# 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

### ❖ 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

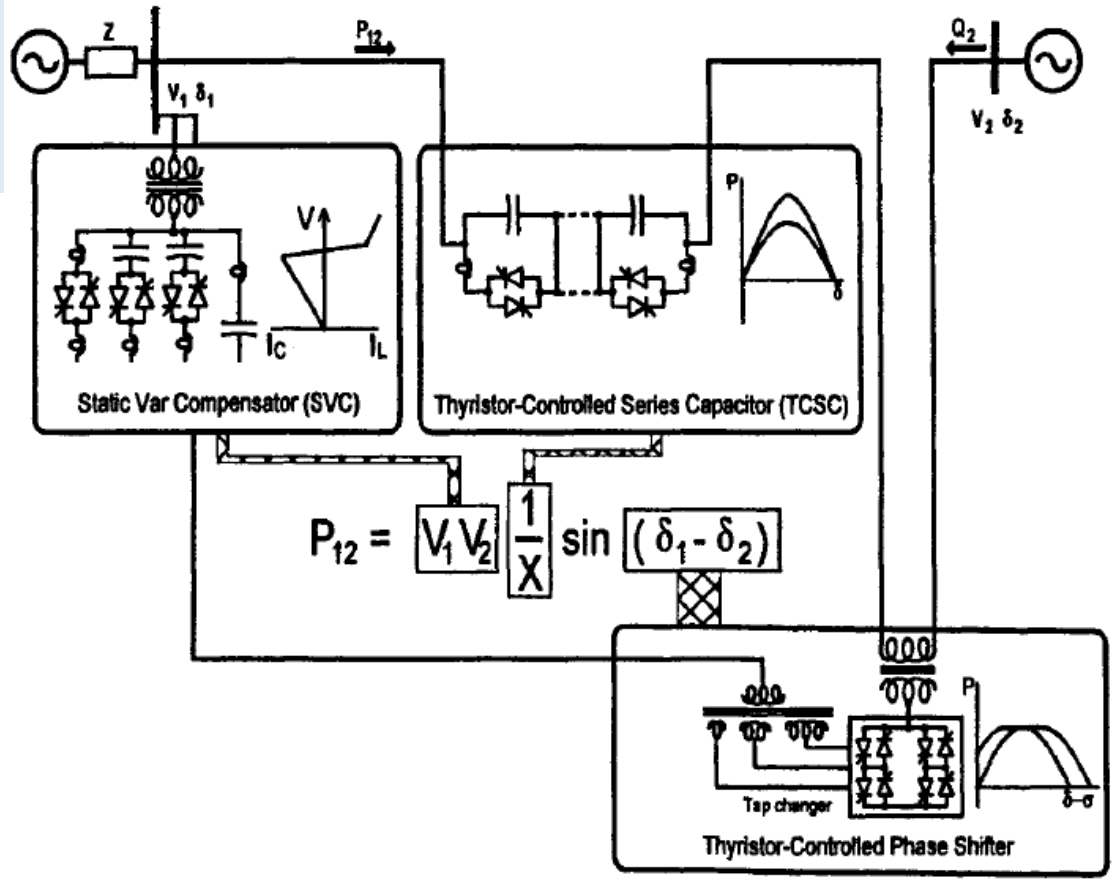
### ❖ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

- 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

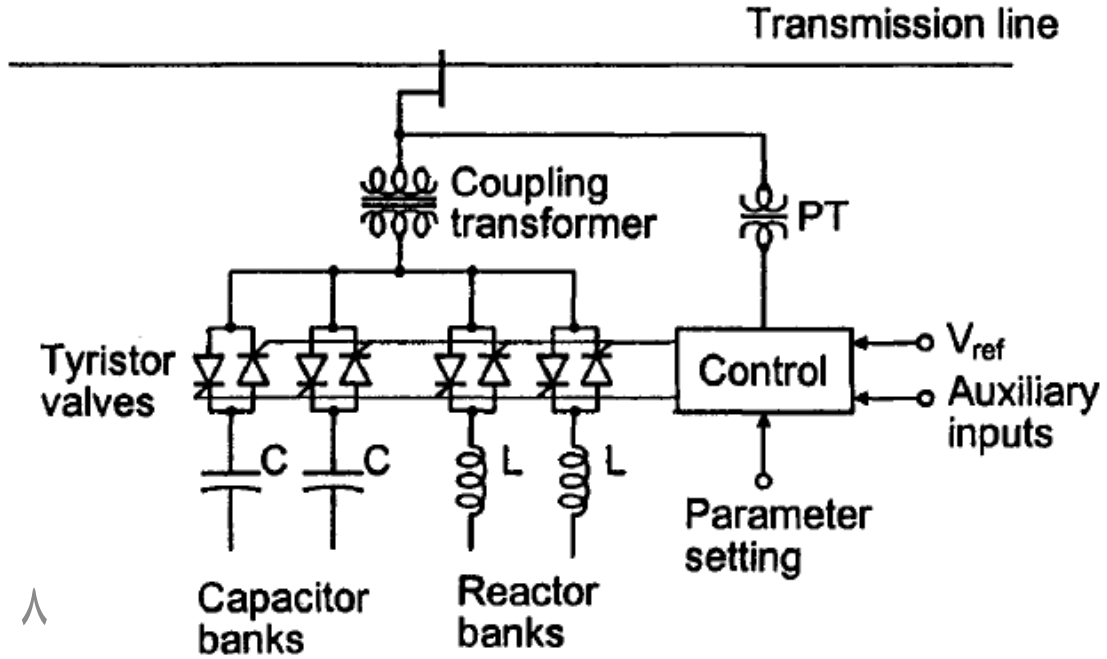


# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- جبران‌گرهای استاتیکی کنترل‌شده با تریستور در واقع نمونه‌های ابتدایی کنترل‌کننده‌های FACTS امروزی هستند.
- این جبران‌گرها در ابتدای دهه ۷۰ میلادی برای جبران‌سازی کوره القایی ابداع شده و سپس در خطوط انتقال بکار گرفته شدند.
- نمونه یک جبران‌گر استاتیکی موازی دارای خازن‌های کلیدزنی شده با تریستور (TSCs) و راکتور کنترل‌شده تریستوری (TCRs) در شکل زیر نشان داده شده است. با کنترل و کلیدزنی مناسب خازن‌ها و سلف‌ها، می‌توان توان راکتیو خروجی را بطور پیوسته بین مقادیر نامی خازنی و سلفی جبران‌گر تغییر داد.



