مجتمع آموزش عالی گناباد

مجتمع آموزش عالی گناباد

کنترل توان راکتیو

دکتر امین رنجبران

عضو هیات علمی مجتمع آموزش عالی گناباد

فهرست

- مقدمه ای بر کنترل توان راکتیو
- کنترل ولتاژ ژنراتور
- جبران سازی بار
- جبران سازی خطوط انتقال
- جبران سازی موازی SVC و STATCOM
- جبران سازی سری TCSC و SSSC
- پایداری ولتاژ

منابع

- کنترل توان راکتیو در سیستم های الکتریکی تالیف: Miler ترجمه دکتر قاضی
- ادوات FACTS تالیف: Hingorani ترجمه: درافشان
- پایداری ولتاژ تالیف: دکتر همدانی گلشن
- مقالات مرتبط

- نحوه ارزیابی:
- حضور در کلاس و تمرینات ۲ نمره
- پروژه کلاسی: ۶ نمره
- پایان ترم ۱۲ نمره

مقدمه ای بر کنترل توان راکتیو

- دلایل اهمیت روز افزون کنترل توان راکتیو
- ۱- قیمت سوخت: کنترل توان راکتیو ← کاهش تلفات ←بهره برداری بهینه از سیستم قدرت
- ۲- مشکلات حریم خطوط انتقال مانع از توسعه و احداث شبکه های انتقال
- ۳- در بهره برداری نیروگاه های آبی نیروگاه دوردست استفاده شده اند.
- ۴- داشتن تغذیه با کیفیت بالا
- ۵- با توسعه و احداث خطوط انتقال DC : کنترل توان راکتیو در طرف ac مبدلها ضرورت پیدا می کند.

مقدمه ای بر کنترل توان راکتیو

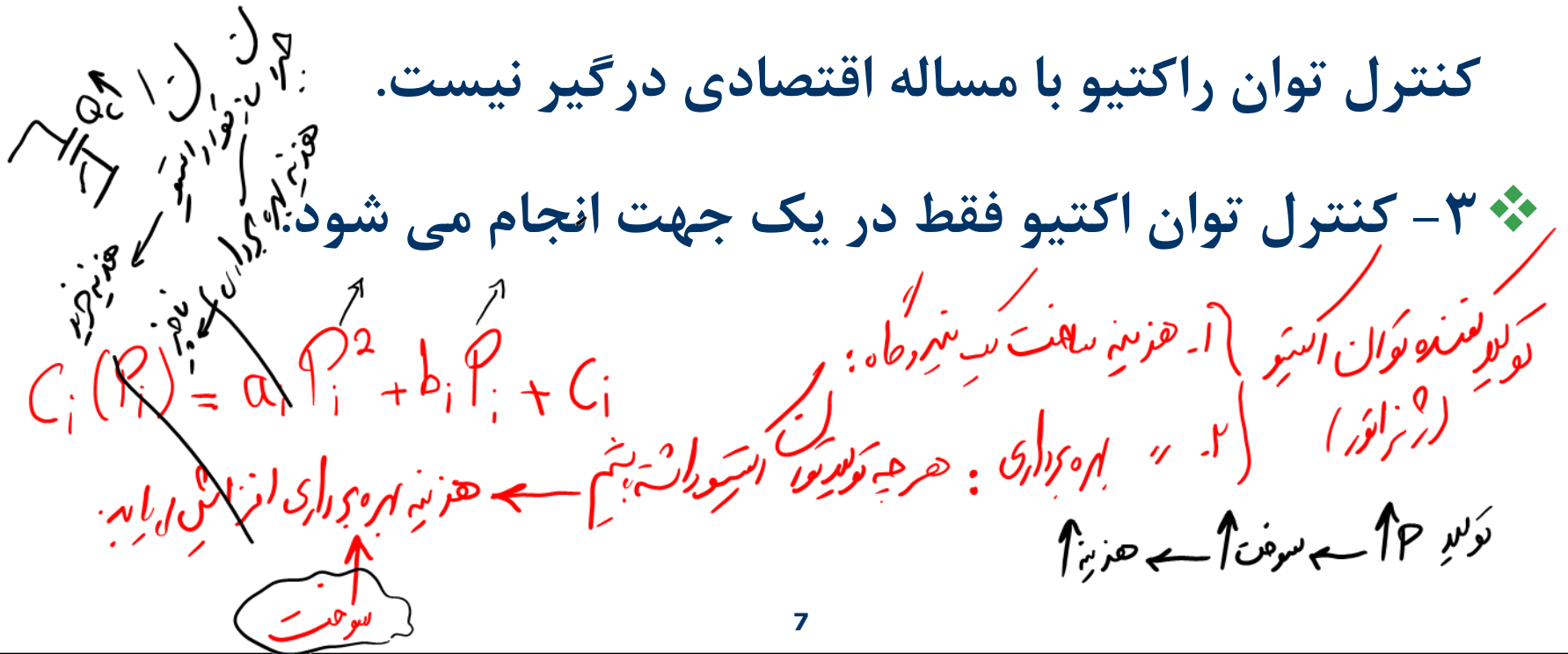
- شرایط یک سیستم قدرت ایده آل
- ۱- ولتاژ ثابت در همه نقاط
- ۲- ضریب توان یک در همه نقاط
- ۳- فرکانس ثابت در سیستم
- ۴- عدم وجود هارمونیک در سیستم
- توان اکتیو و فرکانس با هم کنترل می شود
- توان راکتیو و ولتاژ با هم کنترل می شود

روش های کلی کنترل توان راکتیو

- ۱- تزریق و جذب توان راکتیو : توسط ژنراتورها، خازن ها، راکتورها و ادوات **FACTS** انجام می شود.
- ۲- جابجایی توان راکتیو: از جاهایی که زیاد است و باعث افزایش ولتاژ شده به جاهایی که **Q** کم است تا تعادل برقرار شود.
- ۳- جبران سازی سری

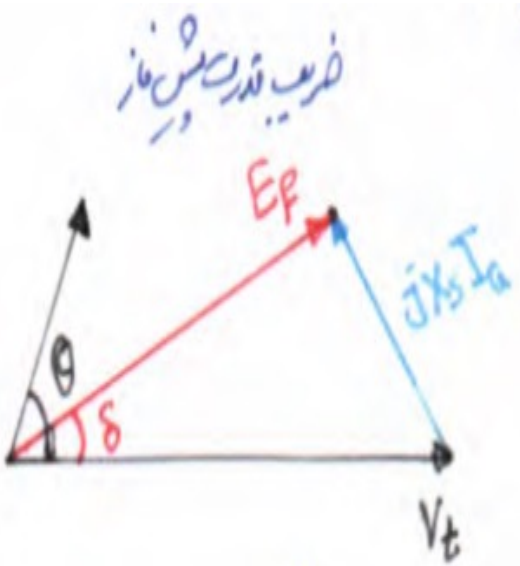
تفاوت کنترل توان اکتیو و کنترل توان راکتیو

- ۱- در کنترل توان اکتیو و فرکانس سعی می کردیم تا حد امکان فرکانس در ۵۰ هرتز حفظ شود
- ۲- کنترل توان اکتیو با مساله اقتصادی ارتباط دارد در حالیکه کنترل توان راکتیو با مساله اقتصادی درگیر نیست.
- ۳- کنترل توان اکتیو فقط در یک جهت انجام می شود:



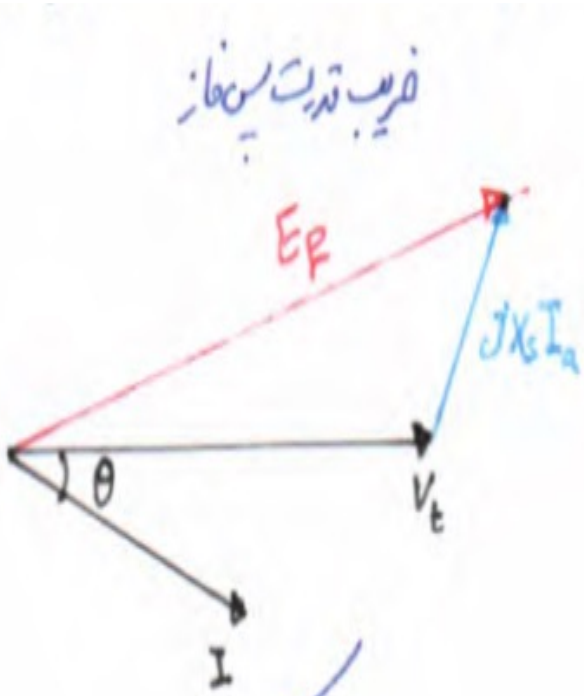
کنترل توان راکتیو ژنراتور

- مدهای کاری ژنراتور :
- ۱- مد کاری نرمال
- ۲- مد کاری فوق تحریک
- ۳- مد کاری زیر تحریک



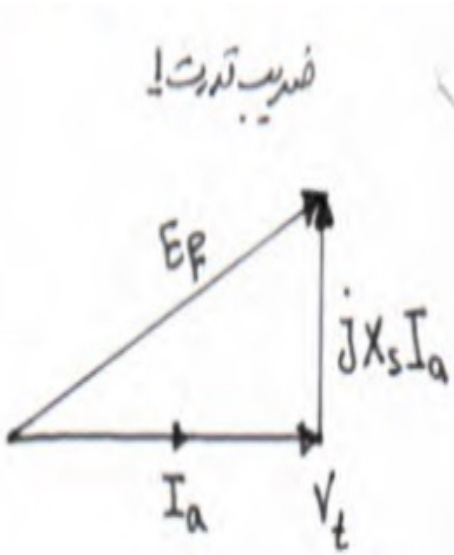
زیر تحریک

Under - Excited



فوق تحریک

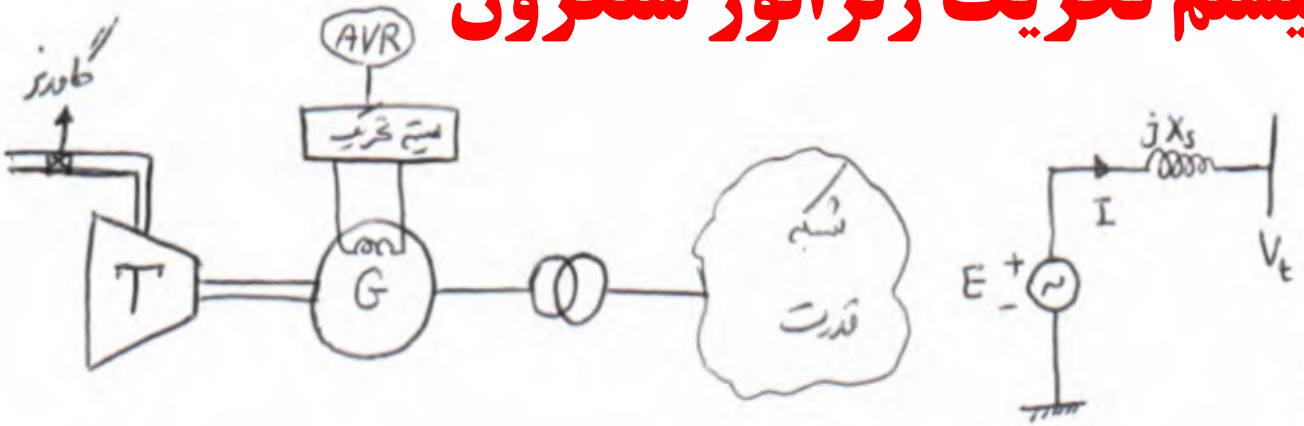
over - Excited



تحریک عادی

Normal Excitation

سیستم تحریک ژنراتور سنکرون



سیستم تحریک ژنراتور سنکرون

$$P_e = \frac{E.V_t}{X_s}\sin\delta$$

$$Q_e = \frac{E.V_t}{X_s}\cos\delta - \frac{V_t^2}{X_s}$$

$$E = V_t + jX_s I$$

$$Q_e = \frac{E.V_t\cos\delta - V_t^2}{X_s} \Rightarrow \begin{cases} EV_t\cos\delta = X_s Q_e + V_t^2 \\ EV_t\sin\delta = P_e X_s \end{cases} \Rightarrow E^2V_t^2 = P_e^2X_s^2 + (X_sQ_e + V_t^2)^2$$

$$P_e = \frac{E.V_t}{X_s}\sin\delta \Rightarrow$$

$$\Rightarrow E = \frac{1}{V_t}\sqrt{X_s^2P_e^2 + (X_sQ_e + V_t^2)^2} \Rightarrow Q_e = \left[\sqrt{E^2V_t^2 - X_s^2P_e^2} - V_t^2\right]/X_s$$

مثال: برای یک ژنراتور متصل به شبکه با مشخصات داده شده، چنانچه این ژنراتور توان اکتیو 0.8^{Pu} تولید نماید مطلوبست توان راکتیو و تنش داخلی و زاویه بار ژنراتور برای حالت های زیر

$X_s = 1$ pu $\qquad V_t = 1$ pu

الف) در حالت تحریک عادی یا نرمال

ب) حالت فوق تحریک به میزان ۲۰٪

ج) حالت زیر تحریک " " "

$$E = \frac{1}{V_t}\sqrt{X_s^2 P_e^2 + (X_s Q_e + V_t)^2}$$

الف) $Q_e = 0 \Rightarrow E = \frac{1}{1.0}\sqrt{1^2 \times 0.8^2 + (1 \times 0 + 1)^2} = \sqrt{1.64} = 1.28$ pu

ب) $E^{ov} = 1.2 \times E_0 = 1.2 \times 1.28 = 1.54 \Rightarrow Q_e = \left[\sqrt{1.54^2 \times 1^2 - 1 \times 0.8^2} - 1^2\right] / 1 = 0.32$

$$0.8 = P_e = \frac{E \cdot V_t}{X_s}\sin\delta_0 \Rightarrow \delta_0 = \sin^{-1}\frac{0.8}{1.28} = 36.68$$

$$0.8 = P_e = \frac{E^{ov} \cdot V_t}{X_s}\sin\delta \Rightarrow \delta = \sin^{-1}\frac{0.8}{1.54} = 31.5$$

ج) $E^{un} = 0.8\, E_0 = 1.024$ pu $\Rightarrow Q_e = \left[\sqrt{1.024^2 \times 1 - 1 \times 0.8^2} - 1^2\right] / 1.0 = -0.36$ pu

$$0.8 = P_e = \frac{1.024 \times 1}{1}\sin\delta \Rightarrow \delta = \sin^{-1}\frac{0.8}{1.024} = 51.37^\circ$$

مثال ۱: ژنراتور سنکرون سه‌فاز 50 MVA، 30 kV، 50 Hz دارای راکتانس سنکرون 9Ω دهقازی باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت ناحی را در ضریب قدرت 0.8 پس‌فاز در ولتاژ نامی پایانه خود، تحویل می‌دهد.

الف) ولتاژ تحریک دهقاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

ب) با ثابت نگه داشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آنقدر کاهش یافته است، ژنراتور 25 MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را بدست آورید.

