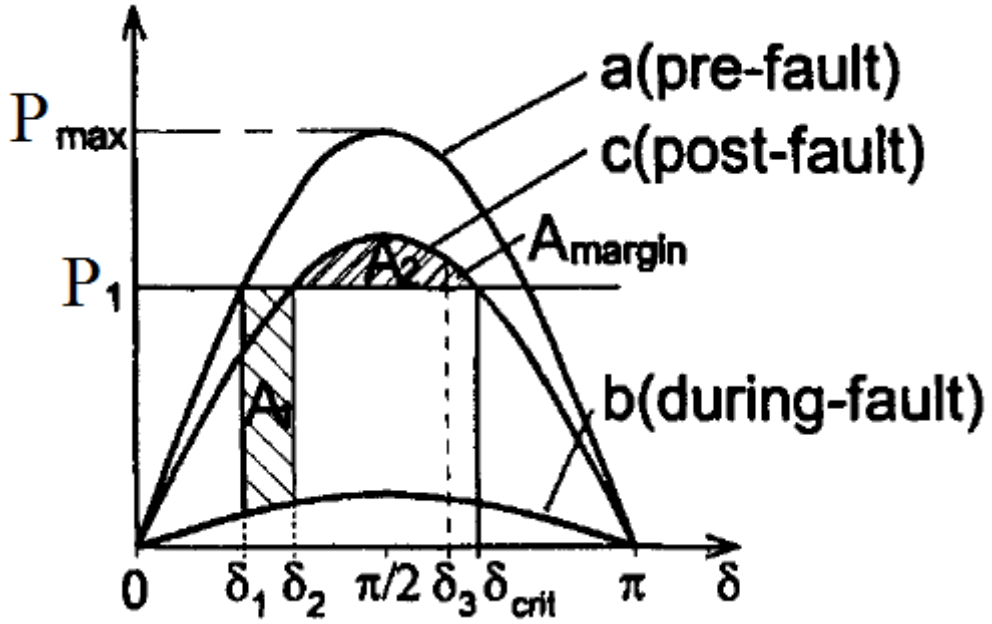
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

- با استفاده از معیار سطوح معادل می‌توان تأثیر جبران سری، موازی و کنترل زاویه را بر بهبود پایداری گذرا مشاهده کرد. مفهوم مساحت‌های معادل به کمک سیستم دو ماشینه و نمودار P برحسب δ روشن می‌شود.





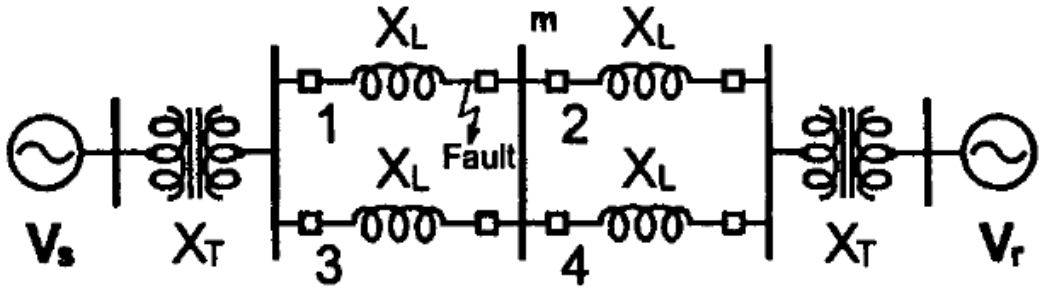
بیان معیار سطوح معادل در پایداری گذرا

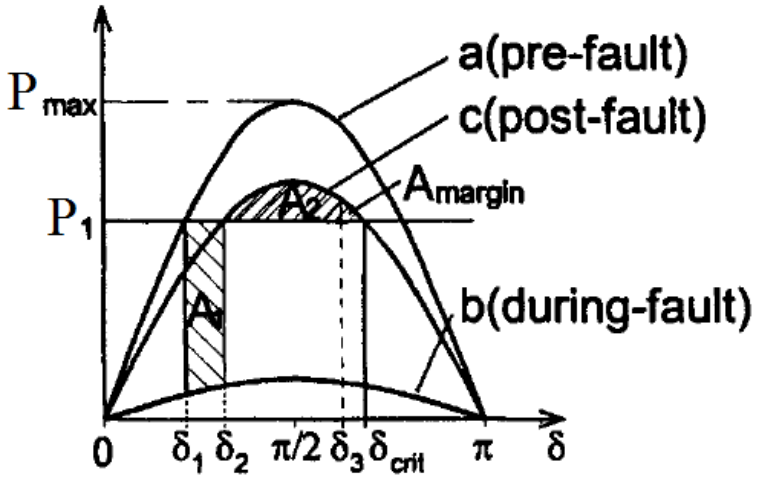
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

- منحنی P برحسب δ سیستم در حالات قبل، حین و بعد از خطا، به ترتیب مطابق منحنی‌های a وb وc است.
- در عملکرد بدون خطا (منحنی a)، در زاویه بار δ_1 توان P_1 از سیستم در حال عبور است. در همین حین، خطایی در بخش ۱ خط رخ می‌دهد. در حین خطا، منحنی b بیانگر رابطه بین توان و زاویه بار (انتقال) است. در حین خطا، توان الکتریکی انتقال یافته خط بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، اما توان مکانیکی ورودی به ژنراتور ابتدای خط ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، ژنراتور شتاب گرفته و زاویه انتقال آن از δ_1 به δ_2 افزایش می‌یابد. ژنراتور انتهای خط انرژی شتاب‌دهنده (*Accelerating Energy*) را که با سطح A_1 نشان داده شده، جذب می‌کند. پس از رفع خطا و خروج خط ۱، سیستم بوسیله منحنی c توصیف می‌شود.