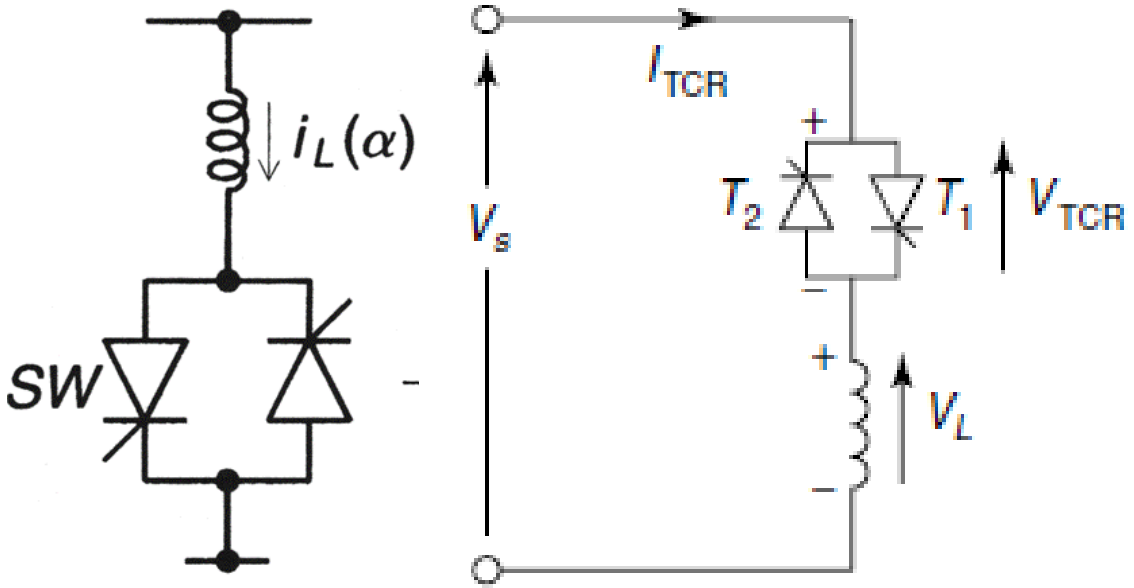

- SVC یک تولید کننده یا جذب کننده توان راکتیو با اتصال موازی است که خروجی آن با تبادل جریان خازنی یا سلفی تنظیم می شود که به منظور حفظ نمودن و یا کنترل پارامترهای معین از سیستم قدرت (به طور نمونه، ولتاژشین) می‌باشد. درمحاسبات پخش بار، شینی که SVC به آن اتصال یافته به عنوان شین PV نمایش داده می شود.

# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

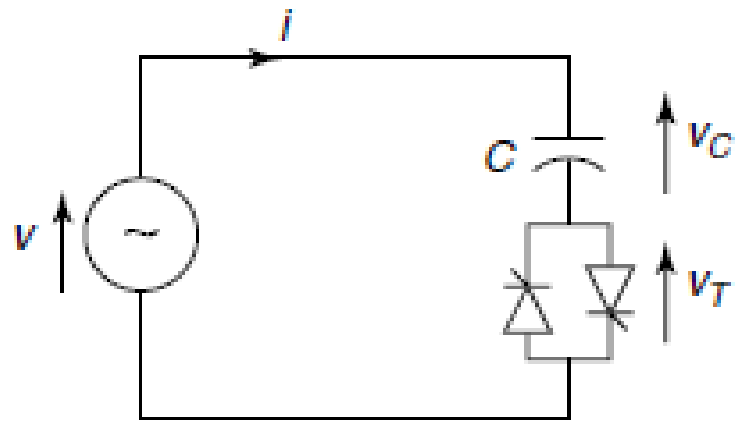
## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- اجزای اصلی تشکیل‌دهنده جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو:
  - ✓ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)
  - ✓ خازن کلیدزنی شده با تریستور (TSC)




راکتور کنترل‌شده تریستوری (TCR)



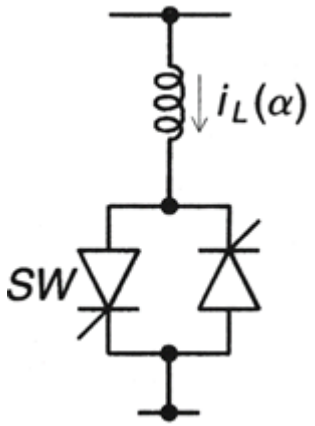

خازن کلیدزنی شده با تریستور (TSC)

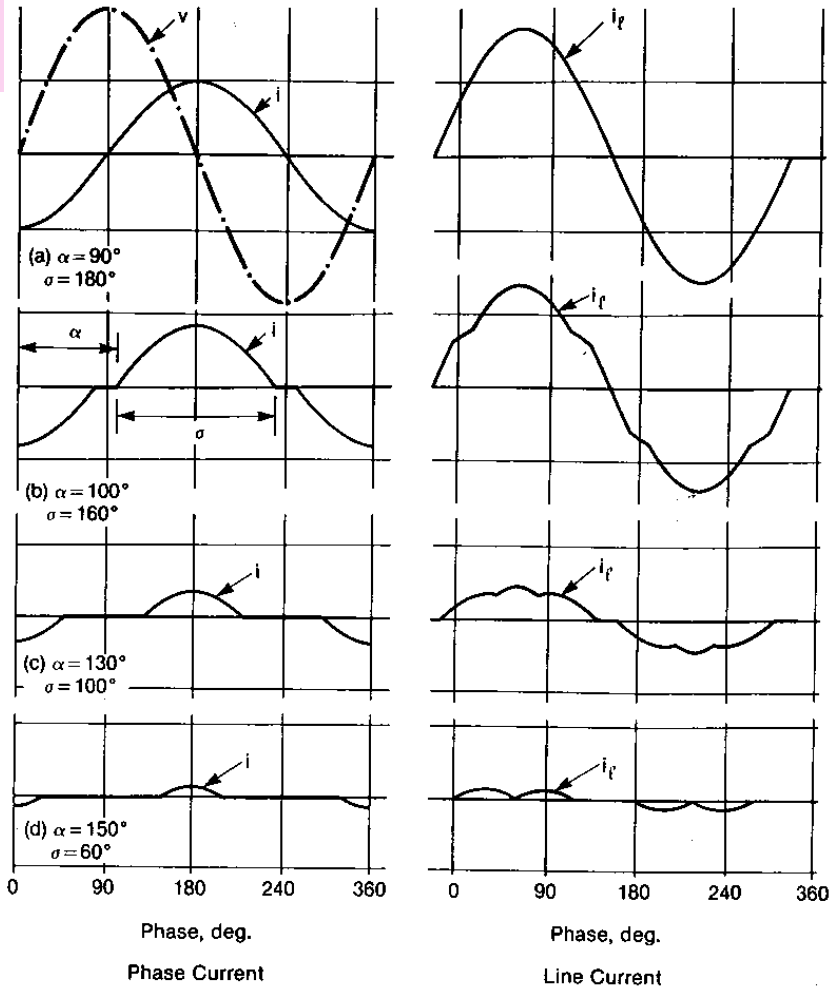
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)




α: زاویه آتش یا تأخیر تریستور

β: زاویه خاموشی تریستور

σ: دوره هدایت تریستور

$$v(t) = V\sin(\omega t)$$

$$i_L(t) = \begin{cases} \dfrac{V}{L\omega}(\cos\alpha - \cos\omega t) & \alpha \le \omega t \le \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma \le \omega t \le \alpha + \pi \end{cases}$$

$$90^\circ \le \alpha \le 180^\circ$$

$$\beta = 2\pi - \alpha$$

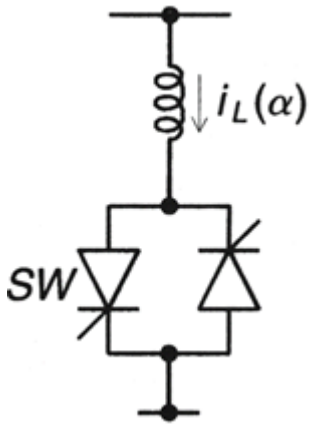
$$\sigma = \beta - \alpha = 2\pi - 2\alpha = 2(\pi - \alpha)$$