ج) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار پایدار را که می‌تواند قبل از خروج از سنکرون تحویل دهد چقدر است؟ همچنین جریان آرمیچر این توان حداکثر را بیدا کنید؟

مثال ۲: ژنراتور مثال ۱ قدرت 90 MW را در ولتاژ پایانه 30 kV تحویل می‌دهد. زاویه توان، جریان آرمیچر و ضریب قدرت را وقتی، جریان میدان ژنراتور تنظیم شود بحساب نمائید؟

الف) ولتاژ تحریک = 79.2 درصد مقدار تعیین شده در مثال ۱ کاهش یابد؟

ب) " " = 59.27 درصد مقدار تعیین شده در مثال ۱ " "؟

ج) " " = وای در کمتر از آن ژنراتور از شبکه برق خارج می‌شود در ابتدا حدس بزنید؟

جبران سازی بار

- مدیریت توان راکتیو به منظور کیفیت تغذیه در سیستم های قدرت AC انجام می شود
- اهداف جبران بار
- ۱- اصلاح ضریب قدرت
- ۲- بهبود تنظیم ولتاژ
- ۳- متعادل کردن بار
- جبران کننده ایده آل
- ۱- ضریت قدرت =۱
- ۲- تغییر ولتاژ حذف یا ولتاژ را در محدوده حفظ کند
- ۳- جریان های سه فاز و یا ولتاژهای سه فاز را متعادل کند.

- اغلب مسئولیت اصلاح ضریب قدرت و متعادل کردن جریان بار را مشتریان انجام می دهند.
- بارهای صنعتی بزرگ با ضریب قدرت کمتر از ۰/۸ اصلاح آن مقرون به صرفه خواهد بود.
- عملکرد نامتعادل منجر به جریان های توالی منفی و صفر می شود که سبب
- ۱- ایجاد تلفات اضافی در موتورها و مولدها
- ۲- گشتاور نوسانی در ماشین های AC
- ۳- افزایش ریپل در یکسوکننده ها
- ۴- عملکرد غلط انواع تجهیزات
- ۵- اشباع ترانسفورماتور
- ۶- جریان اضافی سیم زمین

اصلاح ضریب توان

- در خطوط انتقال بلند ضریب قدرت را نمی گذراند از ۰/۹۵ تا ۰/۹ کمتر شود.
- در شبکه ضریب قدرت بین ۰/۷۵ تا ۰/۹۵ می باشد.

تنظیم ولتاژ

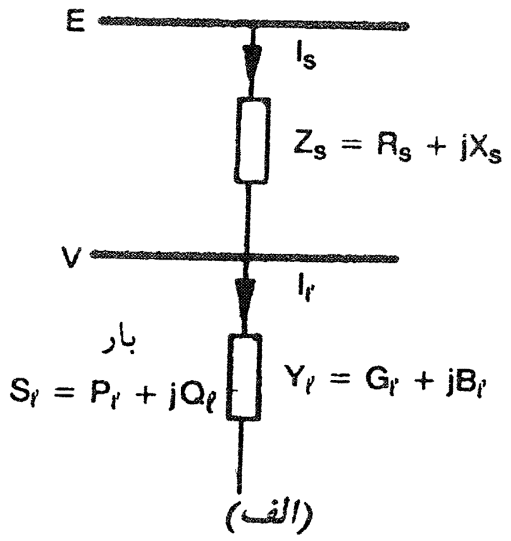
❖ اگر سیستم تغذیه به وسیله مدار معادل تونن تک فاز نشان داده شود.

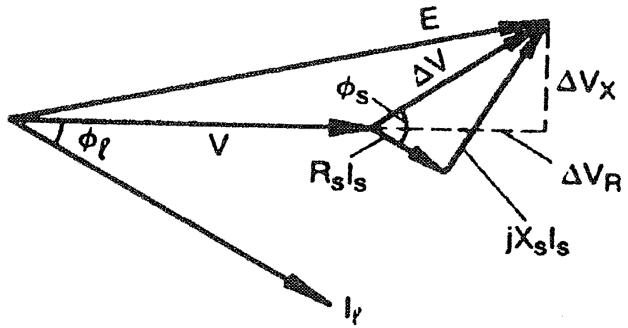
$$\Delta V = (R_S + j X_S)\left[\frac{P_\ell - jQ_\ell}{V}\right]$$

$$= \frac{R_S P_\ell + X_S Q_\ell}{V} + j\frac{X_S P_\ell - R_S Q_\ell}{V} = \Delta V_R + j\Delta V_X$$

$$|E| = |V|$$

$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_S P_\ell + X_S Q_S}{V}\right]^2 + \left[\frac{X_S P_\ell - R_S Q_S}{V}\right]^2$$





تعیین مقدار توان راکتیو جبران به منظور رسیدن به ولتاژ ترمینال معین

مساله عبارتست از پیدا کردن Q_s از معادله ۱۳ طوریکه $E = V$ گردد. آنگاه $Q_\gamma = Q_s - Q_\ell$.

با مرتب کردن معادله ۱۳ داریم

$$aQ_s^2 + bQ_s + c = 0$$

$$|E|^2 = \left[V + \frac{R_S P_\ell + X_S Q_S}{V} \right]^2 + \left[\frac{X_S P_\ell - R_S Q_S}{V} \right]^2$$

$$a = R_s^2 + X_s^2$$

$$b = 2V^2 X_s$$

$$c = (V^2 + R_s P_\ell)^2 + X_s^2 P_\ell^2 - E^2 V^2$$

بنابراین

$$Q_s = \frac{-b \pm \sqrt{b2 - 4ac}}{2a}$$

محاسبه مقدار ولتاژ در صورت معلوم بودن توان واقعی و راکتیو

$$\Delta V = \frac{PR_s + QX_s}{V} + j\frac{PX_s - QR_s}{V} = \frac{A}{V} + j\frac{B}{V}$$

$$E^2 = \left[V + \frac{A}{V}\right]^2 + \left[\frac{B}{V}\right]^2$$

$$= V^2 + 2A + \frac{A^2 + B^2}{V^2}$$

که می توان آن را در یک معادله ساده درجه ۲ برحسب V^2 مرتب کرد.

مثال

سیستم تغذیه‌ای را در نظر بگیرید که در ولتاژ خط - نول ۱۰ kV و با سطح اتصال کوتاه ۲۵۰MVA و نسبت R_s : X_s برابر ۵، یک بار اندوکتیو با اتصال - ستاره و توان میانگین ۲۵ MW و توان راکتیو متغیر صفر تا ۵۰ MVAr، را تغذیه می‌نماید، تمامی کمیت‌ها برای یک‌فاز بیان شده‌اند.

امپدانس تونن سیستم تغذیه برابراست با $Z_s=E_s^2/S_{sc}=(10kV)^2/250MVA=0/4Ohm/phase$.

با ۵ = $tg\,\phi_{sc}$ داریم $\phi_{sc} = 78/69°$، طوری که $X_s = Z_s \sin\phi_{sc} = 0/3922Ohm$ و

$R_s=0/0784Ohm$

$$\Delta V = 3/1806 + j0/8678kV \text{ و } V = 6/7822\ kV(l-n)$$

حال جریان خط در بار کامل و ضریب توان پس‌فاز ۰/۴۴۷ از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$I = (P_\ell - jQ_\ell)/V = 3/686 - j\,7/372 = 8/242 \angle -63/44°kA$$

جبران برای ولتاژ ثابت

پیرو روش ارائه شده در قسمت ب ضمیمه، با ولتاژ $V = ۱۰$ داریم

$$a = R_s^۲ + X_s^۲ = ۰/۱۶۰$$

$$b = ۲V^۲X_s = ۲ \times ۱۰^۲ \times ۰/۳۹۲۲ = ۷۸/۴۴$$

$$c = (V^۲ + R_sP_\ell)^۲ + X_s^۲P_\ell^۲ - E^۲V^۲$$

$$= (۱۰^۲ + ۰/۰۷۸۴ \times ۲۵)^۲ + (۰/۳۹۲۲ \times ۲۵)^۲ - ۱۰^۲ \times ۱۰^۲$$

$$= ۴۹۱/۹۸$$

بنابراین

$$Q_s = \frac{-۷۸/۴۴ \pm \sqrt{۷۸/۴۴^۲ - ۴ \times ۰/۱۶۰ \times ۴۹۱/۹۸}}{۲ \times ۰/۱۶}$$

$$= -۶/۳۵ \text{ یا } -۴۸۴ \text{ MVAr}$$

تنها جواب اول، ولتاژ $E = ۱۰\text{kV}$ را در معادله ۱۳ نتیجه می‌دهد، طوری که

$$\Delta V_R = \frac{R_sP_\ell + X_sQ_s}{V} = \frac{۰/۰۷۸۴ \times ۲۵ + ۰/۳۹۲۲ \times (-۶/۳۵)}{۱۰} = -۰/۰۵۳۲ \text{ kV}$$

$$\Delta V_X = \frac{X_sP_\ell + R_sQ_s}{V} = \frac{۰/۳۹۲۲ \times ۲۵ - ۰/۰۷۸۴ \times (-۶/۳۵)}{۱۰} = ۱/۰۳۰ \text{ kV}$$

جریان کل در خطوط تغذیه برابر است $(P_\ell - jQ_s)/V = ۲/۵۰ + j\ ۰/۶۳۵ \text{ kA}$ و جریان جبران‌کننده به وسیله $-jQ_\gamma/V = +j\ ۵/۶۳۵ \text{ kA}$ با $Q_\gamma = -۵۶/۳۵ \text{ MVAr}$ بدست می‌آید.

فرمول تقریبی برای تنظیم ولتاژ

❖ اگر سیستم در باس بار اتصال کوتاه گردد

$$S_{sc} = P_{sc} + jQ_{sc} = EI_{sc}^{*} = \frac{E^{2}}{Z_{sc}}$$

که در آن $Z_{sc} = R_s + jX_s$ و I_{sc} جریان اتصال کوتاه است. چون $|Z_{sc}| = |Z^{*}_{sc}|$ ، داریم

$$R_s = |Z_{sc}| \cos\phi_{sc} = \frac{E^{2}}{S_{sc}} \cos\phi_{sc}$$

$$X_s = |Z_{sc}| \sin\phi_{sc} = \frac{E^{2}}{S_{sc}} \sin\phi_{sc}$$

$$\operatorname{tg}\phi_{sc} = \frac{X_s}{R_s}$$

یعنی نسبت $X : R$ سیستم تغذیه. با جایگزینی X_s و R_s در معادله ۱۲ و نرمالیزه کردن ΔV_R و ΔV_X به V و با فرض $E/V \approx 1$ خواهیم داشت.

$$\frac{\Delta V_R}{V} \cong \frac{1}{S_{sc}} [P_\ell \cos\phi_{sc} + Q_\ell \sin\phi_{sc}] \qquad \frac{\Delta V_X}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [P_\ell \sin\phi_{sc} + Q_\ell \cos\phi_{sc}]$$

اغلب از ΔV_X به دلیل آنکه تنها منجر به تغییر فاز در ولتاژ تغذیه (نسبت به E) می‌گردد صرفنظر می‌شود، قسمت اعظم تغییر در مقدار ولتاژ، به وسیله ΔV_R ایجاد می‌شود.

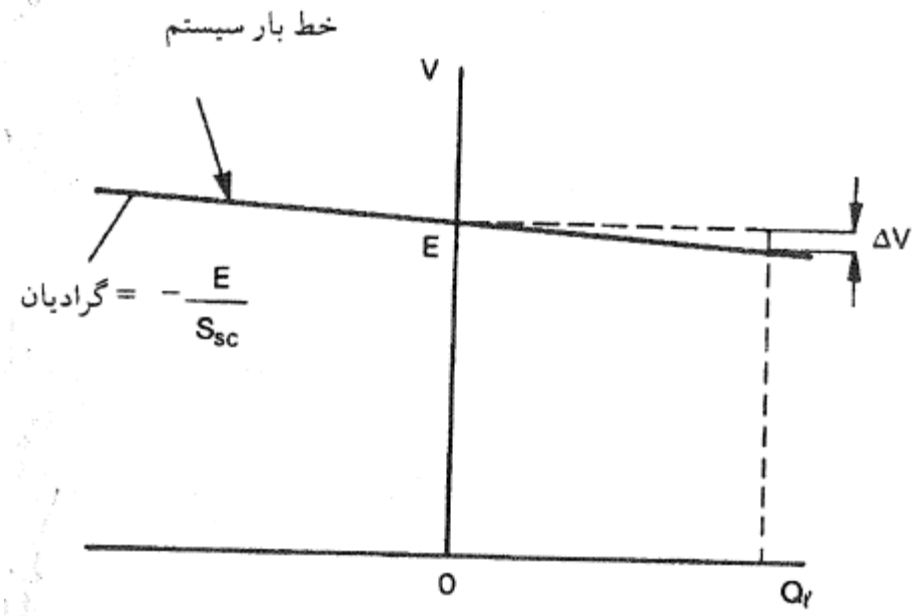
$$\frac{\Delta V_R}{V} = \frac{1}{S_{sc}} [\Delta P_\ell \cos \phi_{sc} + \Delta Q_\ell \sin \phi_{sc}]$$

اگر مقاومت سیستم تغذیه R_s خیلی کوچکتر از راکتانس X_s باشد می توان از تغییرات ولتاژ ناشی از توان واقعی ΔP_ℓ صرفنظر کرد بنابراین تنظیم ولتاژ از معادله زیر به دست می آید.

$$\frac{\Delta V}{V} \cong \frac{\Delta V_R}{V} = \frac{\Delta Q_\ell}{S_{sc}} \sin \phi_{sc} \cong \frac{\Delta Q_\ell}{S_{sc}}$$

$$V \cong \frac{E}{1 + Q_\ell / S_{sc}} \cong E \left[1 - \frac{Q_\ell}{S_{sc}} \right]$$

در صورتی که $S_{sc} >> Q_\ell$ باشد.



متعادل کردن بارهای نامتقارن و اصلاح ضریب توان

شرط تقارن: ۱- اندازه فازها برابر
۲- اختلاف زاویه ۱۲۰°

عدم تقارن ← باعث بوجود آمدن جریان های توالی منفی و صفر می شود.