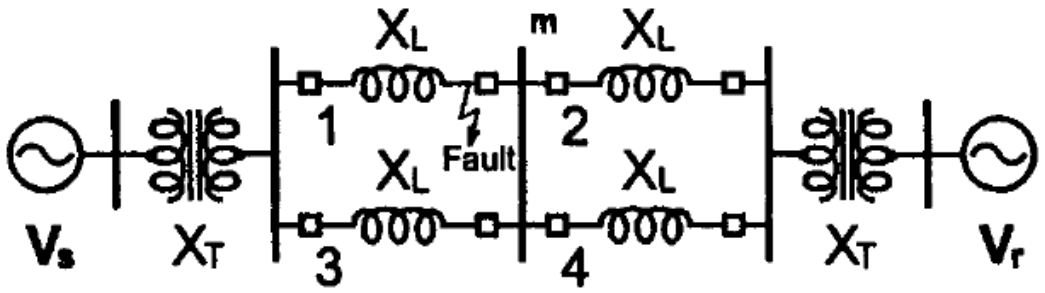
بیان معیار سطوح معادل در پایداری گذرا

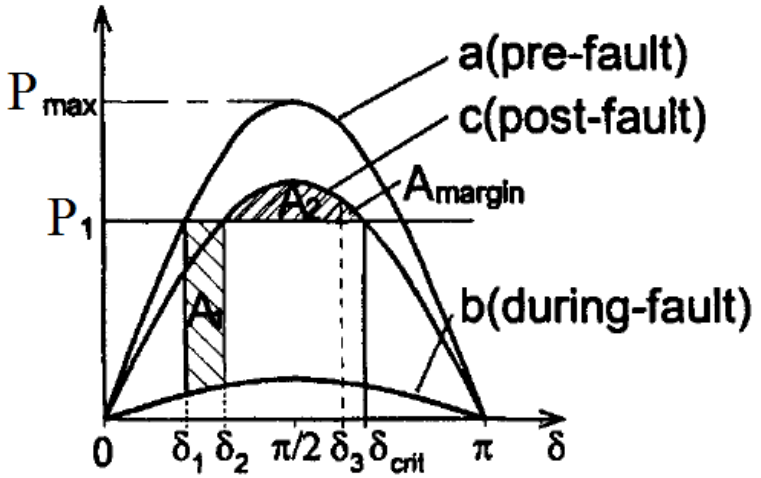
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

- پس از رفع خطا، در زاویه δ_2 در منحنی c، توان انتقالی از توان مکانیکی ورودی بیشتر شده و سرعت ژنراتور ابتدای خط شروع به کاهش می‌کند، اما زاویه انتقال بدلیل انرژی جنبشی ذخیره شده ماشین، کماکان به افزایش خود ادامه می‌دهد. بیشینه زاویه انتقال برابر δ_3 است که در آن، انرژی کاهش‌دهنده (*Decelerating Energy*) که با سطح A_2 بیان شده، با سطح A_1 برابر می‌شود.
- حد پایداری گذرا برابر $\delta_3 = \delta_{crit}$ بوده و پس از آن، انرژی کاهش‌دهنده شتاب با انرژی شتاب‌دهنده مساوی نشده و سنکرونیسم بین ژنراتورهای ابتدا و انتهای خط برقرار نخواهد شد. سطح A_{margin} بین δ_3 و δ_{crit} معرف حاشیه پایداری گذرای سیستم است.





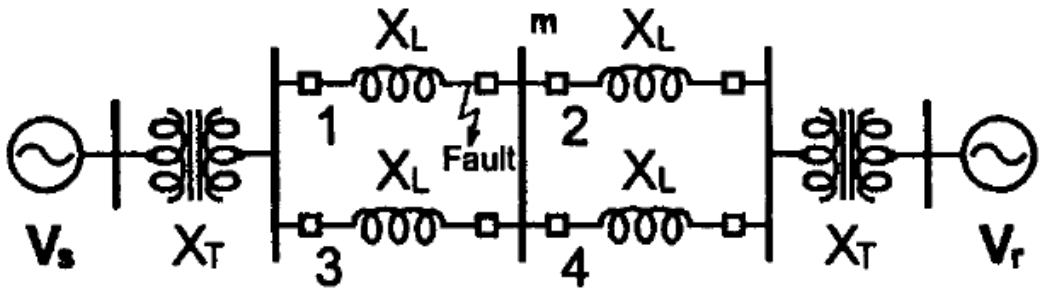
بیان معیار سطوح معادل در پایداری گذرا

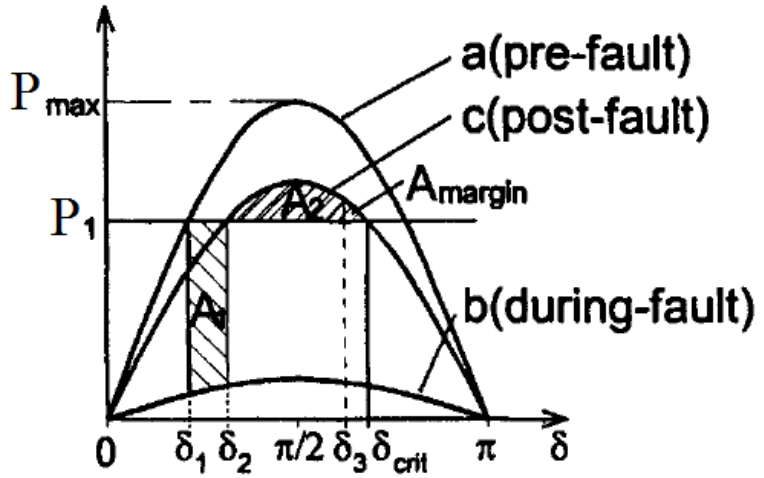
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