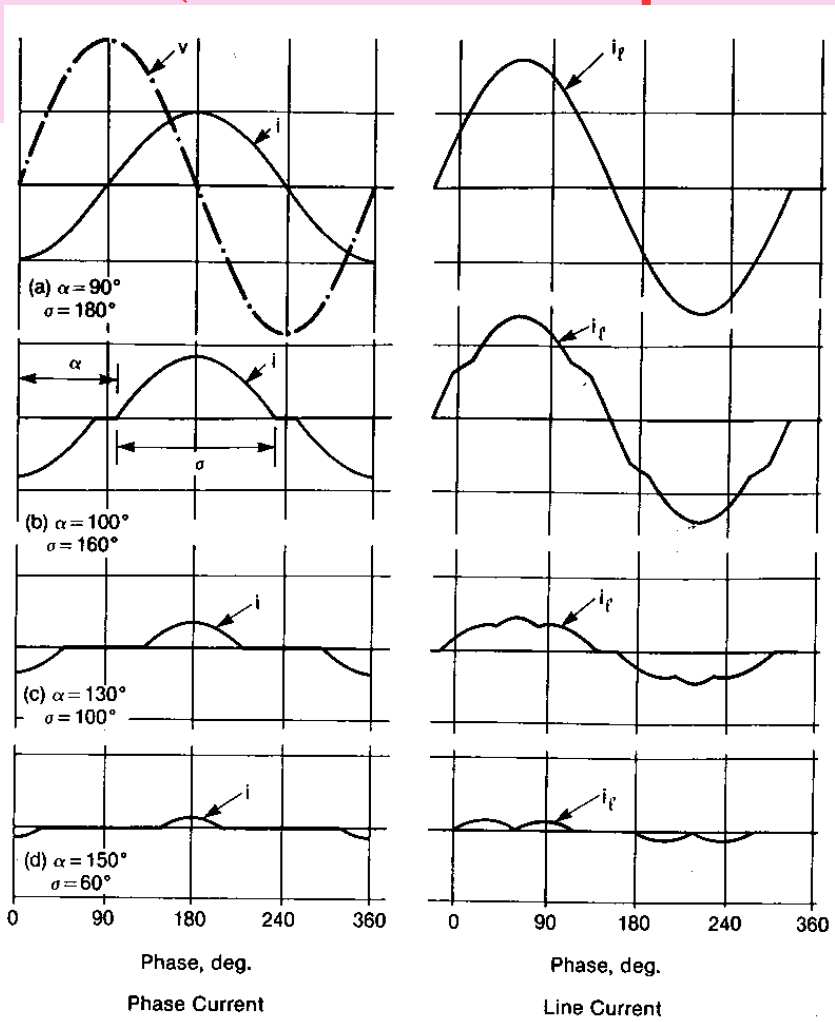
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)




امکان هدایت تنها برای یکی از تریستورها فراهم است. $\alpha < 90^\circ$
جریان TCR ناپیوسته است.
جریان عبوری از TCR دارای مؤلفه dc است.

هدایت تریستورها کامل است (۱۸۰ درجه). $\alpha = 90^\circ \Rightarrow \sigma = 180^\circ$
جریان TCR پیوسته است.
جریان TCR دارای کمترین میزان هارمونیک است.
تنش حرارتی تریستورها بیشینه است.

میزان هدایت تریستورها کمتر از ۱۸۰ درجه است. $90^\circ < \alpha < 180^\circ$
جریان TCR ناپیوسته است.
جریان TCR دارای هارمونیک است.
در صورت برابر بودن زاویه آتش هر دو تریستور، هارمونیک‌های زوج تولید نمی‌شوند، در غیر اینصورت، هارمونیک‌های زوج نیز در جریان TCR تولید می‌شود.

تریستورها هدایت نمی‌کنند. $\alpha = 180^\circ \Rightarrow \sigma = 0^\circ$
جریان عبوری از TCR صفر است.

# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)

- جریان عبوری از راکتور را می‌توان بطور پیوسته با کنترل زاویه آتش (تأخیر)، از مقدار صفر تا بیشینه تغییر داد.
- با افزایش زاویه آتش از $\alpha = 90$ تا $\alpha = \pi$، زاویه هدایت تریستور و همچنین دامنه جریان (مؤلفه اصلی) عبوری از تریستور (و یا راکتور) کاهش می‌یابد.
- اگر $\alpha = 90$ برقرار باشد، تریستورها بطور کامل هدایت کرده و جریان همواره در راکتور برقرار خواهد بود.

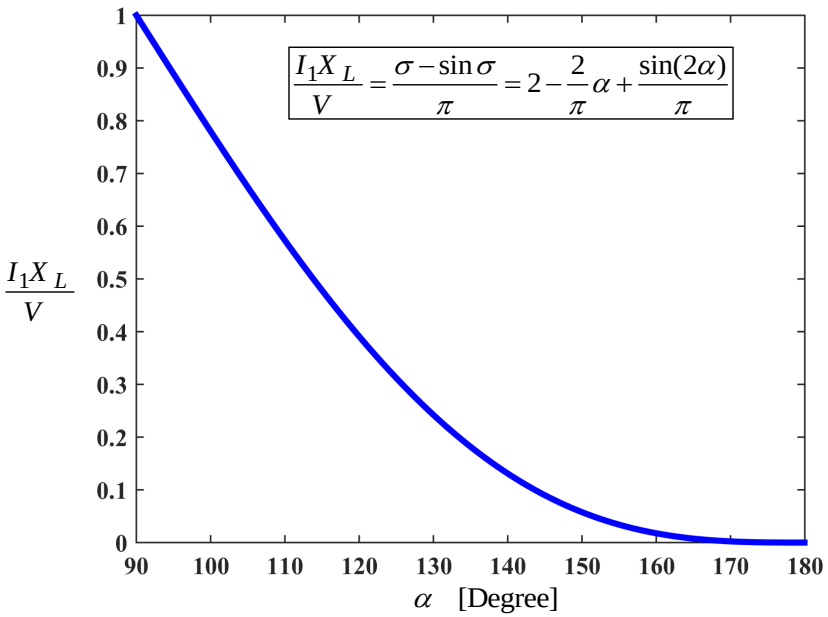
$$I_1(\alpha) = \frac{V}{L\omega}\left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right) \qquad I_{1,\max} = \frac{V}{L\omega}$$

$$= \frac{V}{X_L}\left(\frac{2\pi - 2\alpha - \sin(2\pi - 2\alpha)}{\pi}\right)$$

$$= \frac{V}{X_L}\left(2 - \frac{2}{\pi}\alpha + \frac{1}{\pi}\sin 2\alpha\right)$$

$$B_L(\alpha) = \frac{I_1(\alpha)}{V} = \frac{1}{L\omega}\left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right)$$

$$= \frac{1}{X_L}\left(2 - \frac{2}{\pi}\alpha + \frac{1}{\pi}\sin 2\alpha\right)$$