متقارن ⟶ $I_a = I_a^1$ توالی مثبت

در حالت نامتقارن ⇐ $I_a = I_a^1 + I_a^2 + I_a^0$

عوارض ← ① افزایش دامنه جریان ← تلفات بیشتر

$P_{Loss} = 3RI_1I_1^2$ ⟹ گرم شدن تجهیزات

$VUF = \frac{\text{دامنه جریان توالی منفی}}{\text{" " " " مثبت}} \times 100$

شاخص VUF/

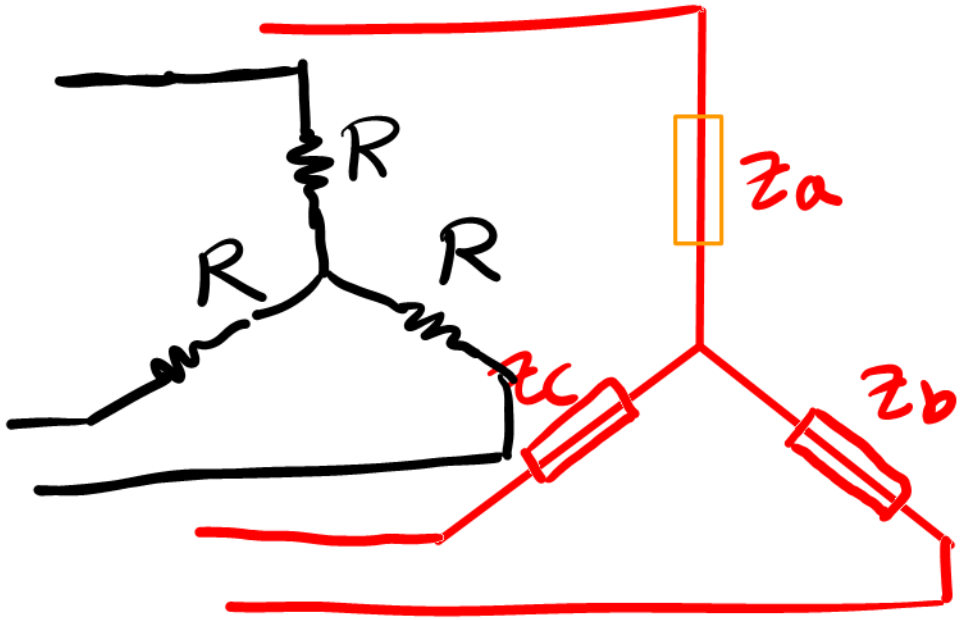
if $\mathcal{Z}_a \neq \mathcal{Z}_b \neq \mathcal{Z}_c$

⇓

عدم متعادل بودن بار

⇓

عدم تعادل



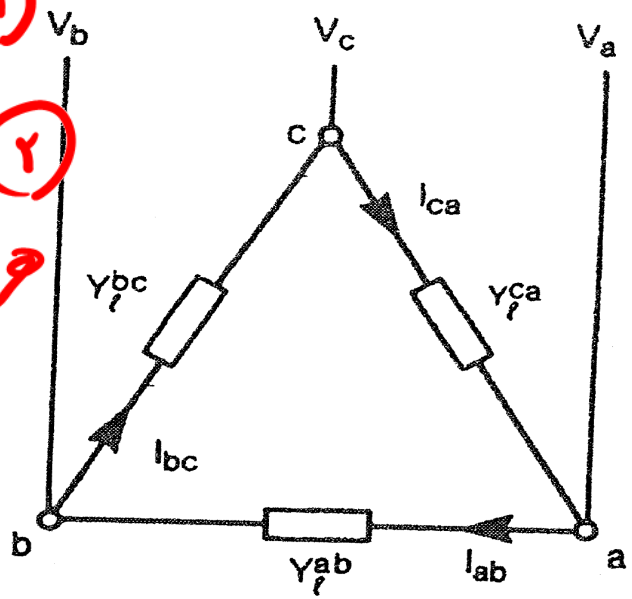
برای جبران سازی ← سه بار را متعادل کنند.

و از جبران توان راکتیو مصرفی بار را نیز جبران کنند

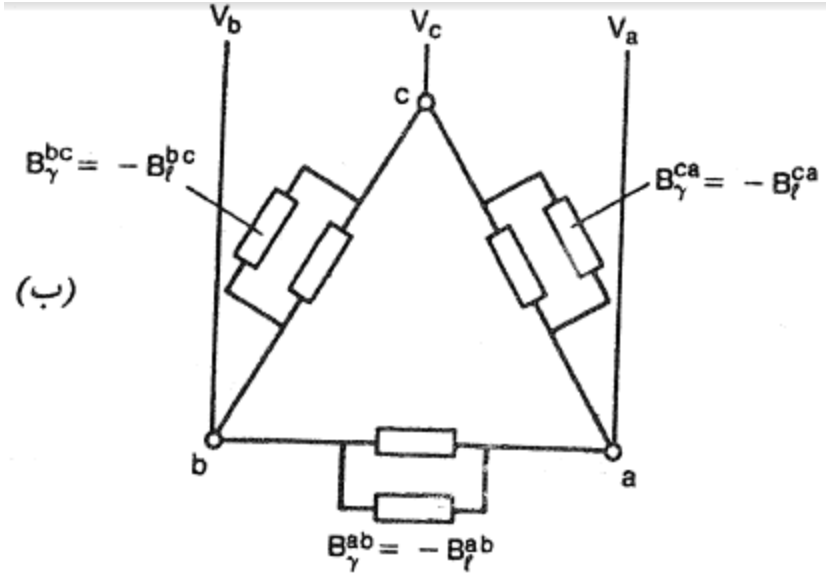
ایده آل ← $Q_L = 0$ و خودش مصرف توان

اکتیو نداشته باشه. $P_R = 0$

شبکه جبران کننده ادمیتانسی ایده آل



(الف)

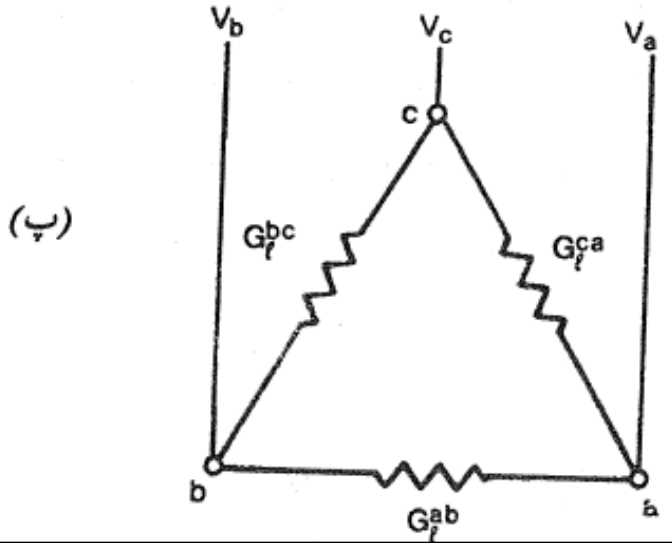


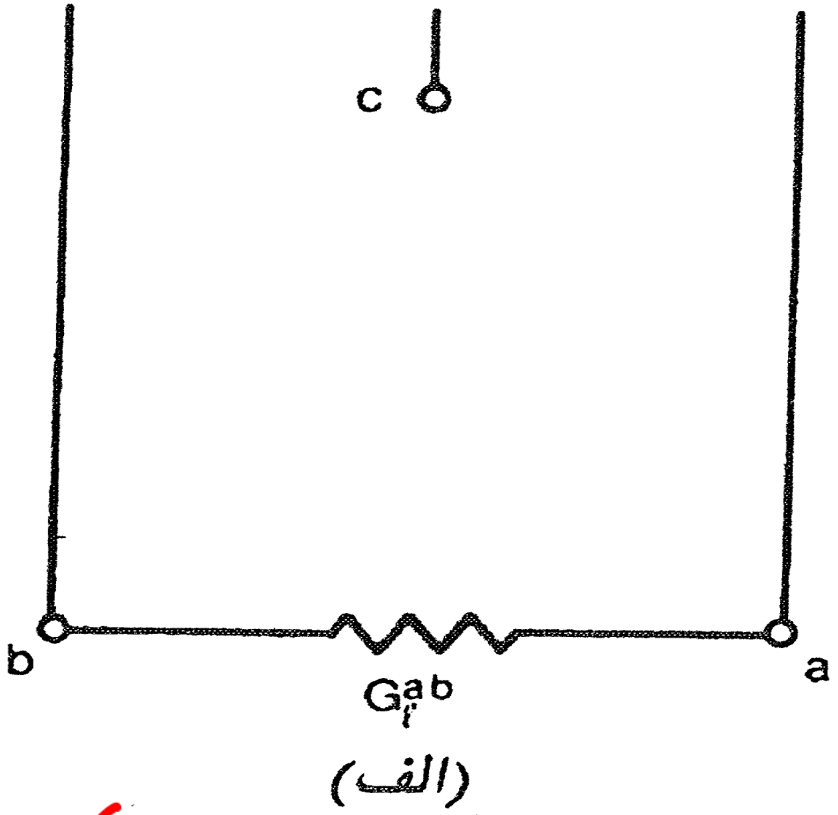
$$Y_\ell^{ab} = G_\ell^{ab} + j\, B_\ell^{ab}$$

$$B_\gamma^{ab} = - B_\ell^{ab}$$

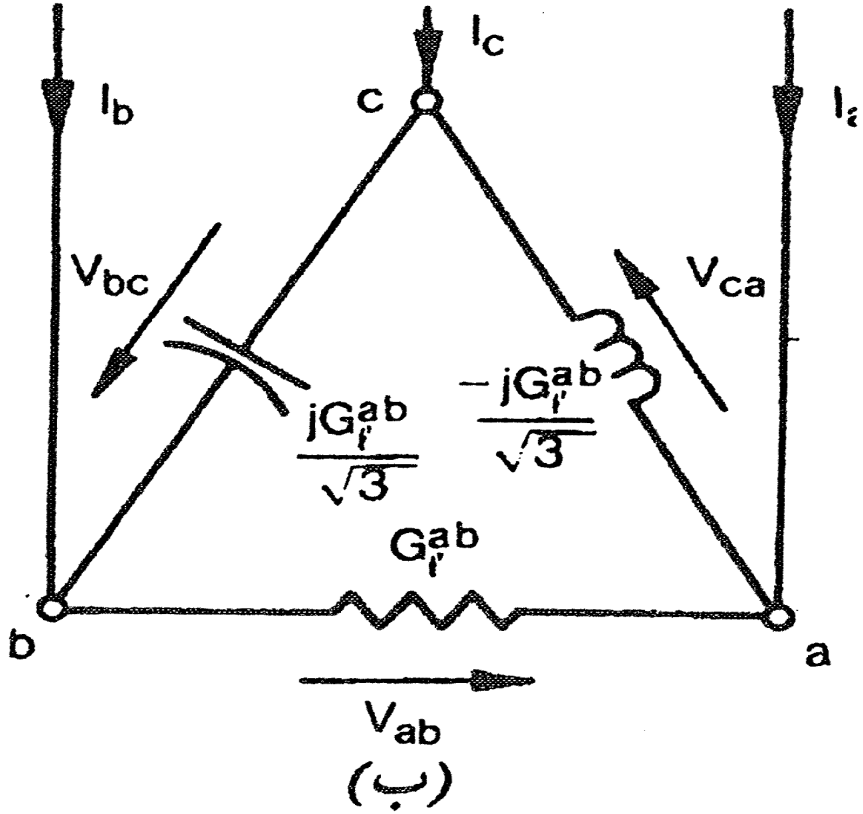
$$B_\gamma^{bc} = \frac{G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}}$$

$$B_\gamma^{ca} = \frac{-G_\ell^{ab}}{\sqrt{3}}$$





(الف)

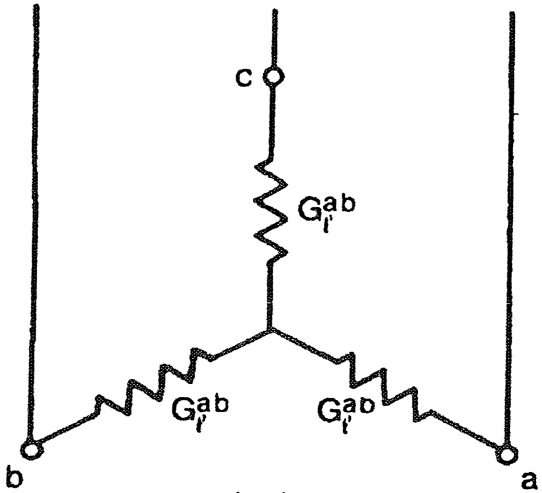


(ب)

$$B_\gamma^{ab} = -B_\ell^{ab} + (G_\ell^{ca} - G_\ell^{bc}) / \sqrt{3}$$

$$B_\gamma^{bc} = -B_\ell^{bc} + (G_\ell^{ab} - G_\ell^{ca}) / \sqrt{3}$$

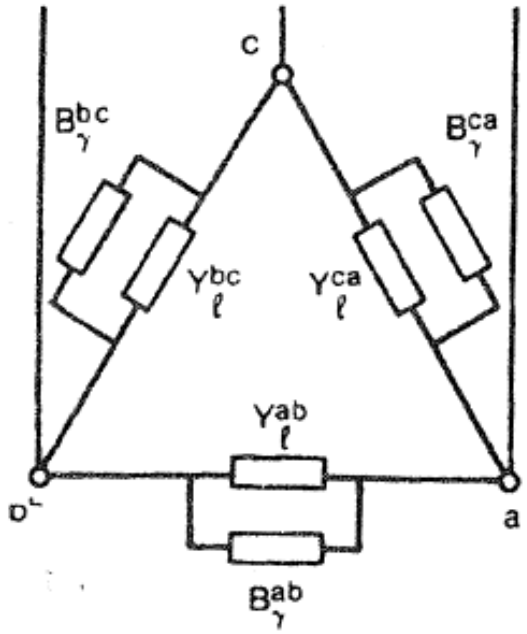
$$B_\gamma^{ca} = -B_\ell^{ca} + (G_\ell^{bc} - G_\ell^{ab}) / \sqrt{3}$$



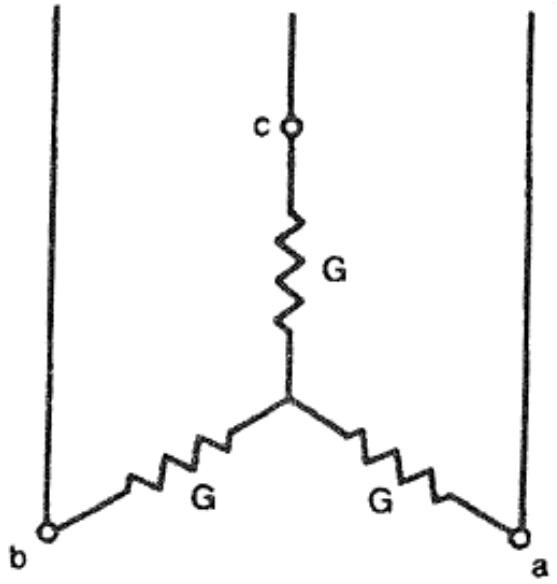
(ب)

۱ـ هر بار سه‌فاز زمین‌نشده خطی نامتعادل، را می‌توان به کمک یک شبکه جبران‌کننده ایده‌ال که به موازات بار قرار می‌گیرد، به بار سه‌فاز حقیقی متعادل تبدیل کرد بدون آنکه در توان حقیقی مبادله شده بین بار و سیستم تغذیه تغییری پیش آید.

۲ـ شبکه جبران‌کننده ایده‌ال، راکتیو صرف خواهد بود.