- بنابراین، مشاهده می‌شود که به ازاء زمان رفع خطا و توان انتقالی معین، پایداری گذرای بوسیله منحنی P برحسب δ سیستم پس از خطا تعیین می‌شود.
- بکارگیری هر یک از جبران‌سازها، مشخصه انتقال را بهبود بخشیده و اثر قابل ملاحظه‌ای در افزایش توان قابل انتقال سیستم پس از خطا و در نتیجه در افزایش پایداری گذرا دارد.





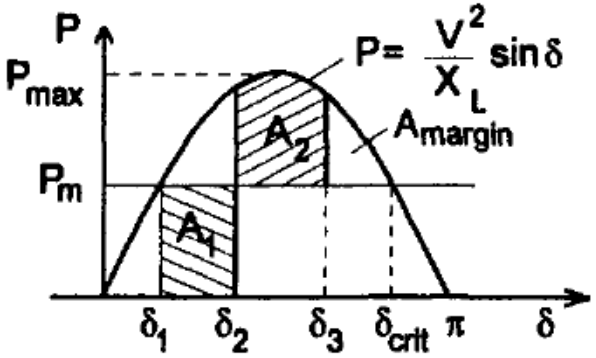
بیان معیار سطوح معادل در پایداری گذرا

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

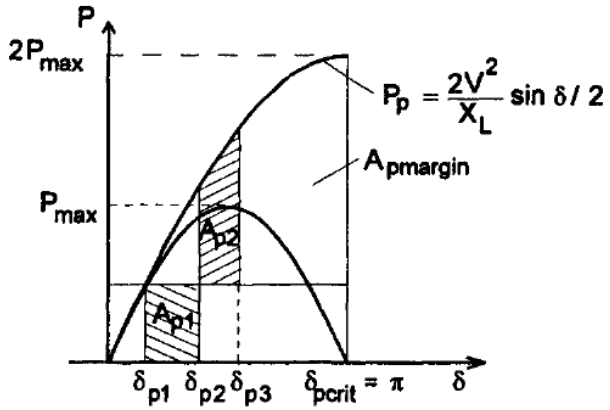
❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

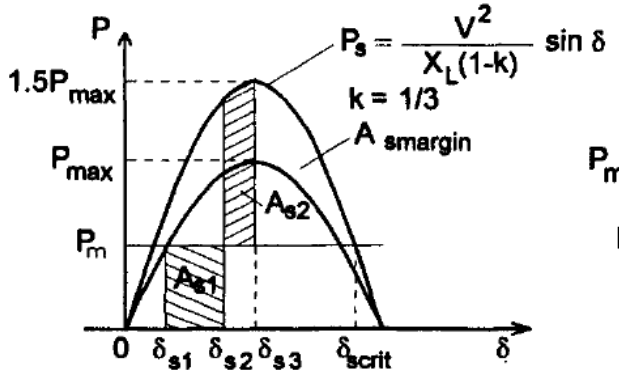
- برای مشاهده اثر جبران‌سازها روی پایداری گذرا، سیستم‌های بدون جبران، با جبران‌ساز ایده‌آل موازی نقطه میانی، با جبران‌ساز سری خازنی و جبران با استفاده از شیفت‌دهنده فاز را در نظر بگیرید.
- با مقایسه چهار حالت فوق، ملاحظه می‌شود که در سه سیستم دارای جبران‌ساز، حاشیه پایداری گذرا بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته است. در روش جبران موازی، بهبود بوسیله تقسیم خط انتقال و تنظیم ولتاژ نقطه میانی حاصل می‌شود. در جبران بوسیله خازن سری، امپدانس مؤثر خط انتقال کاهش یافته و زاویه انتقال حداقل می‌گردد. در جبران زاویه فاز، زاویه انتقال یعنی $(\delta - \sigma)$ در ۹۰درجه ثابت نگه داشته شده تا توان بیشینه قابل انتقال بدون تغییر باقی بماند، هرچند ممکن است زاویه ژنراتور (δ) بیشتر از این مقدار گردد.