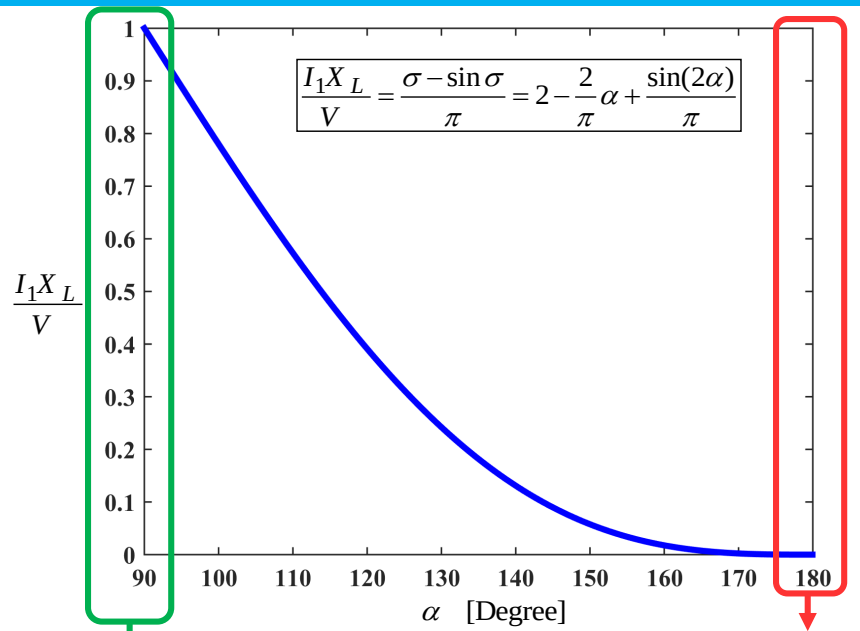
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)

$$B_L(\alpha) = \frac{1}{X_L}\left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right)$$




$$\alpha = 180^\circ \Rightarrow \sigma = 0^\circ \Rightarrow \left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right) = 0 \Rightarrow B_{L,\min} = 0$$

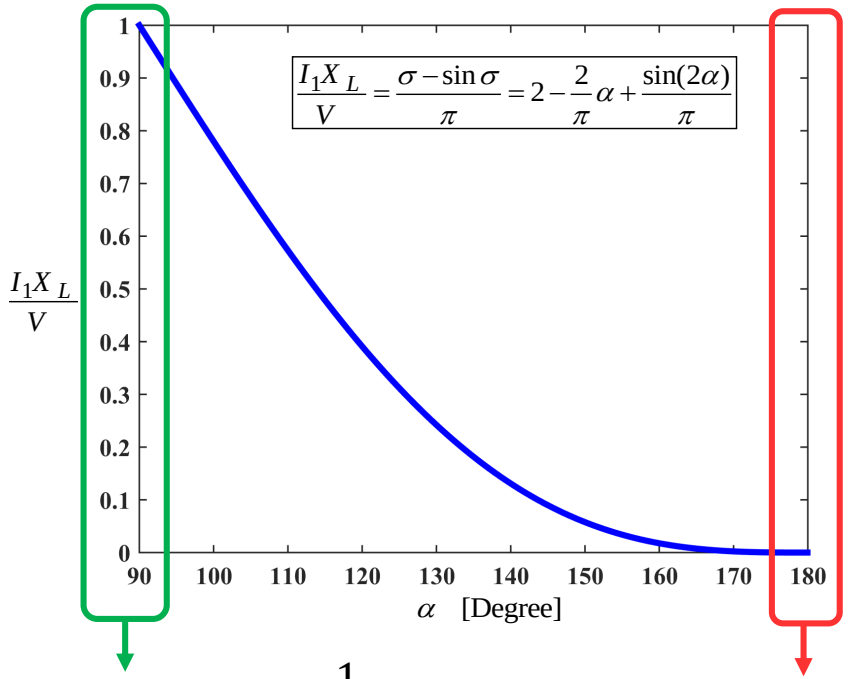
$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \sigma = 180^\circ \Rightarrow \left(\frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi}\right) = 1 \Rightarrow B_{L,\max} = \frac{1}{X_L} = \frac{1}{L\omega}$$

# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

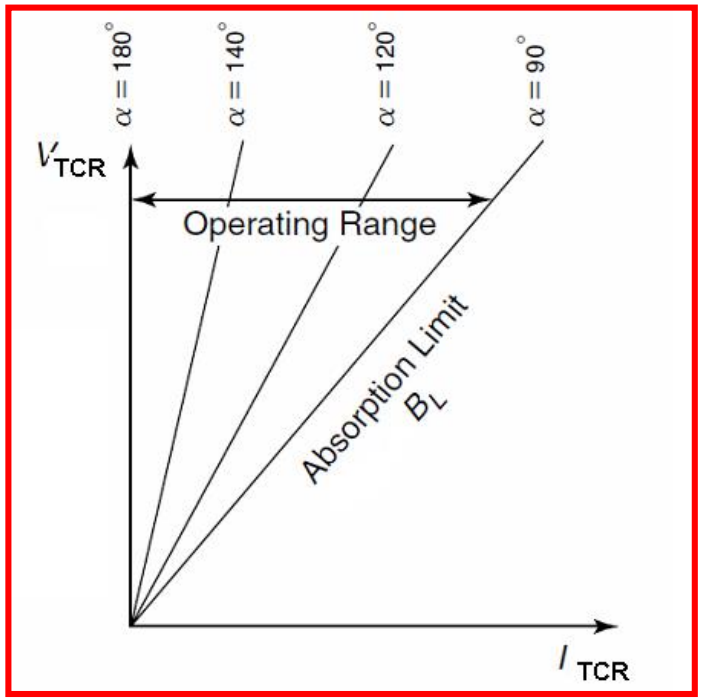
### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

❑ راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)




$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow B_{L,\max} = \frac{1}{X_L}$$

$$\alpha = 180^\circ \Rightarrow B_{L,\min} = 0$$




$$V_{TCR} = X_L I_{TCR} \Leftrightarrow V_{TCR} = \frac{1}{B_L} I_{TCR}$$

# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

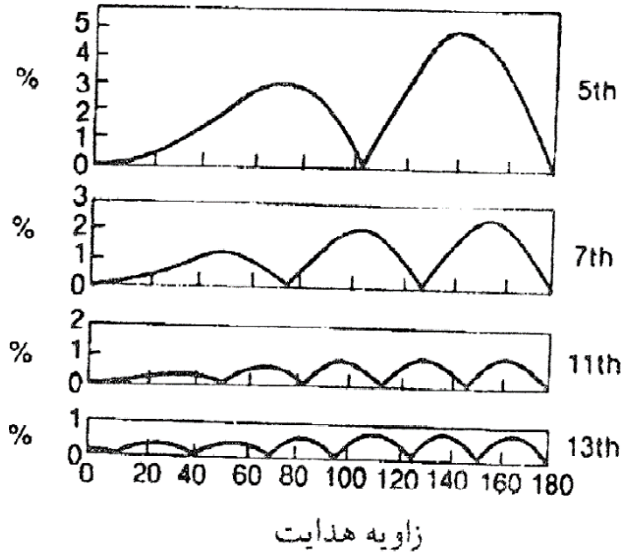
#### ❑ هارمونیک‌های ناشی از راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)