(الف)



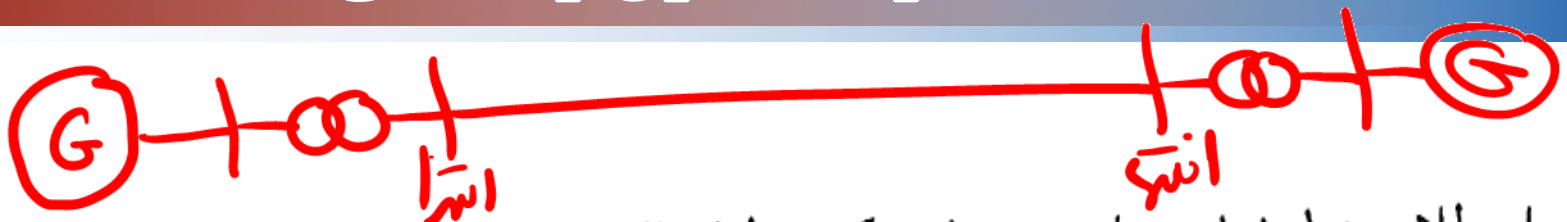
$$G = G_{\ell}^{ab} + G_{\ell}^{bc} + G_{\ell}^{ca}$$

(ب)

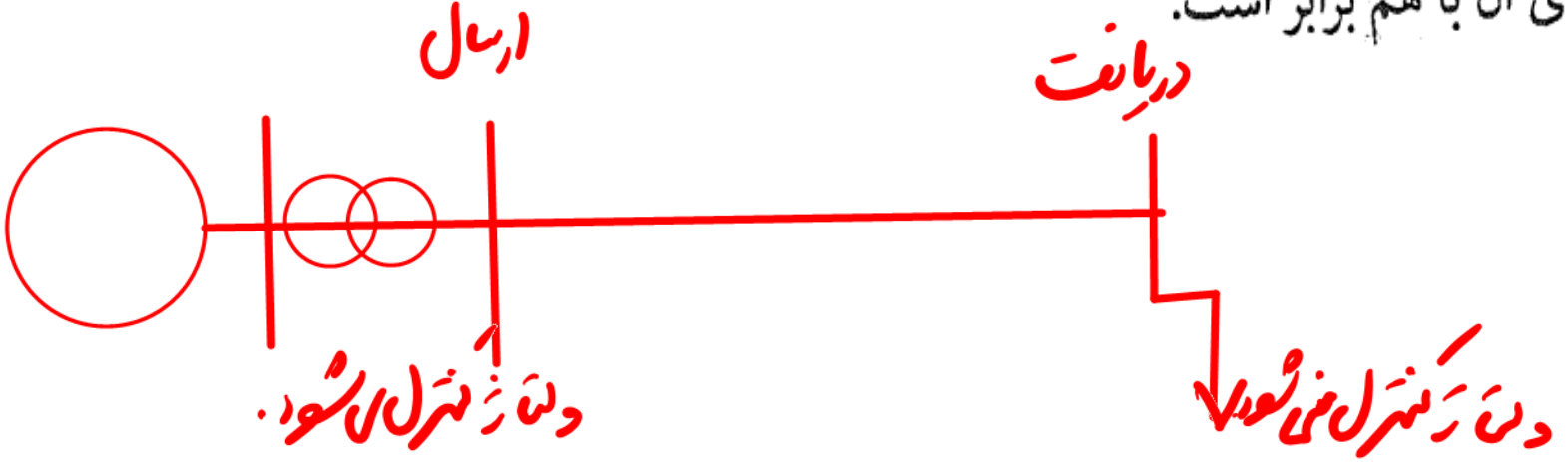
فصل دوم

جبران سازی خطوط انتقال

خطوط متقارن و شعاعی



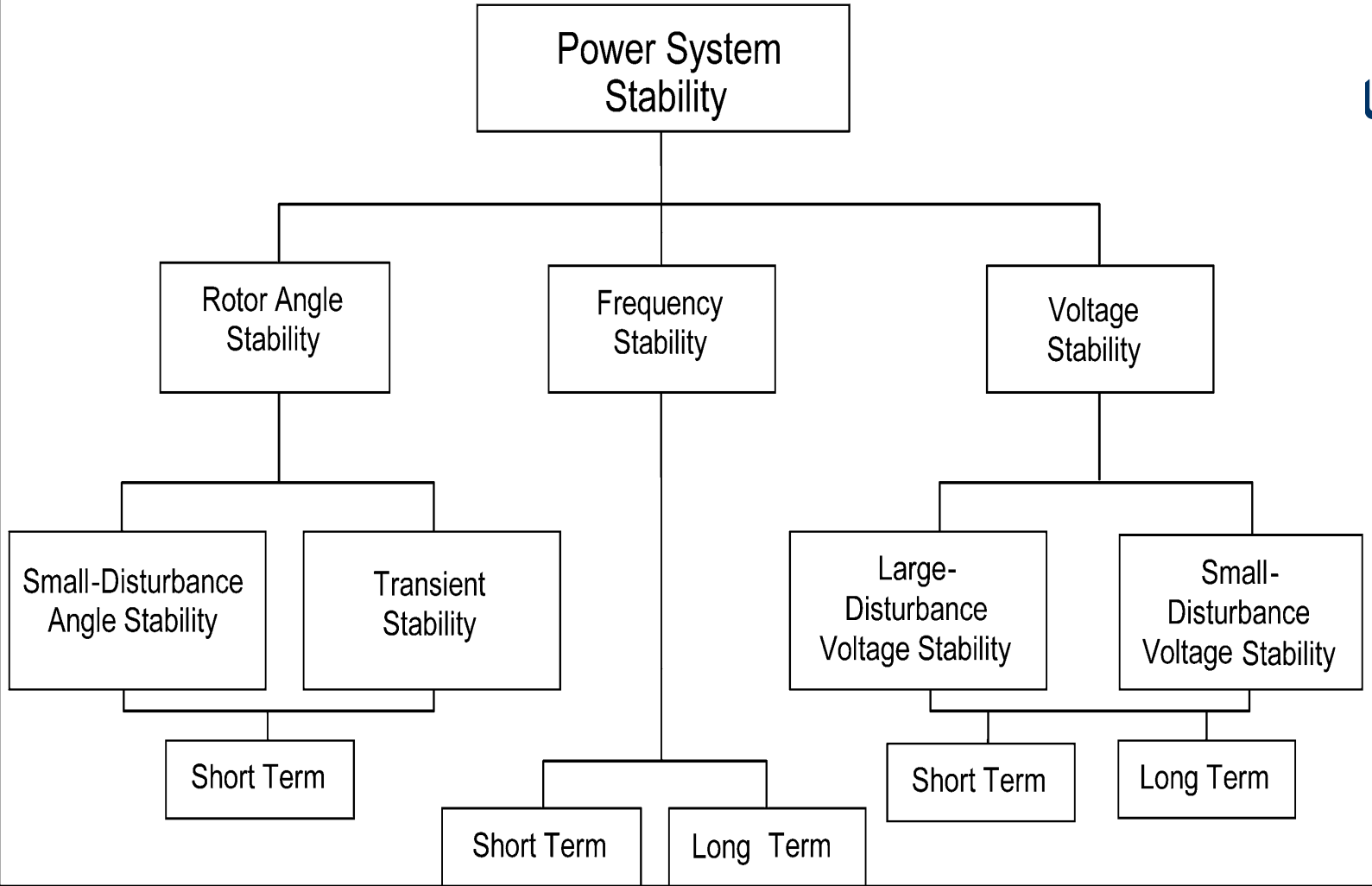
اصطلاح خط شعاعی برای توصیف یک خط انتقال منفردی بکار برده می‌شود که ولتاژ ابتدای آن (طرف فرستنده) توسط ماشینهای سنکرون واقع در آن کنترل می‌شود و ولتاژ انتهای خط (طرف گیرنده) کنترل نمی‌شود. خط متقارن از دو طرف به ماشینهای سنکرون متصل است و ولتاژ ابتدا و انتهای آن با هم برابر است.



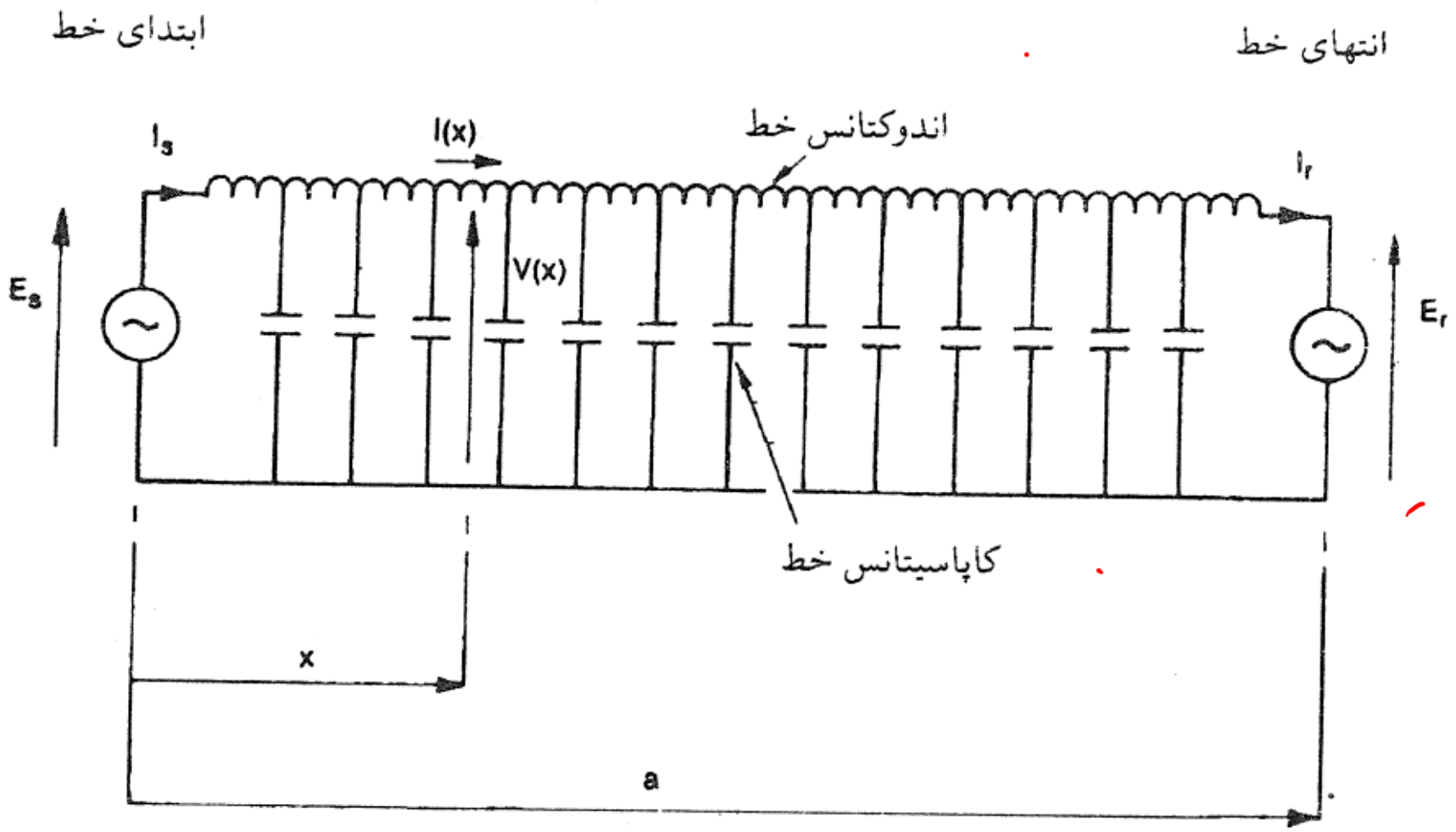
وسایل جبران کننده	مزایا	معایب
راکتور موازی	سادگی از نظر اصول کار و ساختمان	مقدار آن ثابت است
خازن موازی	سادگی از نظر اصول کار و ساختمان	مقدار آن ثابت است-سویچ کردن آن همراه با گذرا است
خازن سری	سادگی از نظر اصول کار، رفتار آن نسبت به محل قرار گرفتن حساس نیست	در مقابل اضافه ولتاژ باید حفاظت شودو به فیلتر زیر هارمونیک نیاز دارد. از نظر تحمل اضافه بار محدودیت دارد
کندانسور سنکرون	توانایی تحمل اضافه بار دارد قابل کنترل کامل است هارمونیک کم تولید می‌کند	نیاز به نگهداری زیادی دارد پاسخ کنترل آن کند است رفتارش نسبت به محل قرارگرفتن حساس است نیاز به فونداسیون محکمی دارد
راکتورچندفازقابل اشباع[1]	ازنظرساختمان محکم وقابل اطمینان است توانایی تحمل اضافه بار آن زیاد است بر سطح اتصال کوتاه اثر نمی‌گذارد هارمونیک کم تولید میکند	اساساً مقدارش ثابت است رفتارش نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است تولید صدا می‌کند
راکتورتایریستورکنترل(TCR)	پاسخ آن سریع است قابل کنترل کامل است برسطح اتصال کوتاه اثر نمی‌گذارد وقتی خراب می‌شود بسرعت قابل تعمیر است	تولید هارمونیک می‌کند رفتارش نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است
خازن‌تایریستورسویچ(TSC)	وقتی خراب می‌شود بسرعت قابل تعمیر است تولید هارمونیک نمی‌کند	توانایی ذاتی محدود کردن اضافه ولتاژ را ندارد از نظر کنترل پیچیده است پاسخ فرکانس آن کند است رفتارش نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است

نیازمندی های اساسی در انتقال توان ac

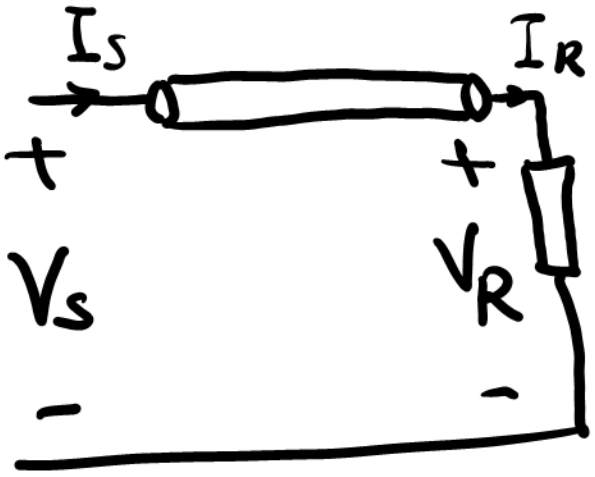
- ۱- ماشین های سنکرون بزرگ بایستی در وضعیت سنکرون باقی بمانند.
- مفهوم اصلی در نگهداری سنکرونیزم پایداری است.
- ۲- ولتاژ با



مدل سازی خطوط انتقال بلند



$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh\gamma l & Z_c \sinh\gamma l \\ \frac{1}{Z_c}\sinh\gamma l & \cosh\gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$



$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy}$ ثابت انتشار — امپدانس سری خط واحد طول $z = r + jx = r + j(L\omega)$ Ω/m

ادمیتانس موازی خط واحد طول $y = g + jb = g + jc\omega$ S/m

$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{r+jx}{jb}}$

* کندِ خط بدون تلفات:

$r = 0$

$\gamma = \sqrt{jL\omega \cdot jc\omega} = j\omega\sqrt{LC} \rightarrow \alpha = 0,\ \beta = \omega\sqrt{LC}$