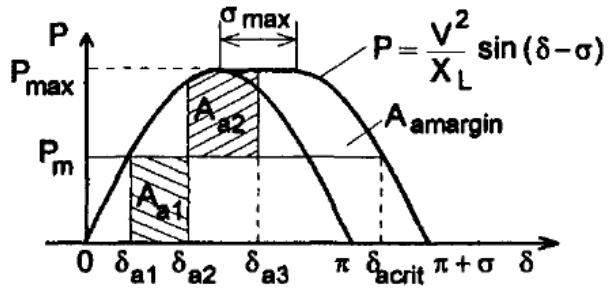
بدون جبران



با جبران‌ساز موازی میانی خط



با جبران‌ساز خازنی سری



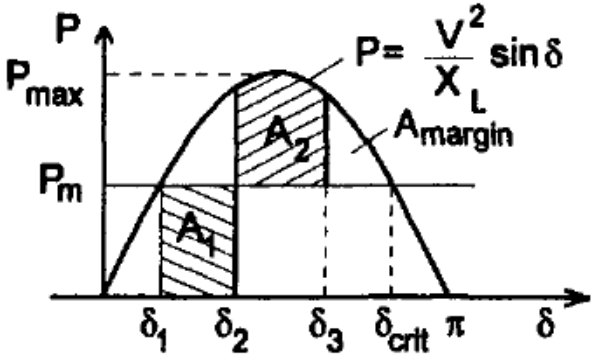
جبران‌سازی با شیفت‌دهنده فاز

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

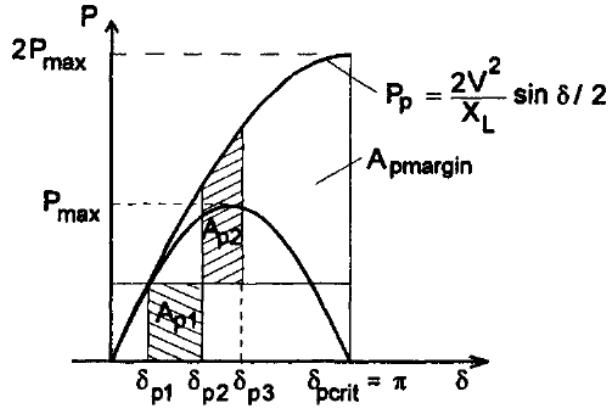
❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ بهبود پایداری گذرا

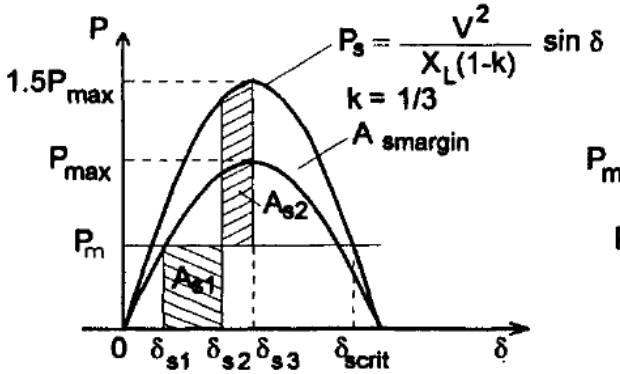
- استفاده از هر یک از روش‌های جبران، موجب افزایش قابل ملاحظه حاشیه پایداری گذرا نسبت به حالت بدون جبران می‌شود. اگر سیستم جبران‌نشده دارای حاشیه پایداری گذرای مناسبی باشد، استفاده از جبران‌سازها موجب افزایش توان قابل انتقال بدون کاهش این حاشیه می‌شود.
- معمولاً سیستم‌های قدرت به نحوی طراحی می‌شوند که دارای پایداری گذرای مناسبی باشند و برای رعایت این امر، حالات مختلف وقوع خطا و در نتیجه تغییر ساختار سیستم در نظر گرفته می‌شود. دلیل این فلسفه طراحی این است که ظرفیت واقعی سیستم‌های انتقال بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از مقادیر نقطه کار آن‌ها است. در نتیجه از دیدگاه اقتصادی و فنی بهتر است بجای جبران کل شبکه، از روش‌های جبران سریع استفاده شود، مخصوصاً برای مقابله با پدیده‌های دینامیکی و افزایش قابلیت انتقال توان.



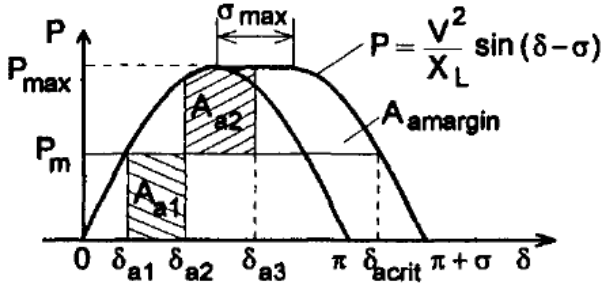
بدون جبران



با جبران‌ساز موازی میانی خط



با جبران‌ساز خازنی سری



جبران‌سازی با شیفت‌دهنده فاز

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ میرایی نوسان توان

- در سیستم قدرت زیر میرا (*under damped*)، هر اغتشاش کوچکی می‌تواند موجب نوسان زاویه ماشین در فرکانس طبیعی، حول مقدار حالت ماندگار آن شود. نوسان زاویه نیز به نوسان توان حول مقدار حالت ماندگار منجر خواهد شد.
- در برخی موارد، کمبود میرایی در سیستم‌های قدرت می‌تواند موجب محدود شدن توان قابل انتقال شود.
- در گذشته، میرایی نوسانات توان بوسیله تحریک ماشین‌های سنکرون کنترل می‌شد، اما پس از ظهور جبران‌گرهای سریع، امکان کنترل میرایی نوسانات توان بصورت مؤثری بوسیله آن‌ها فراهم گردید.
- نوسان توان یک پدیده دینامیکی است که دائماً در سیستم رخ می‌دهد. بنابراین، جبران‌گر باید منعطف بوده و قادر باشد به سرعت تغییر کند و پاسخ سریع مناسب جهت میراسازی نوسانات را ارائه دهد.
- پاسخ و عمل کنترلی لازم برای هر سه روش جبران‌سازی (موازی نقطه میانی، خازنی سری و تنظیم‌کننده فاز) یکسان و بصورت زیر است:
  - ✓ زمانیکه ژنراتور نوسان‌کننده، شتاب می‌گیرد و زاویه بار (δ) افزایش می‌یابد ($\frac{d\delta}{dt} > 0$)، بدلیل توان مکانیکی ورودی اضافی، توان الکتریکی انتقالی باید افزایش یابد.
  - ✓ زمانیکه سرعت ژنراتور نوسان‌کننده، کم می‌شود و زاویه بار (δ) کاهش می‌یابد ($\frac{d\delta}{dt} < 0$)، توان الکتریکی انتقالی باید کاهش یابد تا تعادل بین آن و توان مکانیکی ورودی ژنراتور برقرار گردد.