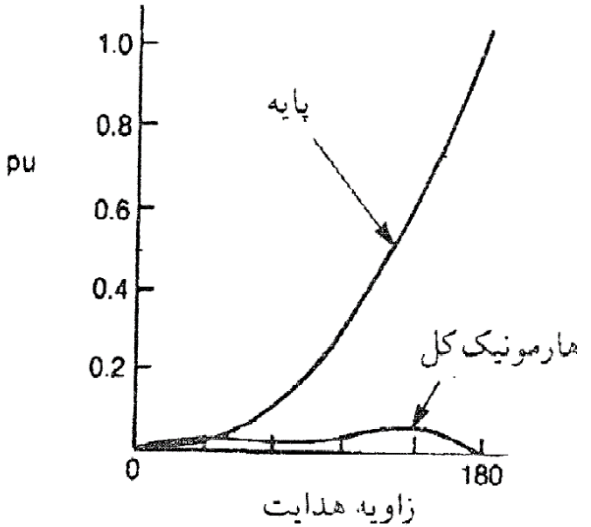
- افزایش زاویه آتش و در نتیجه کاهش زاویه هدایت تریستورها در TCR دو اثر مهم دارد:
  ۱- کاهش تلفات تریستور و راکتور، ۲- افزایش اعوجاجات هارمونیکی جریان خروجی TCR.
- در صورت یکسان بودن زاویه آتش هر دو تریستور، تمامی هارمونیک‌های زوج حذف و تمامی هارمونیک‌های فرد تولید می‌شود. نابرابر بودن زاویه آتش دو تریستور منجر به تولید مؤلفه‌های هارمونیک زوج و مؤلفه dc در جریان TCR می‌گردد. تنش حرارتی نابرابر روی دو تریستور نیز اثر دیگر این پدیده است. با استفاده از فیلتر می‌توان بخش عمده‌ای از جریان‌های هارمونیکی TCR را حذف نمود.

**مقدار مؤثر مؤلفه $n$ام هارمونیک جریان TCR**

$$I_n = \frac{4}{\pi}\frac{V}{X_L}\left(\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)}{2(n-1)} - \frac{\sin(n\alpha)}{n}\cos\alpha\right)$$

$$n = 3,5,7$$



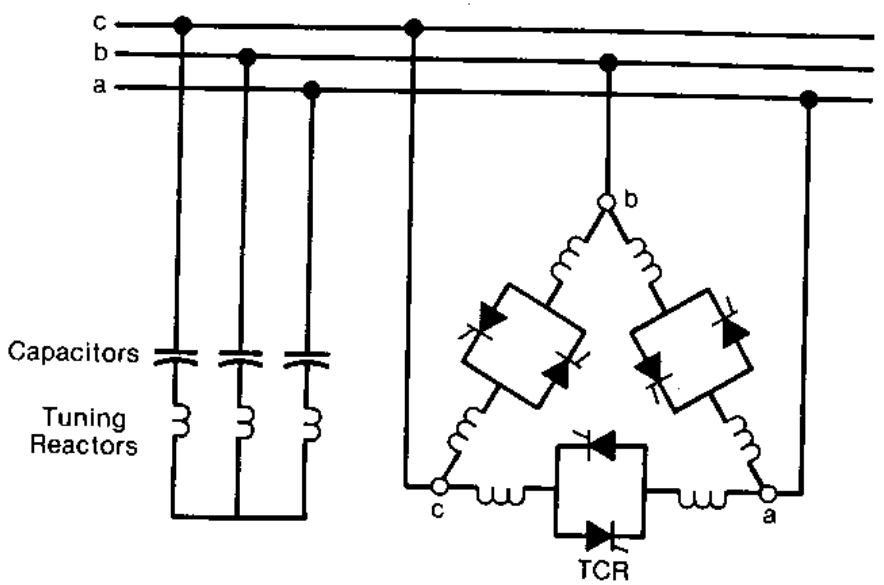
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ هارمونیک‌های ناشی از راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR)

- برای دست‌یابی به ساختار سه‌فاز TCR می‌توان سه ساختار تک‌فاز را بصورت زیر به هم متصل نمود:



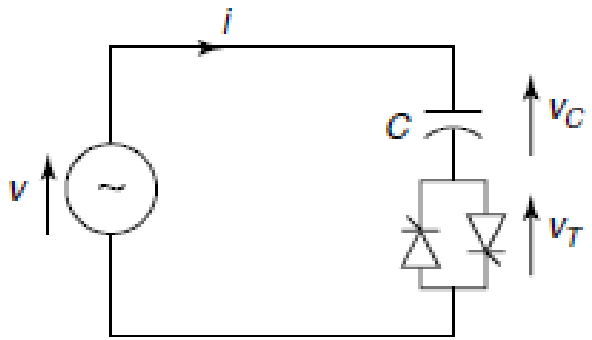
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

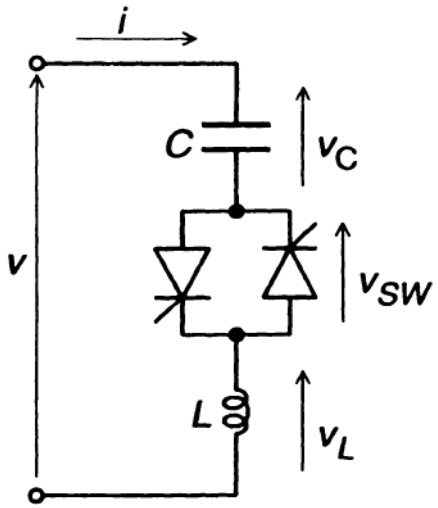
## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ خازن کلیدزنی شده توسط تریستور (TSC)

- **دلیل وجود راکتور:** ۱- این راکتور نسبتاً کوچک، ابتدا برای محدود کردن جریان‌های ضربه‌ای (ناشی از $di/dt$های بسیار بالا) در شرایط کار غیرعادی تریستورها (مثلاً کنترل عملکرد غلطی که باعث کلید خوردن خازن در زمان نامناسب شود، در هنگامی که شرایط کلیدزنی بدون وضعیت گذرا فراهم نباشد) بکار می‌رود. ۲- این راکتور می‌تواند برای جلوگیری از تشدید با امپدانس سیستم در فرکانس‌های به‌خصوصی مورد استفاده قرار گیرد.




$$v = V \sin(\omega t)$$

$$i(\omega t) = \frac{V}{X_C - X_L}\cos(\omega t)$$

**دامنه ولتاژ خازن**

$$V_C = \frac{X_C}{X_C - X_L}V$$

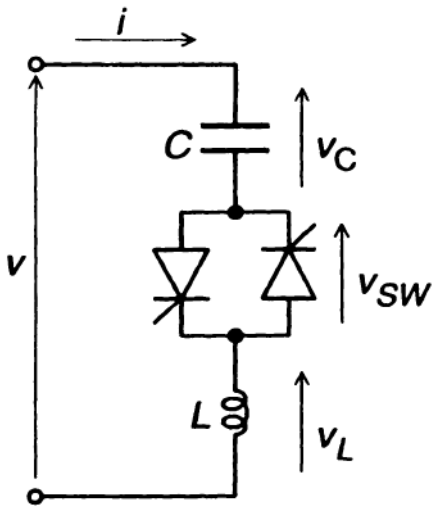
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ خازن کلیدزنی شده توسط تریستور (TSC)

- شاخه TSC می‌تواند در زمان‌های گذر از صفر جریان (بشرط حذف فرمان تحریک از تریستور)، قطع شود. مقدار ولتاژ خازن در زمان‌های گذر از صفر جریان شاخه، در مقدار بیشینه (پیک) قرار دارد. بنابراین، با قطع و وصل خازن در زمان‌های گذر از صفر جریان شاخه TSC، ولتاژ خازن در مقدار پیک باقی مانده و عملکرد شاخه بدون حالت گذرا خواهد بود.