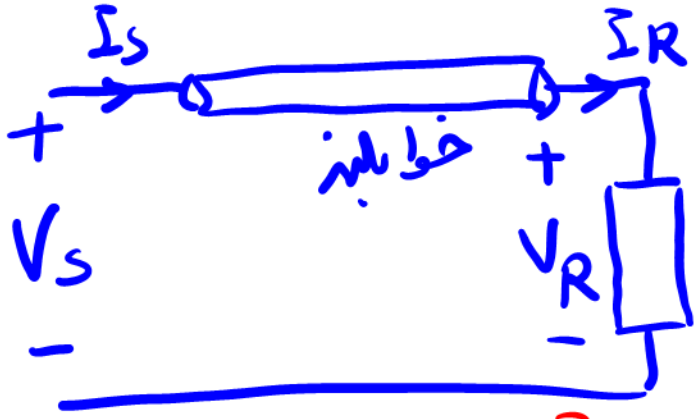
$\cosh\gamma l = \cos\beta l = \cos\theta$

$\sinh\gamma l = j\sin\beta l = j\sin\theta$

$\theta \triangleq \beta \cdot l$ طول الکتریکی خط

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & jZ_0\sin\theta \\ \frac{j}{Z_0}\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

در کلی خط بدون تلفات



بار طبیعی خط P_0

- بار امپدانس موجی: SIL

توانی است که از طریق خط انتقال، Z_0 باری معادل امپدانس موجی را روی شود.

$$P_0 = SIL = V_R^2 / Z_0$$

- امپدانس موجی: Surge Impedance

$r = g = 0$ ←

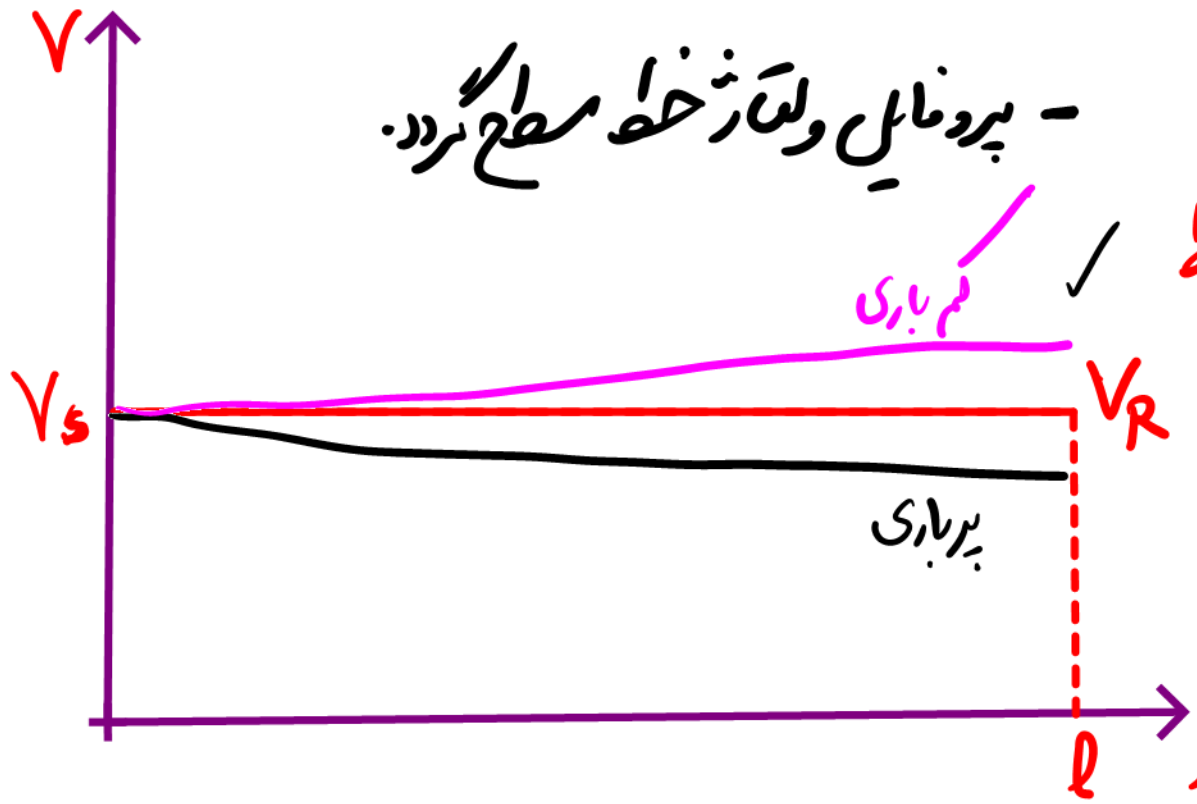
$$Z_0 = \sqrt{Z/Y} = \sqrt{\frac{L\omega}{C\omega}} = \sqrt{L/C}$$

- در یک خط انتقالی:

۱- اگر بار خط برابر با بار طبیعی خط باشد. $Z_L = Z_0$

۲- اگر بار خط بیشتر از بار طبیعی خط باشد ← Over-Load

۳- حالت کم باری



- پر و خالی ولتاژ خط مسطح گردد.

Z_L = امپدانس بار

$Z_L = Z_0 = \sqrt{L/C}$

L, C, r

regid ← باید این سازی این پارامترها را قابل انعطاف کنیم

$$V_S = V_R \cos\theta + jZ_0 \sin\theta\, I_R \qquad P_0 = V_R^2/Z_0 \Leftarrow \text{if } Z_L = Z_0$$

$$I_R = V_R/Z_0$$

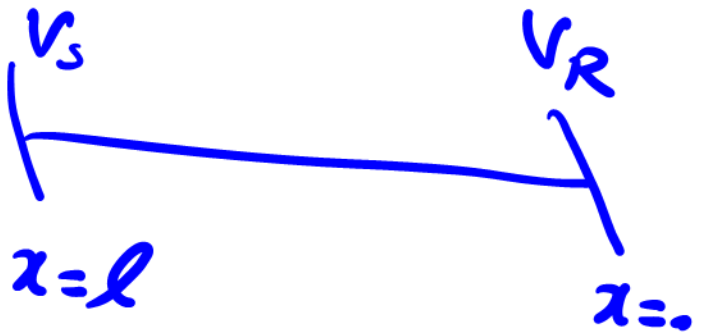
$$V_S = V_R \cos\theta + jZ_0 \sin\theta \cdot V_R/Z_0$$

$$V_S = V_R(\cos\theta + j\sin\theta) \Rightarrow |V_S| = |V_R|$$

$$V(x) = V_R \cos\beta x + jZ_0 \sin\beta x \cdot I_R$$

$$V(x) = V_R(\cos\beta x + j\sin\beta x)$$

$$|V(x)| = V_R$$



۲ـ حالت بی باری: $I_R = 0$

$$V(x) = V_R \cos\beta x + jZ_0 \sin\beta x \cdot \cancel{I_R}$$

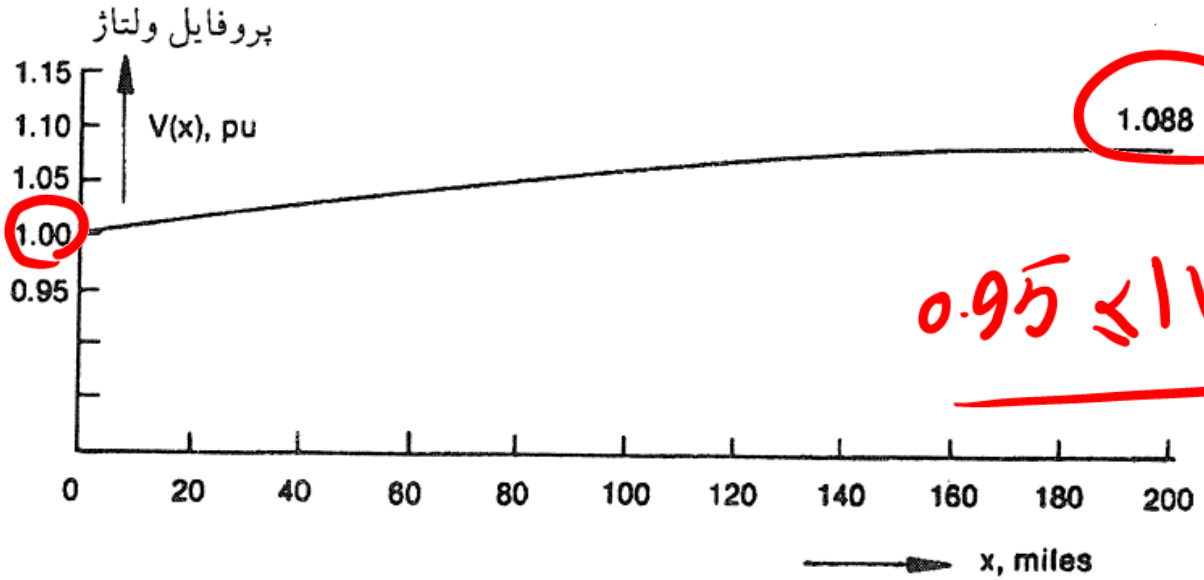
$$V(x) = V_R \cos\beta x \Rightarrow V_S = V_R \cos\theta \Rightarrow \boxed{V_R = \frac{V_S}{\cos\theta}} \Rightarrow$$

$0 < \cos\theta \leq 1$ ولتاژ انتهای خط بیشتر از ولتاژ ابتدای خط است $V_R > V_S$

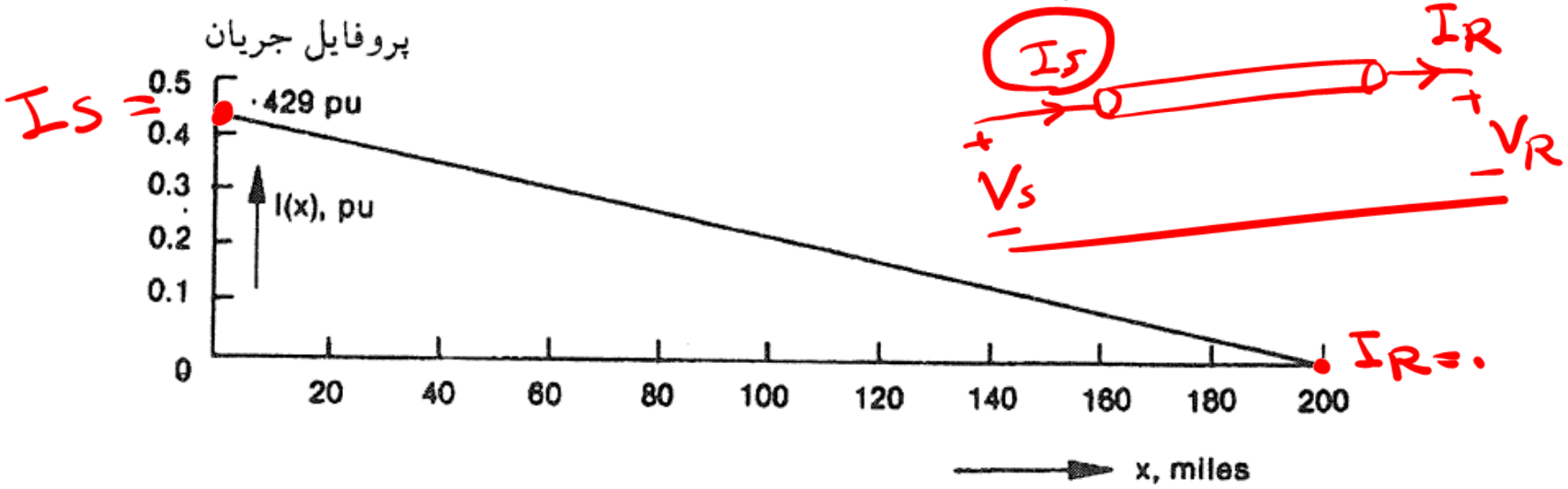
خط مدار باز جبران نشده

$$V(x) = E_s \frac{\cos \beta(a - x)}{\cos \theta}$$

$$I(x) = j \frac{E_s}{Z_o} \frac{\sin \beta(a - x)}{\cos \theta}$$



$$0.95 \leq |V| \leq 1.05$$



خط متقارن در حالت بی باری

$$E_s = E_r \cos\theta + j Z_0 I_r \sin\theta$$

$$I_s = j\left[\frac{E_r}{Z_0}\right]\sin\theta + I_r \cos\theta$$

وقتی توان انتقال پیدا نمی‌کند شرایط الکتریکی در دو سر خط یکسان است بنابراین با تقارن

$$I_s = -I_r \qquad (۱۴)$$

از معادله ۱۳ ب داریم

$$-I_r = j\frac{E_r}{Z_0}\frac{\sin\theta}{۱ + \cos\theta} = j\frac{E_r}{Z_0}\,tg\,\frac{\theta}{۲} \qquad (۱۵)$$

با جایگزینی این مقدار I_r در معادله ۱۳ الف داریم

$$E_s = E_r \qquad (۱۶)$$

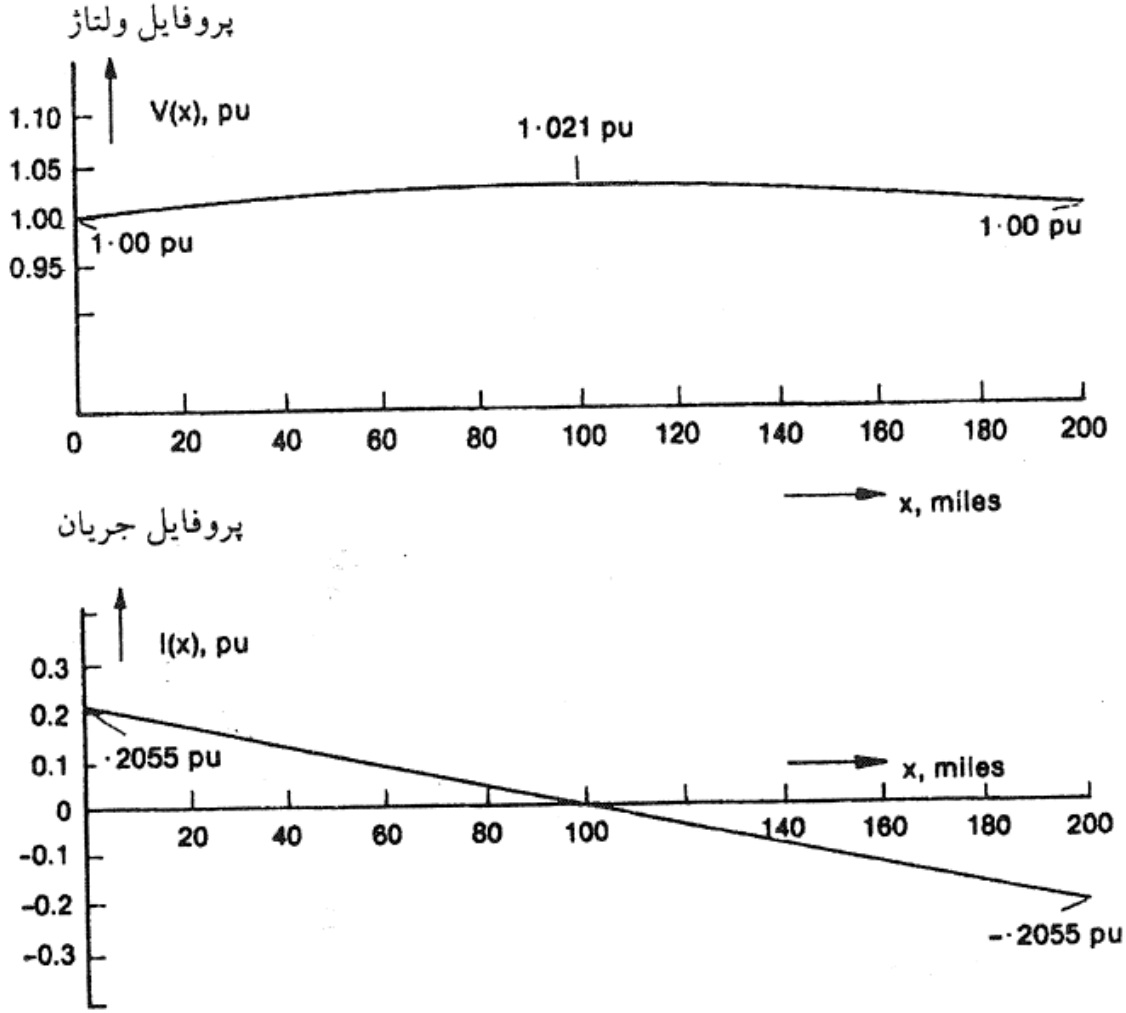
و بنابراین

$$I_s = j\frac{E_s}{Z_0}\,tg\,\frac{\theta}{۲} \qquad (۱۷)$$

از روی تقارن، جریان در نقطه میانی صفر است. ولتاژ در نقطه میانی برابر است با ولتاژ مدار باز خطی که طولش نصف طول کل خط می‌باشد:

$$V_m = \frac{E_s}{\cos(\theta/2)}$$

پروفایل ولتاژ و جریان برای خط متقارن بطول ۲۰۰ مایل

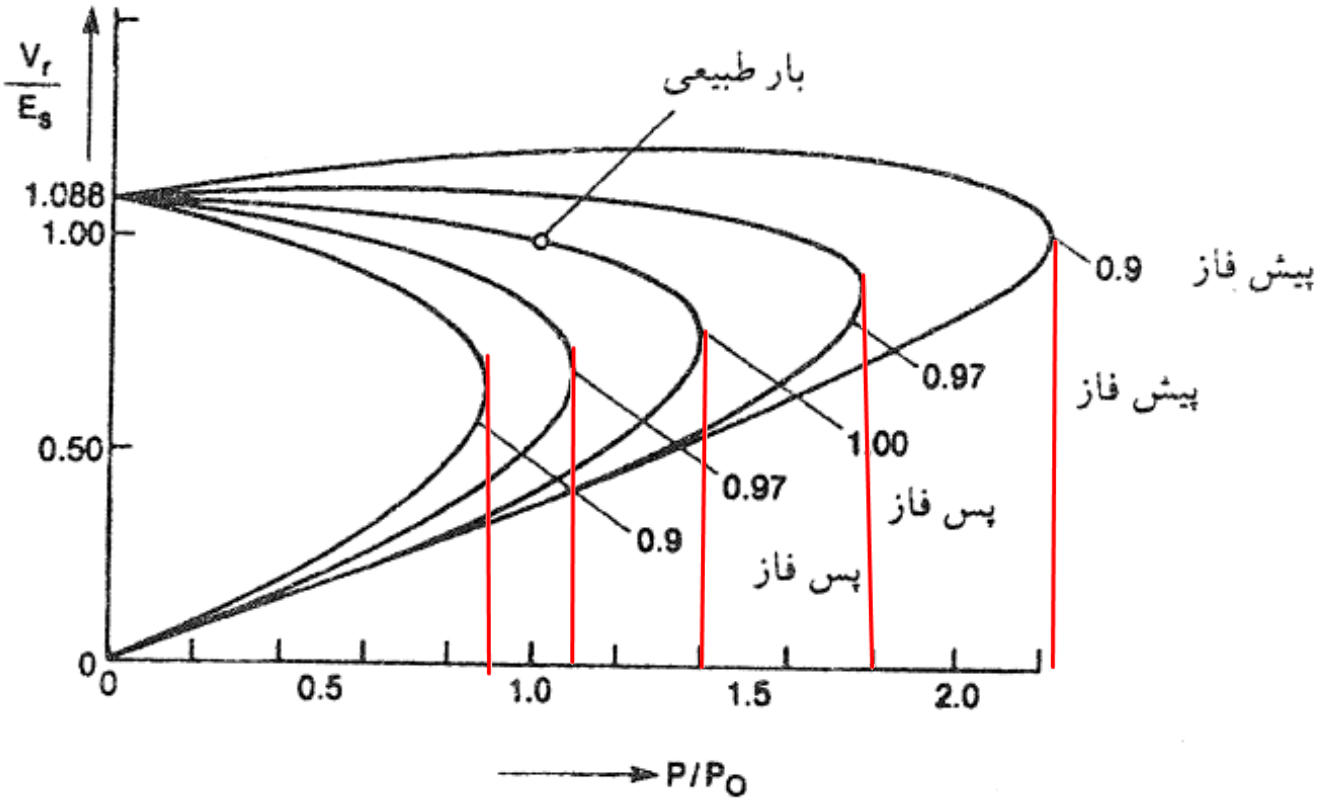


❖خط جبران نشده در حالت باداری

خط شعاعی با ولتاژ ثابت در ابتدای خط

$$I_r = \frac{P - jQ}{V_r}$$

$$E_s = V_r \cos\theta + j Z_o \sin\theta \frac{P - jQ}{V_r}$$



شکل ۷ – مقدار ولتاژ انتهای خط، در یک خط شعاعی ۲۰۰ مایل بدون تلفات، بصورت تابعی از توان بار (P) و ضریب توان

حداکثر توان انتقالی و ملاحضات پایداری

خط متقارن – اگر بار در انتهای خط انتقال بدون تلفات برابر $P + jQ$ باشد، ولتاژهای ترمینال به وسیله معادله ۲۴ به هم ارتباط داده می‌شوند:

$$\mathbf{E}_s = \mathbf{E}_r \cos\theta + j Z_0 \frac{P - jQ}{\mathbf{E}_r} \sin\theta \qquad (۳۳)$$

این معادله برای بارهای سنکرون و غیرسنکرون قابل قبول است. در اینجا فرض می‌شود که بار سنکرون است و $\mathbf{E}_r$ به جای $\mathbf{V}_r$ نوشته شده است. اگر $\mathbf{E}_r$ به عنوان مرجع فازور گرفته شود $\mathbf{E}_s$ را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\mathbf{E}_s = E_s e^{j\delta} = E_s(\cos\delta + j \sin\delta) \qquad (۳۴)$$

که در آن δ زاویه فاز بین $\mathbf{E}_s$ و $\mathbf{E}_r$ است (شکل ۹ ملاحظه شود). δ زاویه بار[1] یا زاویه انتقال[2] نامیده می‌شود. با برابر کردن قسمتهای حقیقی و موهومی معادلات ۳۳ و ۳۴ داریم

$$E_s \cos\delta = E_r \cos\theta + Z_0 \frac{Q}{E_r} \sin\theta \qquad (۳۵)$$

$$E_s \sin\delta = Z_0 \frac{P}{E_r} \sin\theta \qquad (۳۶)$$

معادله ۳۶ را می‌توان به شکل زیر مرتب کرد

$$P = \frac{E_s E_r}{Z_0 \sin\theta} \sin\delta \qquad (۳۷)$$

- و تنها راه بهبود پایداری کاهش مقدار موثر θ است. برای نیل به این مقصود دو روش جبران به کار گرفته شده است. یکی کاربرد خازن های سری و کاهش Xو در نتیجه کاهش θ است، زیرا در فرکانس پایه $\theta = \beta l = \sqrt{X/X}$ می باشد. این روش به جبران طول الکتریکی خط موسوم است. روش دیگر این است که خط را به بخش های کوچکتر تقسیم کنیم که تقریباً هر بخش از بخش های دیگر مستقل است به جز آنکه همگی توان مشترکی را انتقال می دهند. این روش به جبران با تقسیم بندی خط موسوم است. این کار با اتصال دادن جبران کننده ولتاژ ثابت در فواصل مختلف خط انجام می شود.

۲-۳ خطوط انتقال جبران شده

۲-۳-۱ انواع جبران‌سازی: Z_0- مجازی[۱]، θ- مجازی[۲]، و «جبران‌سازی با تقسیم‌بندی خط[۳]»

یک جبران کننده ایده آل اعمال زیر را انجام می دهد

۱- در ایجاد یک پروفایل ولتاژ مسطح در تمامی سطوح انتقال توان مساعدت می‌نماید.

۲- با افزایش حداکثر توان قابل انتقال پایداری را بهبود می‌بخشد.

۳- یک روش مقرون به صرفه در جوابگویی به نیاز توان راکتیو در سیستم انتقال را فراهم می‌کند.

یک پروفایل ولتاژ مسطح حاصل می‌شود اگر چنانچه امپدانس ضربه‌ای موثر خط تغییر داده شود طوریکه مقدار مجازی Z'_0 را داراگردد که در آن بار طبیعی مجازی V_0^2 / Z'_0 برابر با بار واقعی است. امپدانس ضربه‌ای جبران‌نشده خط برابر است با $Z_0 = \sqrt{l/c}$. در فرکانس پایه می‌توان آن را به صورت $\sqrt{x_l x_c}$ نوشت که این مطلب را می‌رساند که اگر راکتانس سری x_l و یا راکتانس موازی x_c تغییر داده شوند (مثلا با اتصال دادن خازن یا راکتور مناسب) در آن صورت خط دارای یک امپدانس ضربه‌ای مجازی Z'_0 خواهد شد که بار طبیعی مجازی مربوط به آن برابر است با

$$P'_0 = \frac{V_0^2}{Z'_0} = P$$

جبران کننده ها

- ۱- جبران کننده های پسیو
- ۲- جبران کننده های اکتیو

جبران کننده پسیو

- جبران کننده های پسیو شامل خازن ها و راکتورهای موازی و خازن های سری می باشد.
- این وسایل با تغییر دادن کاپاسیتانس و اندوکتانس طبیعی کار می کنند و کارشان اساساً استاتیک می باشد.
- جبران کننده‌های پسیو برای جبران امپدانس ضربه و جبران طول خط بکار می روند.
- به عنوان مثال، راکتورهای موازی برای جبران اثرات خازنی پخش شده خط، مخصوصاً برای محدود کردن افزایش ولتاژ ناشی از بی باری یا کم باری به کار برده می شوند.
- از خازن های سری در جبران طول خط استفاده می شود. معمولاً خازن های سری همراه با جبران سازی امپدانس ضربه به کار گرفته می شوند و این کار به کمک جبران کننده اکتیو عملی است.

www.Win2Farsi.com

جبران کننده اکتیو

- جبران کننده های اکتیو معمولاً جبران کننده های موازی هستند و دارای این خصیصه هستند که قادرند ولتاژ را در ترمینال خودشان ثابت نگه دارند و این عمل را با تولید یا جذب مقدار صحیح مورد نیاز توان راکتیو به منظور جبران تغییرات ولتاژ در نقطه اتصال انجام می دهند.
- جبران کننده های اکتیو در جبران امپدانس ضربه یا جبران با تقسیم بندی خط به کار برده می شوند.
- دارای قابلیت تغییر پیوسته و پاسخ سریع می باشند.

طبقه بندی جبران کننده‌ها بر حسب نوع و عملکرد آنها

عملکرد	پاسیو	اکتیو
جبران امپدانس ضربه ای	راکتورهای موازی	ماشینهای سنکرون
جبران Z مجازی	خطی یا غیر خطی	کندانسور های سنکرون
کنترل ولتاژ و مدیریت	خازن های موازی	جبران کننده های راکتور قابل اشباع
توان راکتیو		خازن های تایریستور سوئیچ راکتورهای تایریستور کنترل
جبران طول الکتریکی خط ،جبران زاویه مجازی– مدیریت توان راکتیو و کنترل ولتاژ، بهبود پایداری	خازن‌های سری	
جبران با تقسیم بندی خط		کندانسورهای سنکرون
جبران دینامیکی موازی		جبران کننده های راکتور قابل اشباع
بهبود پایداری دو خطوط طویل		خازنهای تایریستور سوئیچ، راکتورهای تایریستور کنترل

جبران سازی ثابت پخش شده و یکنواخت

$Z_\circ$ ، θ مجازي و P_0 :Ch yKkùs -ŧŧIж 2ùz-KŧÜ˘ù.

معمولاً جبران کننده‌ها در دو انتهای خط ویا در فواصل معین در طول خط نصب می‌شوند.

علیرغم طبیعت متمرکز یا فشرده آنها، مفید است که روابط را برای حالت ایده آل جبران پخش شده یکنواخت بدست آوریم زیرا این روابط در عین سادگی، مستقل از مشخصات نوع خاصی از جبران کننده خواهند بود. به علاوه یک دید فیزیکی خوب را ارائه کرده و در تعیین ماهیت نوع جبران مورد لزوم کمک می نماید بدون آنکه نیازی به مطالعه گسترده کامپیوتری باشد.

$$Z_\circ = \sqrt{\frac{l}{c}} = \sqrt{\frac{j\omega i}{j\omega c}} = \sqrt{x_1 x_c}$$

مقدار موثر ادمیتانس کاپاسیتیو موازی

$$(j\omega c)' = j\omega c + \frac{1}{j\omega I_{ysh}}$$

$$= j\omega c(1 - k_{sh})$$

$$k_{sh} = \frac{1}{\omega^2 I_{ysh} c} = \frac{x_c}{x_{ysh}} = \frac{b_{ysh}}{b_c}$$

$$Z'_{\circ} = \frac{Z_{\circ}}{\sqrt{1-k_{sh}}}$$

- اگر به جای اندوکتانس موازی، کاپاسیتانس موازی، به شبکه افزوده شود،آنگاه **ksh** منفی بوده ودارای مقدار زیر است

- :

$$k_{sh} = \frac{c_{\gamma sh}}{c} = \frac{x_c}{x_{\gamma sh}} = \frac{b_{\gamma sh}}{b_c}$$

بنابراین جبران اندوکتیو موازی ،امپدانس ضربه‌ای مجازی را افزایش می‌دهد، در صورتیکه جبران کاپاسیتیو موازی آن را کاهش می‌دهد

اثر خازن سري پخش شده يكنواخت $c_{\gamma se}$ را نشان داد كه در اين صورت داريم:

$$Z'_{\circ} = Z_{\circ}\sqrt{1-k_{sc}}$$

$$k_{se} = \frac{1}{\omega^2 / c_{\gamma sh}} = \frac{x_{\gamma se}}{x_1} = \frac{b_1}{b_{\gamma se}}$$

با ترکیب اثر جبران موازی وسری داریم:

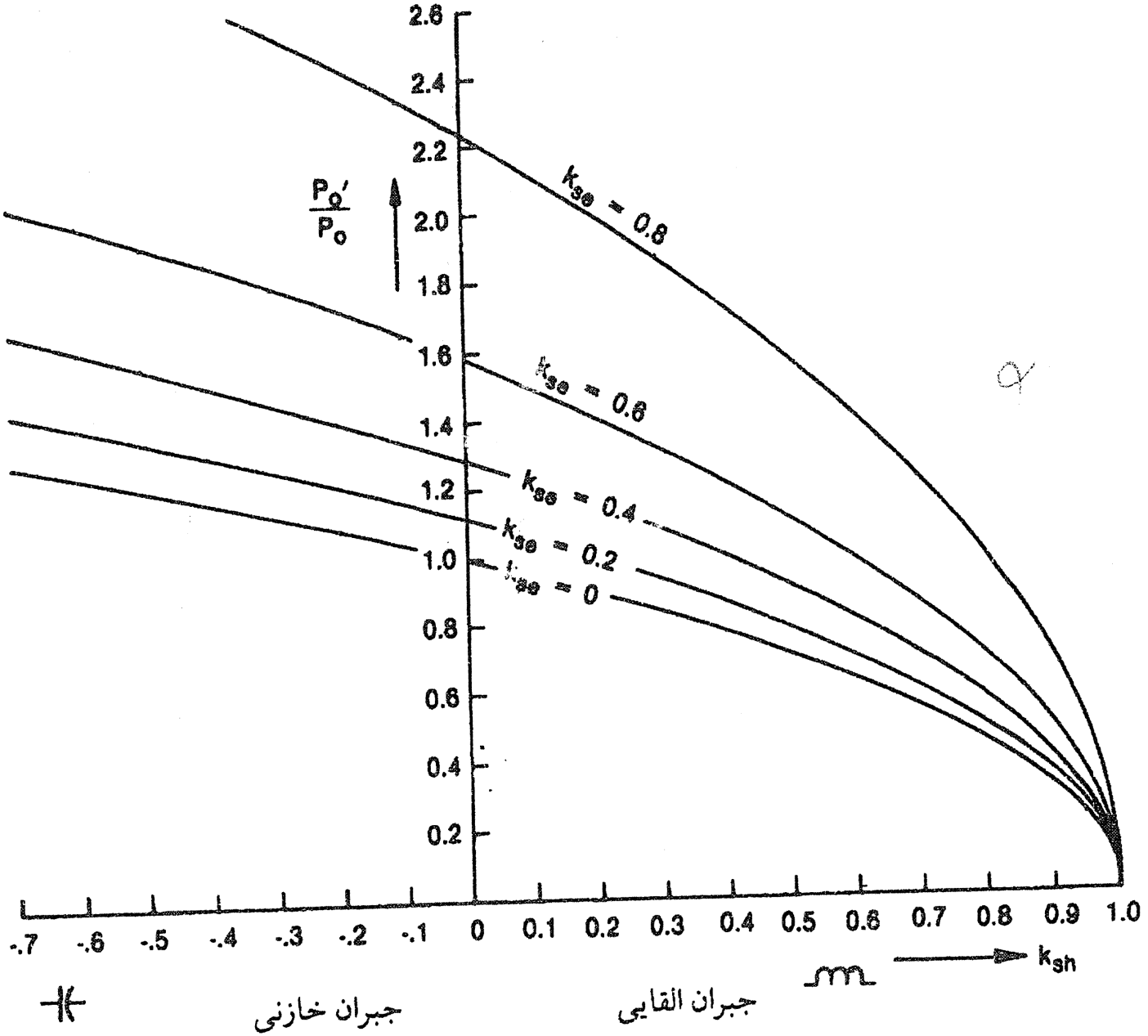
$$Z_{\circ}' = Z_{\circ}\sqrt{\frac{1-k_{se}}{1-k_{sh}}}$$

$$P_{\circ}' = P_{\circ}\sqrt{\frac{1-k_{sh}}{1-k_{se}}}$$

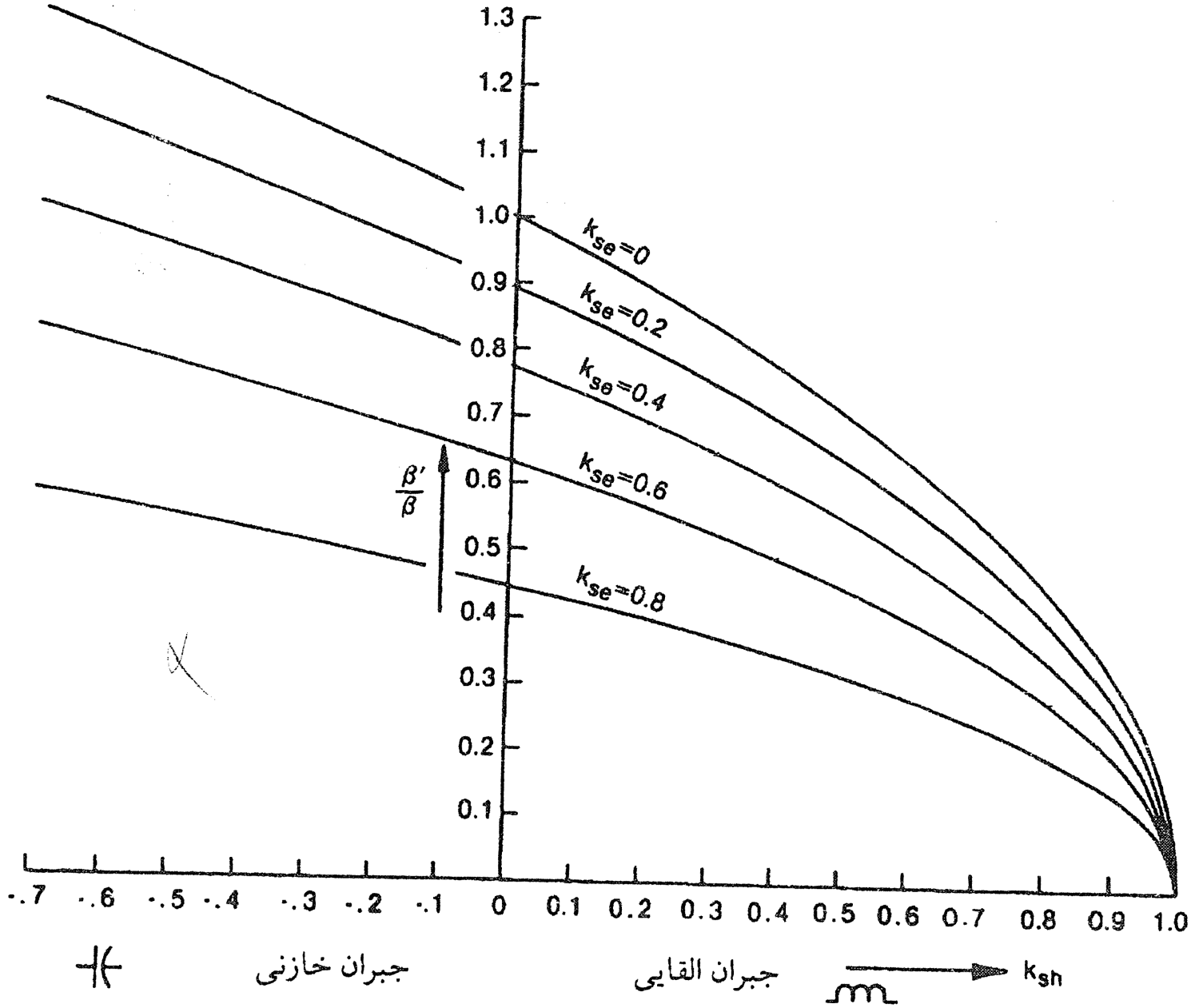
$$\beta' = \beta\sqrt{(1-k_{sh})(1-k_{se})}$$

$$\theta' = \theta\sqrt{(1-k_{sh})(1-k_{se})}$$

si.com



شکل ۱۷ – بار طبیعی مجازی P'_o بصورت تابعی از k_{se} و k_{sh}



شکل ۱۸ – تعداد موج مجازی β'/β بصورت تابعی از k_{sh} و k_{se} (جبران پخش شده یکنواخت)

اثر جبران پخش شده بر کنترل ولتاژ

اثر جبران پخش‌شده بر کنترل ولتاژ – برای هر مقدار ثابت جبران سری، جبران موازی خازنی اضافی موجب افزایش θ' و P'_0 و کاهش Z'_0 می‌گردد و حال آنکه جبران موازی القایی اضافی اثر معکوس دارد. جبران موازی القایی ۱۰۰٪ (یعنی $k_{sh} = 1$) θ' و P'_0 را به صفر تقلیل و Z'_0 را به بی‌نهایت افزایش می‌دهد و این یک پروفایل ولتاژ مسطح را در بار صفر ایجاب نموده و بکارگرفتن راکتورهای موازی به منظور حذف اثر فرانتی را توصیه می‌نماید. در شرایط بار زیاد، پروفایل ولتاژ مسطح با به کارگرفتن خازنهای موازی به جای راکتور حاصل می‌شود. به عنوان مثال، اگر بخواهیم

اثر جبران پخش شده بر روی حداکثر توان انتقالی

$$p \cong p' \frac{\delta}{\theta'}$$

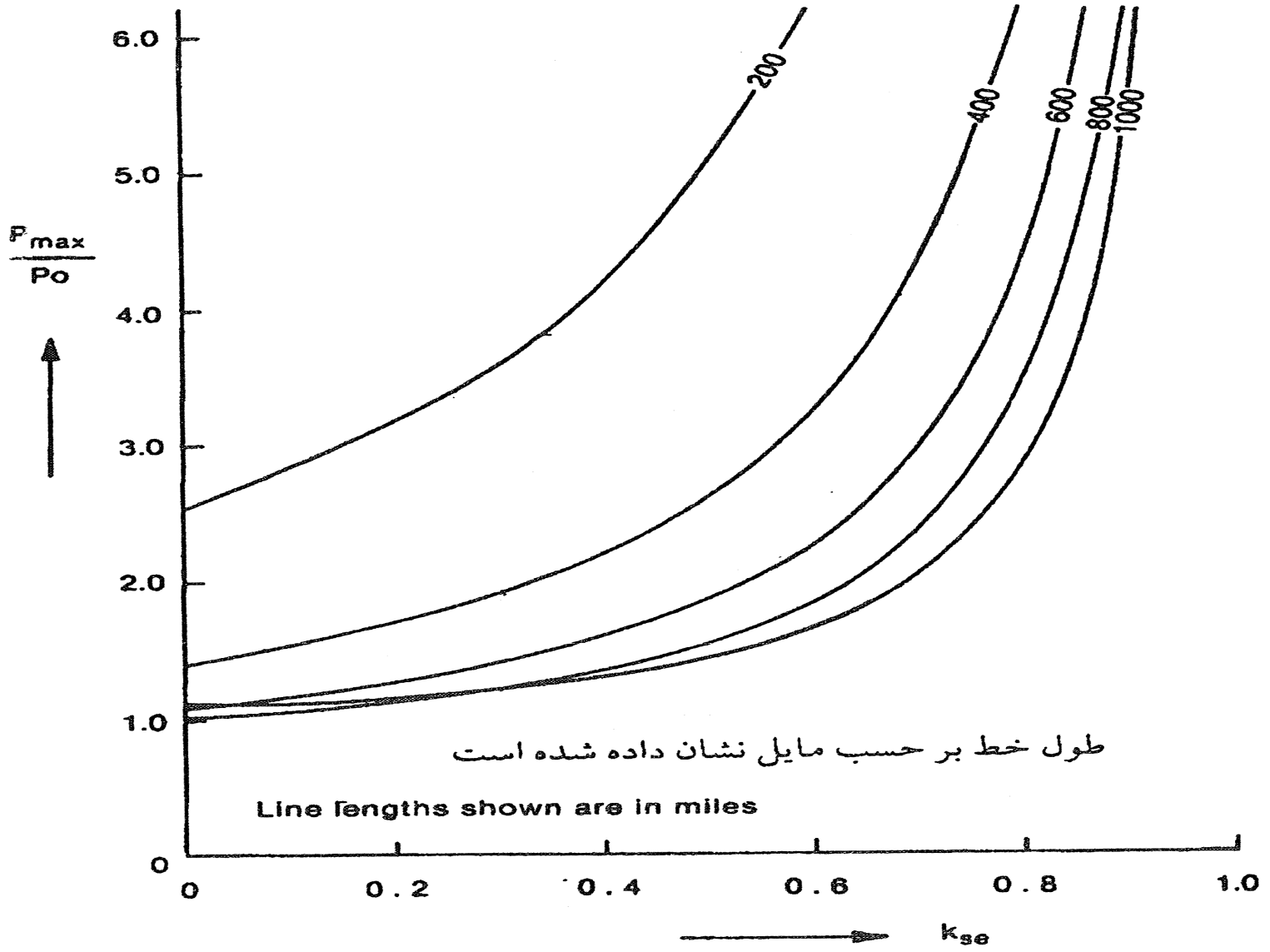
- وقتی $\delta = \theta', P = P'$ و معادله کاملاً صحیح است. اولین هدف کلی از یک طرح جبران، تولید حداکثر مقدار برای P' است یعنی سطح توان انتقالی که در آن پروفایل ولتاژ مسطح باشد. اگر سیستم در توان **P** نزدیک به P' کار می‌کند ضرورتاً δ نزدیک به θ' آنقدر کوچک باشد که انتقال توان در حالت پایدار صورت گیرد، یعنی **P** خیلی نزدیک به حد پایداری ماندگار نباشد.

- البته در تمام خطوطی که نیاز به جبران سازی دارند لازم نیست هر دو هدف برآورده شود.
- خطوط کوتاه نیاز به حمایت ولتاژ و در نتیجه افزایش توان P' دارند گرچه طول الکتریکی آنها خیلی کمتر از ۹۰ درجه است، و اینکار به کمک خازن‌های موازی انجام می گیرد مشروط به اینکه منجر به افزایش زیاد نگردد.
- خطوط جبران شده موازی که طولشان از **mi200** تجاوز نمی‌کند عموماً بیش از مقدار بار طبیعی جبران نشده بارگیری می‌شوند. از طرف دیگر، خطوط طویل تر از **mi 500-300** به دلیل طول الکتریکی جبران نشده زیادشان- نمی توانند حتی در مقدار بار طبیعی شان بارگیری شوند. در اینگونه موارد کاهش θ' در اولویت قرار دارد.