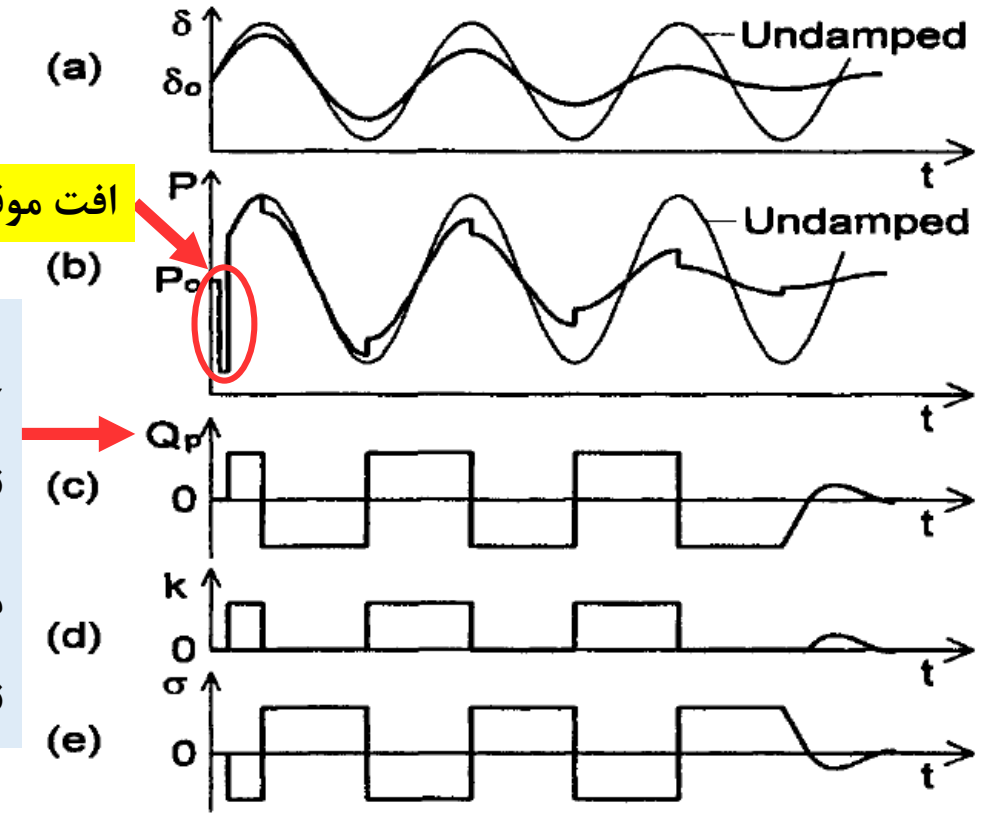
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ میرایی نوسان توان

افت موقت توان نشان‌گر اغتشاشی است که موجب شروع نوسان شده است

جبران‌گر موازی هنگام افت توان الکتریکی تولیدی ($\frac{d\delta}{dt} > 0$)، از خود رفتار خازنی نشان داده و با تزریق توان راکتیو، ولتاژ نقطه میانی و توان انتقالی خط را افزایش می‌دهد. این جبران‌گر هنگام $\frac{d\delta}{dt} < 0$ با جذب توان راکتیو (رفتار سلفی)، ولتاژ نقطه میانی و توان انتقالی خط را کاهش می‌دهد.