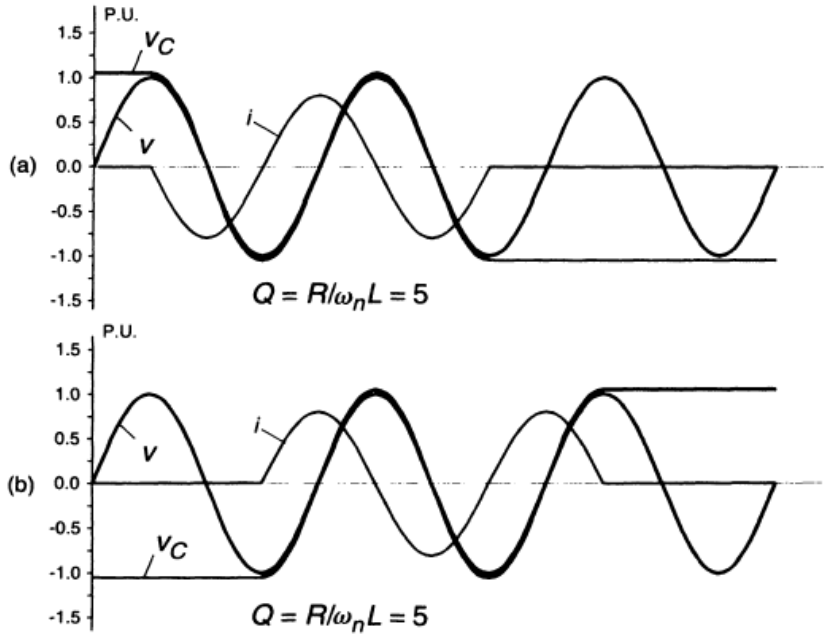




**Figure 5.14** Waveforms illustrating transient-free switching by a thyristor-switched capacitor.

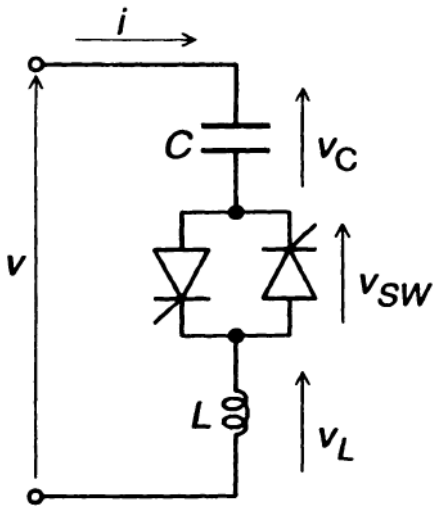
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

#### ❑ خازن کلیدزنی شده توسط تریستور (TSC)

- در صورت نابرابر بودن ولتاژ پسماند خازن با ولتاژ سیستم ac هنگام کلیدزنی شاخه TSC، عملکرد TSC همراه با ایجاد حالات گذرا خواهد بود.



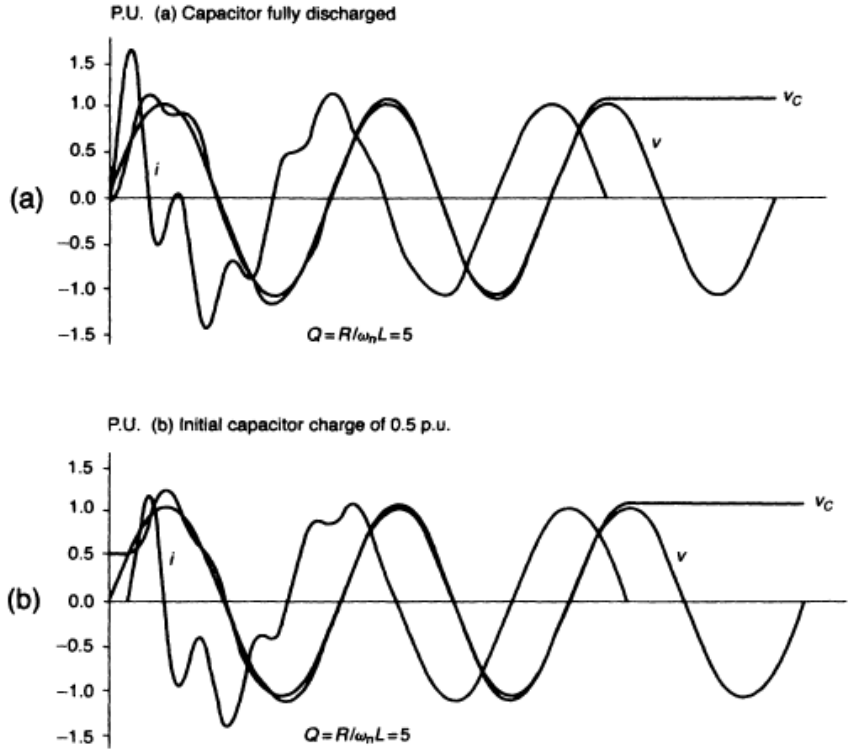




**Figure 5.15** Waveforms illustrating the switching transients with the thyristor-switched capacitor fully (a) or partially discharged (b).

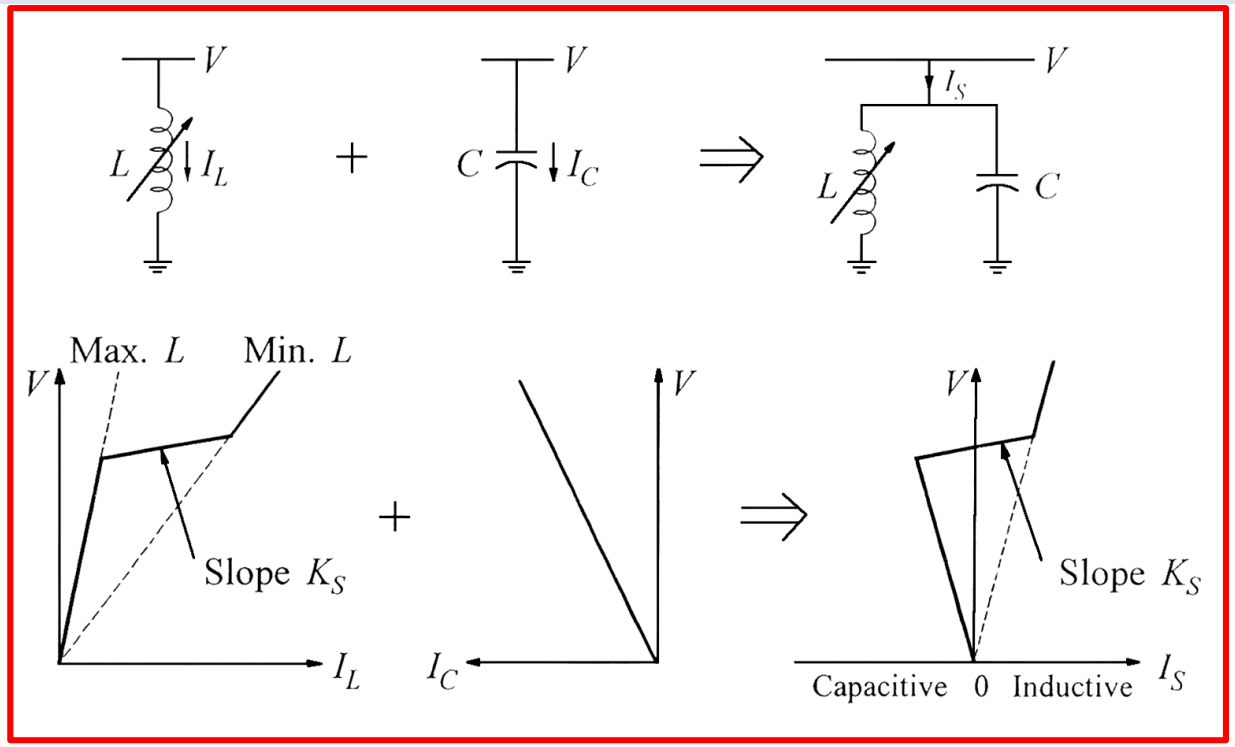
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