شکل موج‌های نوسانات توان با بکارگیری جبران‌گر موازی، سری و کنترل زاویه فاز

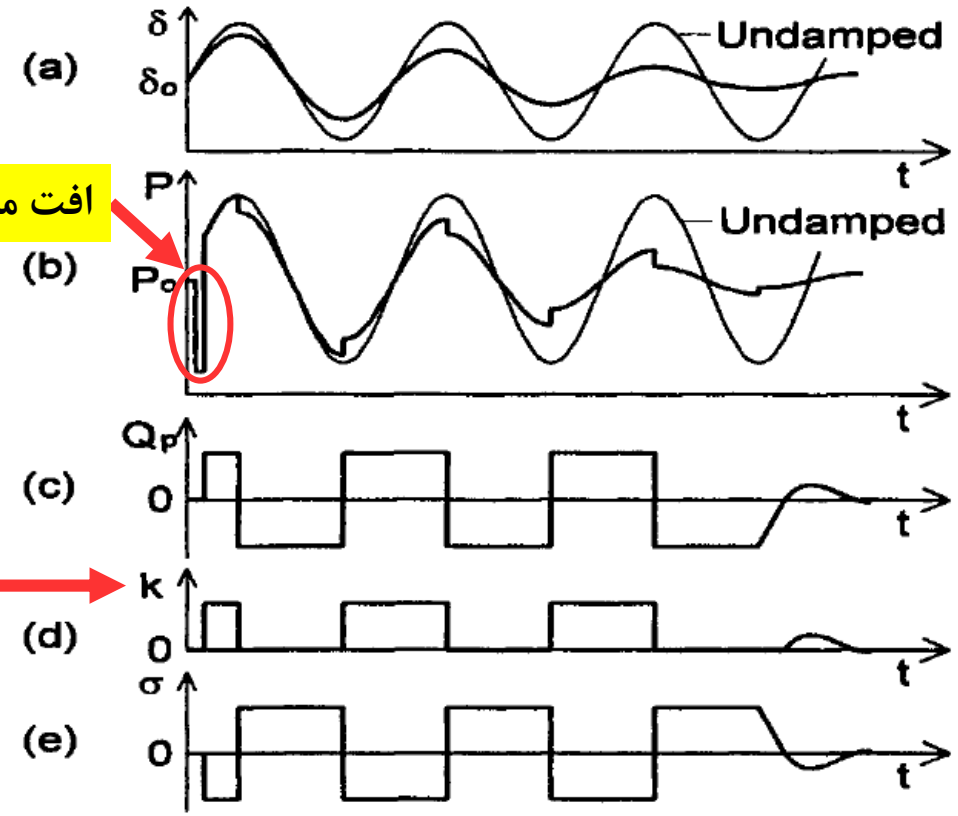
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ میرایی نوسان توان

افت موقت توان نشان‌گر اغتشاشی است که موجب شروع نوسان شده است

هنگام $\frac{d\delta}{dt} > 0$، جبران‌گر سری با افزایش k و در نتیجه کاهش امپدانس خط، توان انتقالی خط را افزایش می‌دهد. اگر $\frac{d\delta}{dt} < 0$ باشد، k کاهش یافته و در نتیجه توان انتقالی خط به مقدار حالت بدون جبران کاهش می‌یابد.



شکل موج‌های نوسانات توان با بکارگیری جبران‌گر موازی، سری و کنترل زاویه فاز

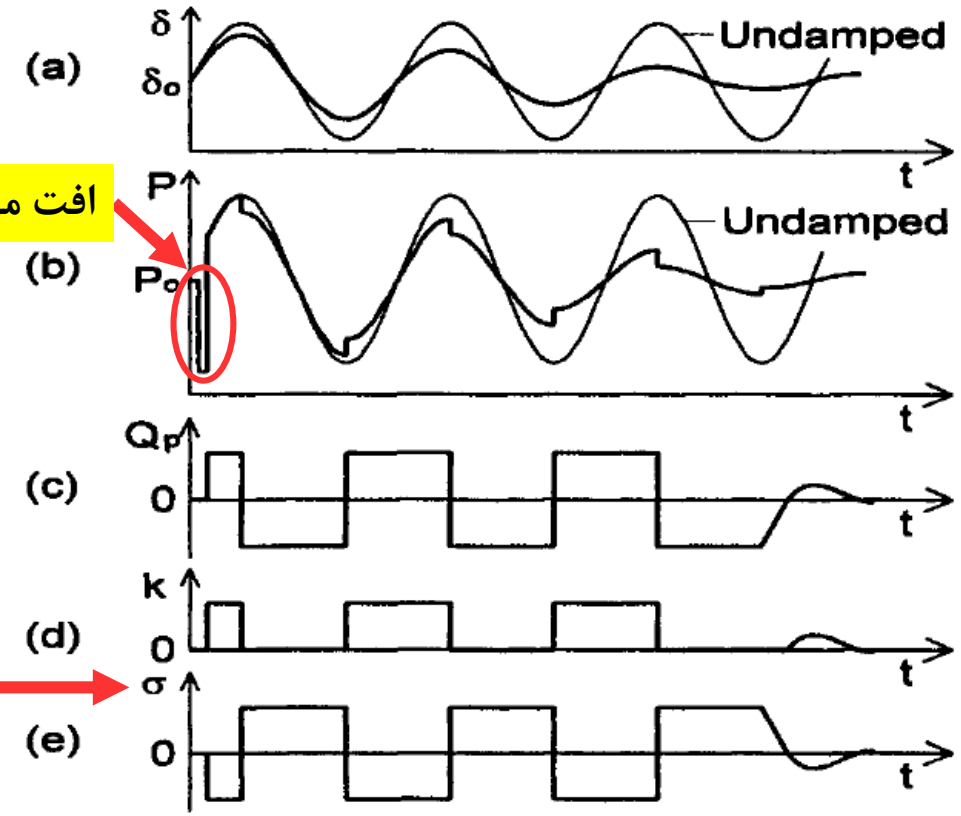
سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ میرایی نوسان توان

افت موقت توان نشان‌گر اغتشاشی است که موجب شروع نوسان شده است

زمانیکه $\frac{d\delta}{dt} > 0$، شیفت‌دهنده فاز زاویه σ منفی تولید می‌کند تا با افزایش زاویه بین دو انتهای خط، توان انتقالی از خط را افزایش دهد. اگر $\frac{d\delta}{dt} < 0$ باشد، شیفت‌دهنده فاز زاویه σ مثبت تولید می‌کند. که منجر به کاهش زاویه بین دو انتهای خط و در نتیجه کاهش توان انتقالی از خط می‌گردد.