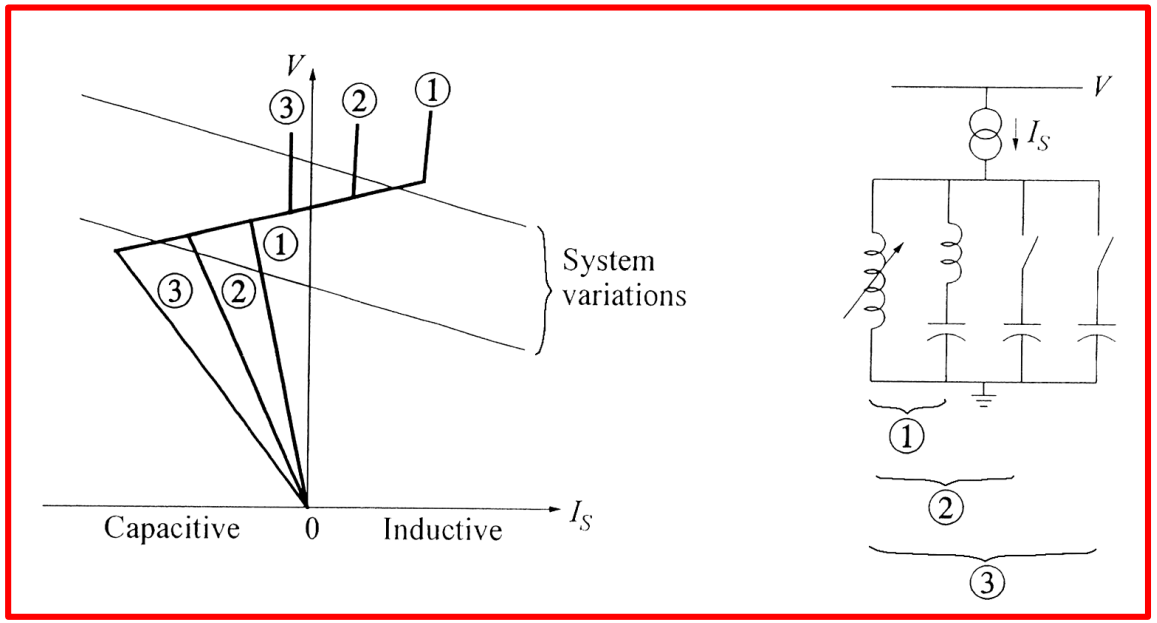
## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

❑ **مشخصه ولتاژ – جریان SVC متشکل از راکتور کنترل‌شده با تریستور (TCR) و خازن ثابت (FC)**

- TCR می‌تواند مانند یک ادمیتانس (سوسپتانس) راکتیو متغیر عمل کند.



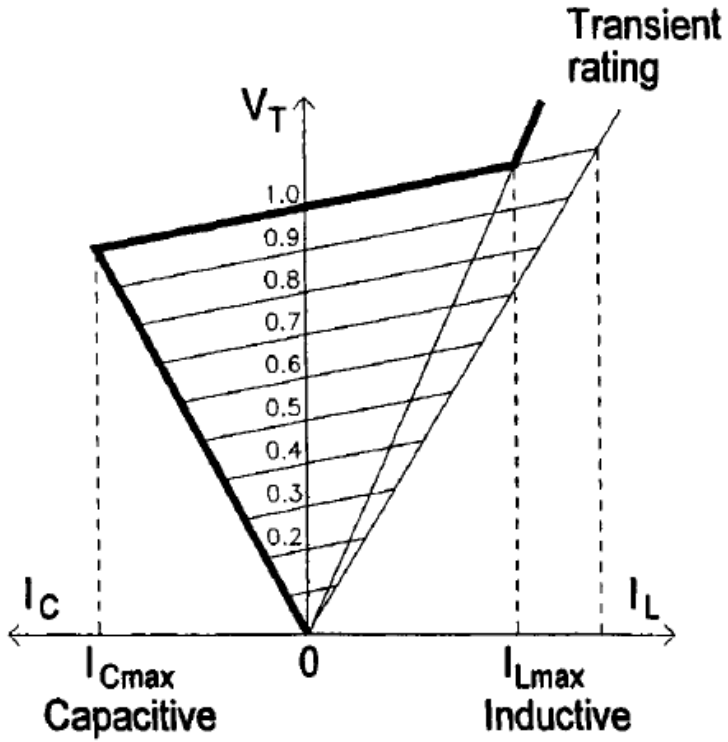



# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- جبران‌گر استاتیکی کنترل‌شده با تریستور، ولتاژ سیستم انتقال را در نقطه مورد نظر تنظیم می‌کند.
- مطابق مشخصه SVC، تنظیم ولتاژ با شیب معلومی حول ولتاژ نامی SVC در محدوده عملکردی آن (که توسط بیشینه جریان‌های سلفی و خازنی تعیین می‌شود)، قابل انجام است.
- بیشینه جریان خازنی و توان راکتیو مربوطه، بطور خطی با ولتاژ سیستم کاهش می‌یابد، زیرا پس از رسیدن به بیشینه خروجی خازنی، SVC در حکم یک خازن ثابت خواهد بود. یعنی با کاهش ولتاژ سیستم، قدرت تقویت ولتاژ جبران‌گرهای معمولی کنترل شده بوسیله تریستور سریعاً کاهش می‌یابد.
- حداکثر ولتاژ قابل اعمال و جریان مربوطه با مقادیر نامی اجزاء TSC (خازن و تریستورها) محدود می‌شوند.
- برای تقریب زدن تغییرات جریان بصورت پیوسته، می‌توان چندین شاخه TSC (که ادمیتانس خازنی را بصورت پله‌ای زیاد می‌کنند) مورد استفاده قرار داد، یا شاخه‌های TSC بایستی با یک TCR تکمیل شوند.

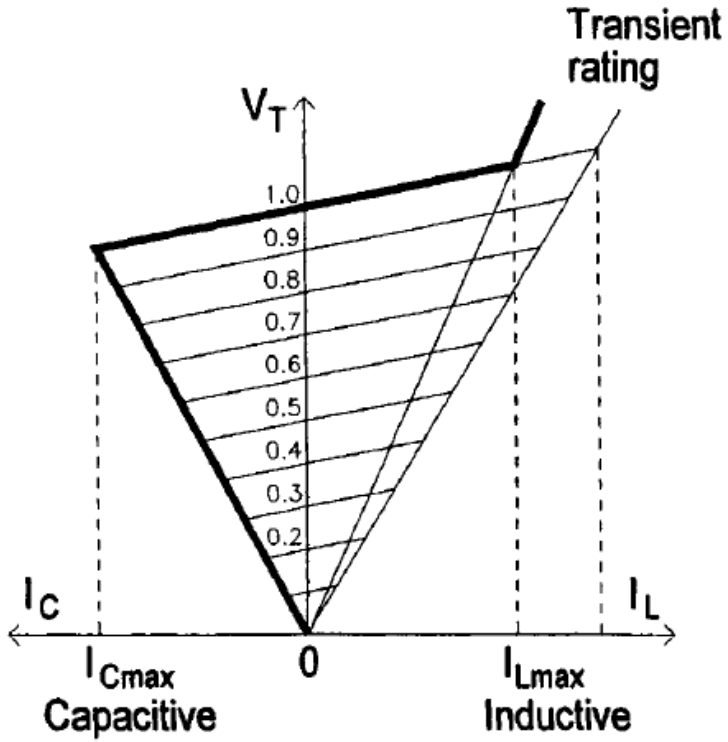


# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- **ولتاژ مرجع (Vref):** در زمان اتصال SVC، ولتاژ نقطه اتصال به سیستم در مقدار مرجع (Vref) تنظیم می‌شود. ولتاژ مرجع می‌تواند بین دو مقدار کمینه (Vref,min) و بیشینه (Vref,max) تنظیم شود. مقادیر نمونه برای بیشینه و کمینه مقدار ولتاژ مرجع عبارتند از ۱/۰۵ و ۰/۹۵ (پریونیت).
- **محدوده خطی کنترل SVC:** محدوده‌ای است که ولتاژ نقطه اتصال SVC بصورت خطی با جریان (یا توان راکتیو) آن تغییر می‌کند.

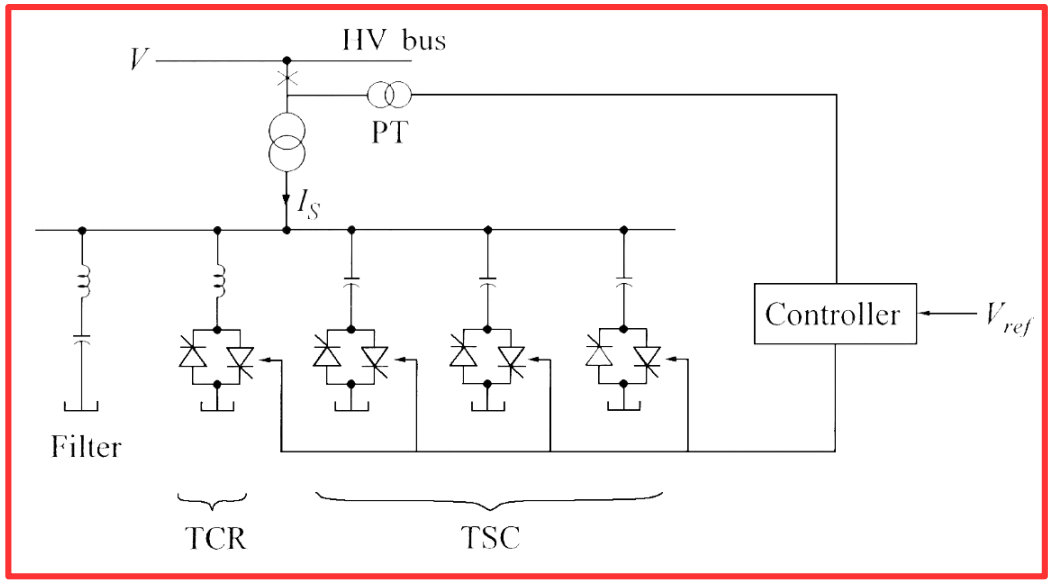


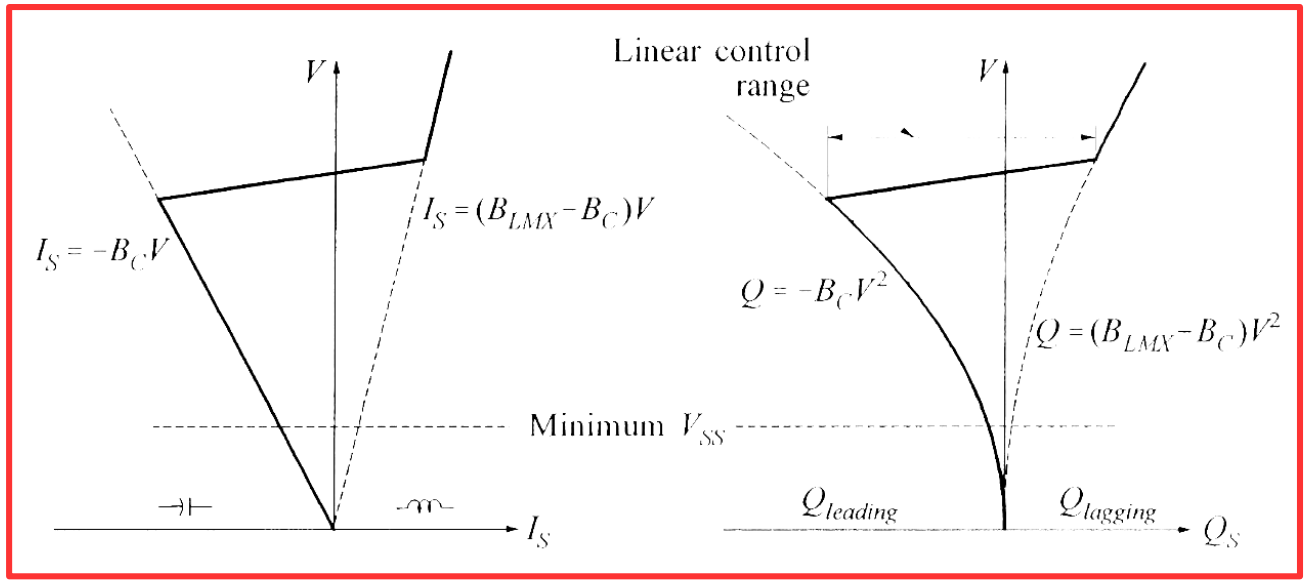
# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- مشخصه ولتاژ-جریان (توان راکتیو) یک سیستم SVC نمونه



# سیستم‌های انتقال جریان متناوب انعطاف پذیر (FACTS)

## ❑ کنترل‌کننده‌های FACTS مبتنی‌بر تریستور

### ❖ جبران‌گر استاتیکی توان راکتیو (Static VAR Compensator (SVC))

- علاوه‌بر تقویت ولتاژ، SVCها برای بهبود پایداری گذرا و دینامیکی (میرایی) سیستم نیز استفاده می‌شوند (مطابق شکل زیر).
- SVC مانند یک جبران‌ساز ایده‌آل وسط خط عمل می‌کند.