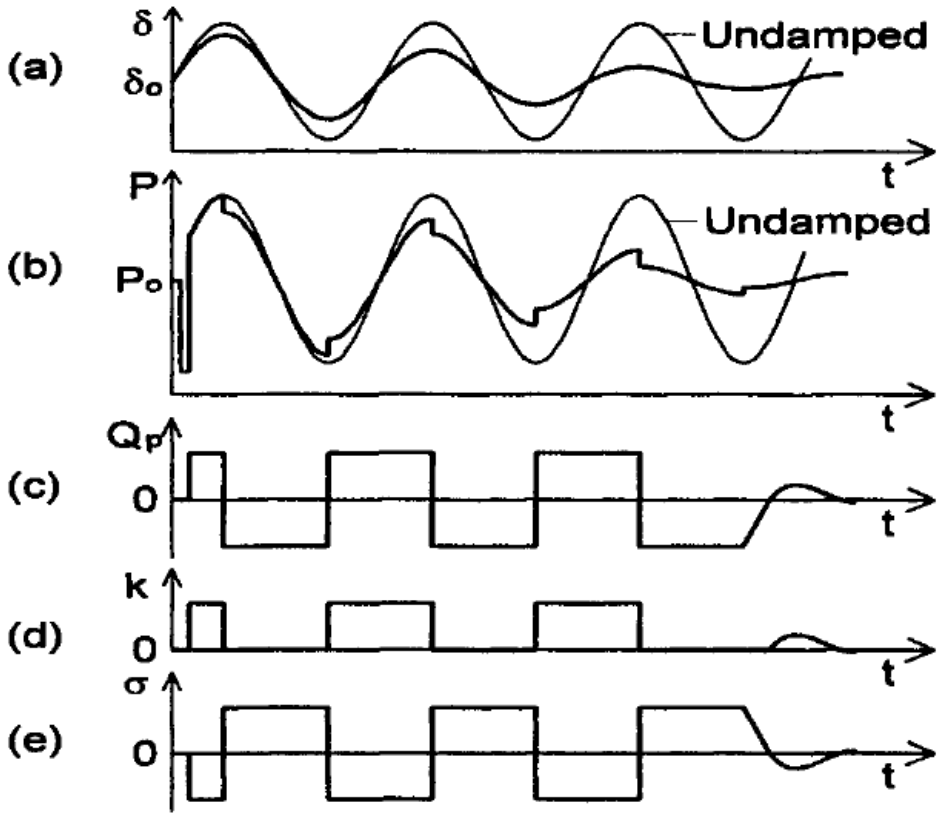
شکل موج‌های نوسانات توان با بکارگیری جبران‌گر موازی، سری و کنترل زاویه فاز

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ میرایی نوسان توان

- برای هر سه نوع جبران، از کنترل بنگ‌بنگ که در آن خروجی بین مقادیر کمینه و بیشینه تغییر می‌کند، استفاده شده است.
- این نوع کنترل بویژه زمانیکه نوسانات بزرگ باشد، بهترین راه‌حل ممکن است.
- برای میرا کردن نوسانات نسبتاً کوچک توان، تغییر پیوسته خروجی جبران‌گر هماهنگ با توان یا زاویه ژنراتور ترجیح داده می‌شود.



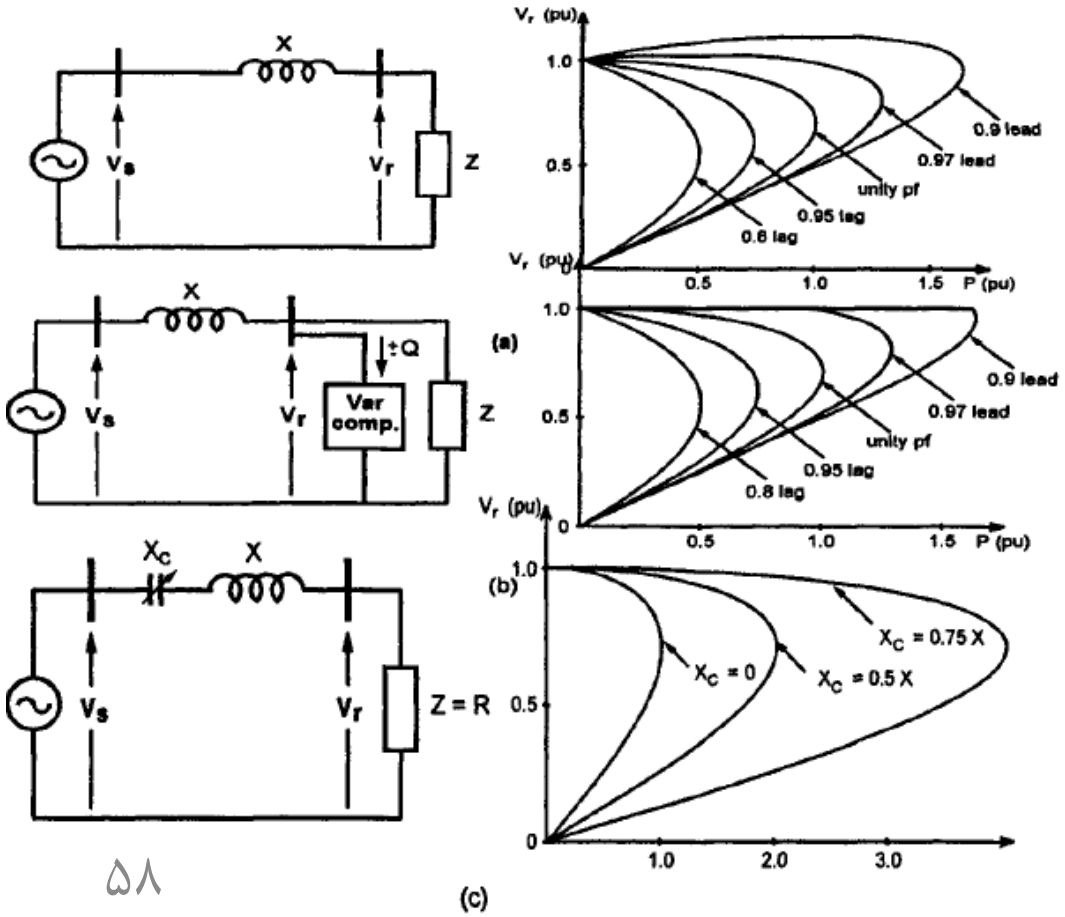
شکل موج‌های نوسانات توان با بکارگیری جبران‌گر موازی، سری و کنترل زاویه فاز

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ جبران دینامیکی برای تقویت پایداری

❖ افزایش حد پایداری ولتاژ

- سیستم شعاعی با یک فیدر با راکتانس X و بار با امپدانس Z ←
- منحنی V_r-P در ضریب قدرت‌های ۰/۸ پس‌فاز تا ۰/۹ پیش‌فاز←
- قسمتی از منحنی که زیر نقطه بحرانی قرار دارد، از نظر ولتاژ ناپایدار است.
- بارهای سلفی، پایداری ولتاژ را کاهش و بارهای خازنی آن را افزایش می‌دهند.
- بهبود پایداری ولتاژ در جبران‌سازی موازی، از طریق تأمین توان راکتیو مورد نیاز بار و تنظیم ولتاژ ترمینال ($V_r = V$) انجام می‌گیرد.
- بهبود پایداری ولتاژ در جبران‌سازی سری، از طریق خنثی‌کردن بخشی از راکتانس خط صورت می‌پذیرد. با این کار، منبع ولتاژ از دید بار تغییرناپذیر خواهد بود.



سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ مشکلات و نیازهای سیستم انتقال: ظهور ادوات FACTS

❖ مشکلات موجود در سیستم‌های انتقال رایج:

- طول خط: با افزایش طول خط، مشکلات خط انتقال بیشتر نیز می‌شود.
- پایداری
- کنترل‌پذیری توان انتقالی

✓ جبران‌سازهای سری، موازی و شیفت‌دهنده‌های فاز متداول قادر به کنترل لحظه‌ای، سریع و با ظرفیت بالا نیستند.

✓ کنترل‌کننده‌های مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت، برخلاف جبران‌سازهای متداول دارای پاسخ لحظه‌ای سریع و مناسب می‌باشند.

✓ FACTS: عبارت است از بکارگیری کنترل‌کننده‌ها یا جبران‌سازهای مبتنی بر مبدل‌های الکترونیک قدرت در سیستم‌های انتقال AC، به منظور افزایش کنترل‌پذیری سیستم و افزایش قابلیت انتقال توان.

✓ اهداف FACTS:

۱. افزایش قابلیت انتقال توان سیستم‌های انتقال
۲. عبور دادن توان از مسیرهای مورد نظر

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

❖ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

- از تریستورهای معمولی (که توانایی ذاتی خاموش شدن را ندارند) در مدارهایی با آرایش‌هایی نظیر خازن‌ها و راکتورهای قطع و وصل شونده توسط کلید و ترانسفورماتورهای دارای تغییردهنده تپ معمولی (مکانیکی) استفاده می‌شود.
- سرعت پاسخ این ادوات بسیار سریع‌تر بوده و دارای کنترل هوشمند می‌باشند.
- کنترل‌کننده‌های این دسته، هر کدام یکی از سه پارامتری را که بر انتقال توان مؤثرند، تغییر می‌دهند.
  - ✓ SVC: ولتاژ
  - ✓ TCSC: امپدانس انتقال
  - ✓ Phase Shifter: زاویه انتقال
- بجز شیفت‌دهنده فاز، بقیه ادوات مشخصه مشترکی دارند؛ توان راکتیو مورد نیاز برای جبران، بوسیله بانک‌های خازنی و سلفی متداول، تولید یا جذب شده و کلیدهای تریستوری فقط برای کنترل امپدانس راکتیو ترکیبی این بانک‌ها از دید سیستم قدرت بکار می‌روند.
- شیفت‌دهنده فاز چون از خازن یا سلف استفاده نمی‌کند، بنابراین قادر به جذب یا تولید توان راکتیو و مبادله آن با خط نمی‌باشد.
- این جبران‌گرها، از دید سیستم انتقال، در حکم یک ادمیتانس راکتیو متغیر بوده و عموماً رفتار امپدانسی سیستم را تغییر می‌دهد.

سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

❑ کنترل‌کننده‌های FACTS

❖ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

- کنترل‌کننده‌های این دسته، هر کدام یکی از سه پارامتری را که بر انتقال توان مؤثرند، تغییر می‌دهند.

SVC: ولتاژ

TCSC: امپدانس انتقال

Thyristor Controlled Phase Shifter: زاویه انتقال