❖ توان ماکزیمم از رابطه زیر بدست می آید:

$$P'_{\max} = \frac{V_{\circ}^{2}}{Z'_{\circ} \sin\theta'}$$

$$\frac{P'_{\max}}{P'_{\circ}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{(1-k_{se})}{(1-k_{sh})}}\sin\left[\theta\sqrt{(1-k_{se})(1-k_{sh})}\right]}$$

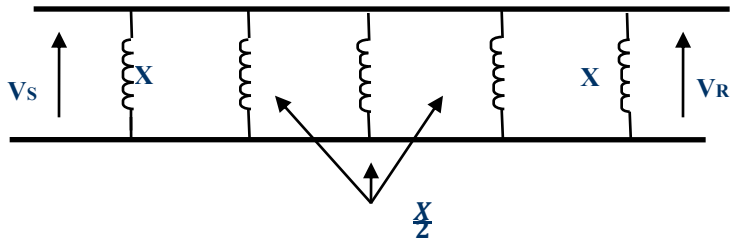

6.0
5.0
4.0
3.0
2.0
1.0
0
$\frac{P_{max}}{P_o}$
200
400
600
800
1000
طول خط بر حسب مایل نشان داده شده است
Line lengths shown are in miles
0
0.2
0.4
0.6
0.8
1.0
k_{se}

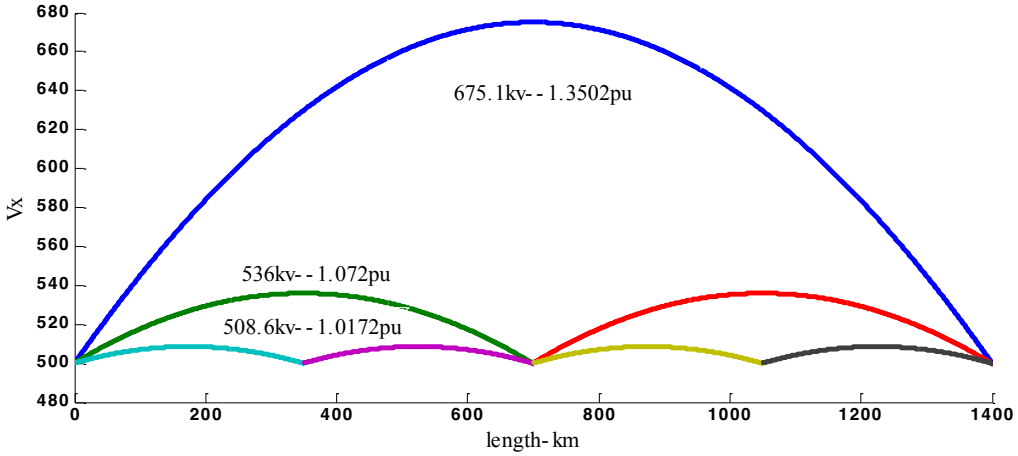
جبران کننده موازی پسیو

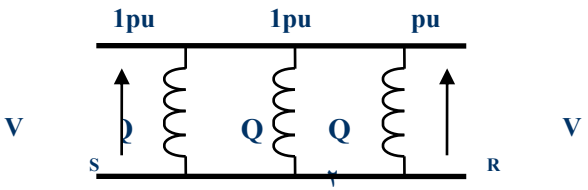
- مقادیر راکتانس و توان راکتیو مورد نیاز
- راکتورهای موازی

راکتورهای موازی متعدد در طول خط

- در خطوط خیلی بلند کنترل ولتاژ بی باری با تقسیم خط به n قسمت با نصب $n-1$ راکتور در فواصل مساوی و دو راکتور در دو انتها انجام پذیر است.
- راکتورهای موازی ابتدا و انتهای خط دارای نصف سوسپتانس راکتورهای میانی هستند
- $X = Z$

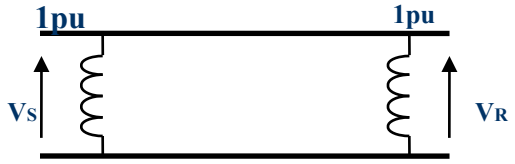






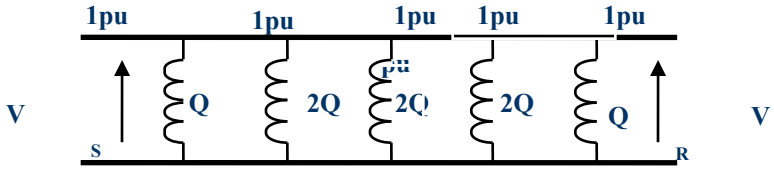
Q=334.2 Mvar--- 0.3861pu

مرحله دوم



785.45 Mvar--- 0.9073pu

مرحله اول



Q=161.29 Mvar --- 0.1863pu

مرحله سوم

پروفایل ولتاژو نمودار تک خطی برای خط $V_n = 500\ KV$(1400 kmجبران شده بااستفاده از راکتورهای موازی

جبران سازی سری

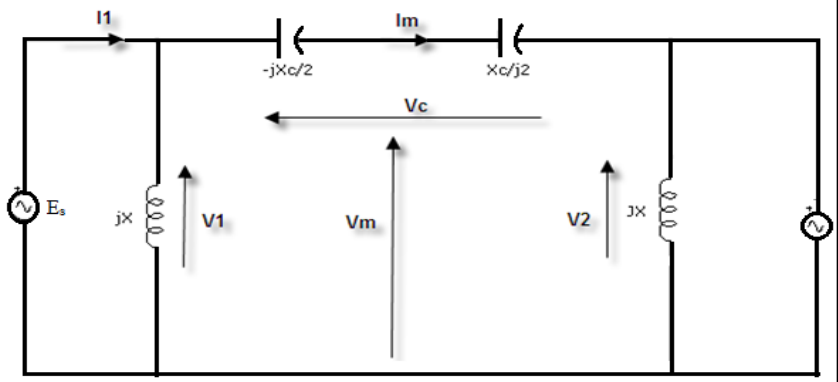
- خازنهای سری به عنوان وسیله کاهش راکتانس انتقالی بین ابتدا و انتهای یک خط دارای کاربردهای زیر است:

- الف) برای افزایش توان انتقالی خط (با هر طولی) می تواند به کار برده شود. در تقسیم بار بین دو یا چند خط موازی گاهی خازنِ سری برای افزایش توان انتقالی در یکی از خطوط موازی ــ مخصوصاً در جایی که خط ولتاژ بالا در بالای خط ولتاژ پایین در یک مسیر مشترک قرار دارند ــ استفاده می شود.

- ب) برای انتقال پایدار توان از خطوط طویل ــ که بدون عمل جبران این انتقال میسر نیست ــ به کار برده می شوند.

خط متقارن جبران شده با خازن سری نقطه میانی و راکتورهای موازی

- هدف از کاربرد راکتورهای موازی کنترل ولتاژ خط است.
- $E = V\cos_{.} + jZI\sin_{.}$
- $I = j_{.}\sin_{.} + I\cos_{.}$
- $V = V - V = -jIX$
- از روی تقارن می توان نوشت: $E = E$ ، $P = VI$
- $V = V - {}_{.}V = V + {}_{.}V$
- $I = I + j_{.} = I - j_{.}$



❖ با در نظر گرفتن V به عنوان مبنای فازور توان انتقالی خواهیم داشت:

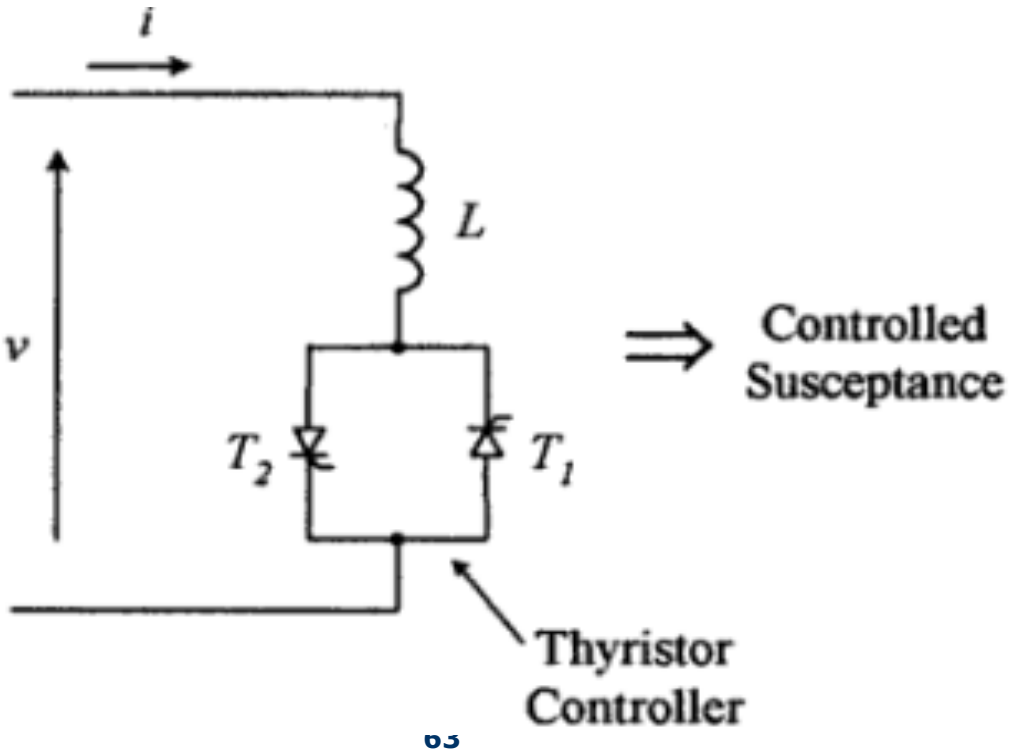
❖ $P = . \ sin .$

❖ $Ecos . = V \ [cos . + . sin .] = Ecos .$

جبران سازی موازی

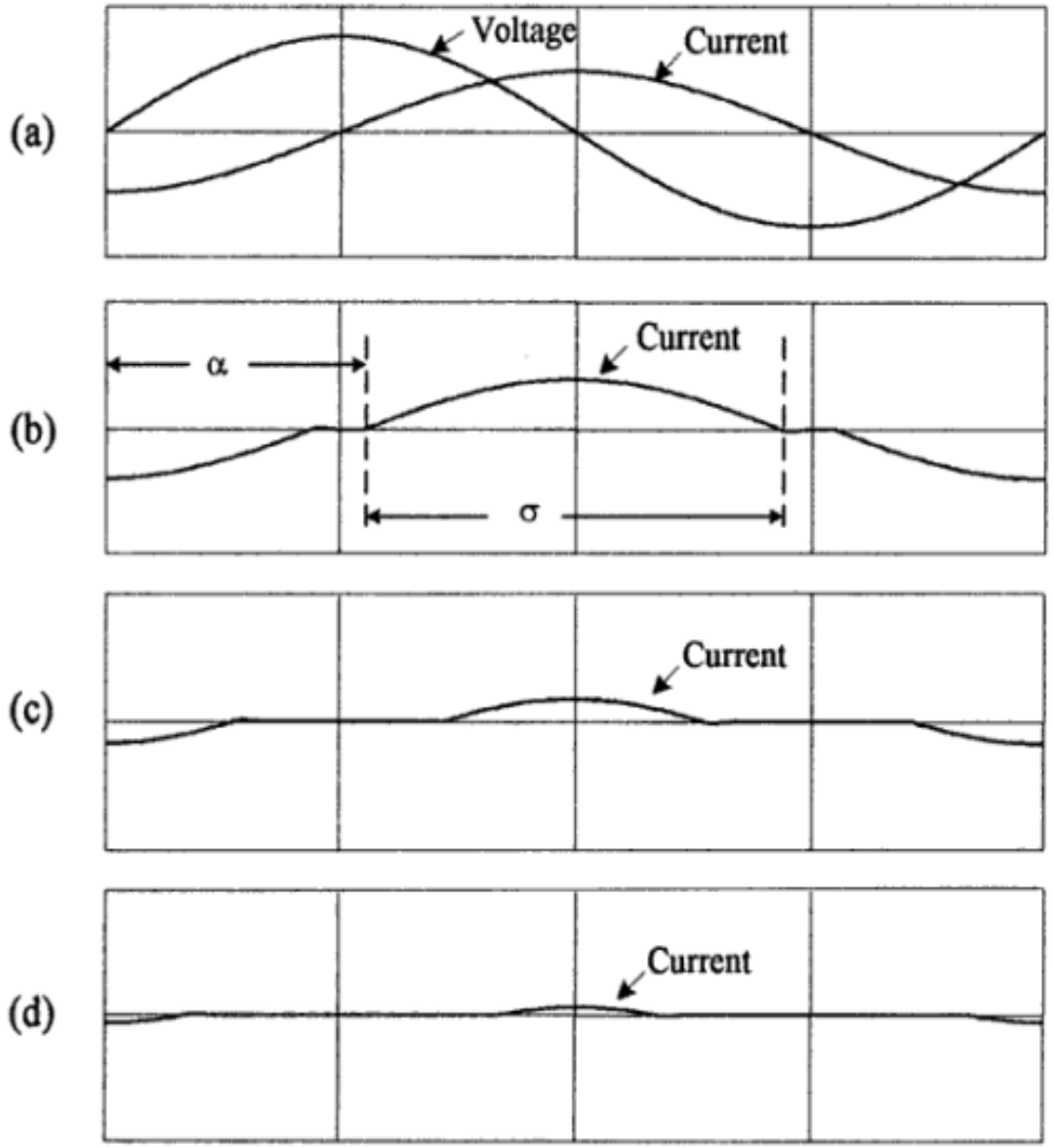
راکتور کنترل شونده تایریستوری Thyristor Controlled Reactor (TCR)

- راکتورهای موازی استاتیکی کنترل شده به وسیله تریستور، به طور کلی به جبرانگرهایی اطلاق می‌شود که به صورت موازی با خط قرار گرفته و با تریستور کنترل می‌شوند. یک راکتور که با تریستور کنترل می‌شود را به اختصار TCR می می‌نامند.



❖ جریان در راکتور می‌تواند از حداکثر (دریچه تریستوری کاملا بسته$\alpha = 90$) تا صفر (دریچه تریستوری کاملا باز $\alpha = 180$) با روش کنترل فاز (کنترل زاویه آتش)، کنترل شود. بدین معنی که بسته شدن دریچه تریستوری نسبت به پیک ولتاژ اعمال شده در هر نیم سیکل، تأخیر داشته و به این ترتیب طول دوره های هدایت جریان کنترل می‌شوند. این روش کنترل جریان، به صورت مجزا برای نیم سیکل های مثبت و منفی جریان در شکل (۲-۲) نشان داده شده است، که درآن α زاویه آتش و σ زاویه هدایت می باشد . قابل ذکر است که برای زاویه آتش α = 90 جریان عبوری از راکتور همان جریانی خواهد بود که در حالت ماندگار و با یک کلید همیشه بسته، حاصل می شود و هدایت کامل صورت می گیرد و هنگامی که α = 180 تایرستورها کاملاً مسدود شده و هیچ جریانی توسط راکتور جذب نمی گردد. اثر افزایش زاویه آتش، کاهش دادن مولفه هارمونیک جریان است و این امر معادل است با افزایش اندوکتانس راکتور که در نتیجه جریان و توان راکتیو آن کاهش می یابد.

(a) $\phi = 90°$, $\sigma = 180°$; (b) $\phi = 180°$, $\sigma = 90°$; (c) $\phi = 120°$, $\sigma = 180°$; (d) $\phi = 150°$, $\sigma = 30°$



❖ جریان لحظه ای عبوری از راکتور را می‌توان بصورت تابعی از زاویه آتش بر حسب ولتاژ $V(t) = V \sin \omega t$ بصورت زیر بیان نمود :

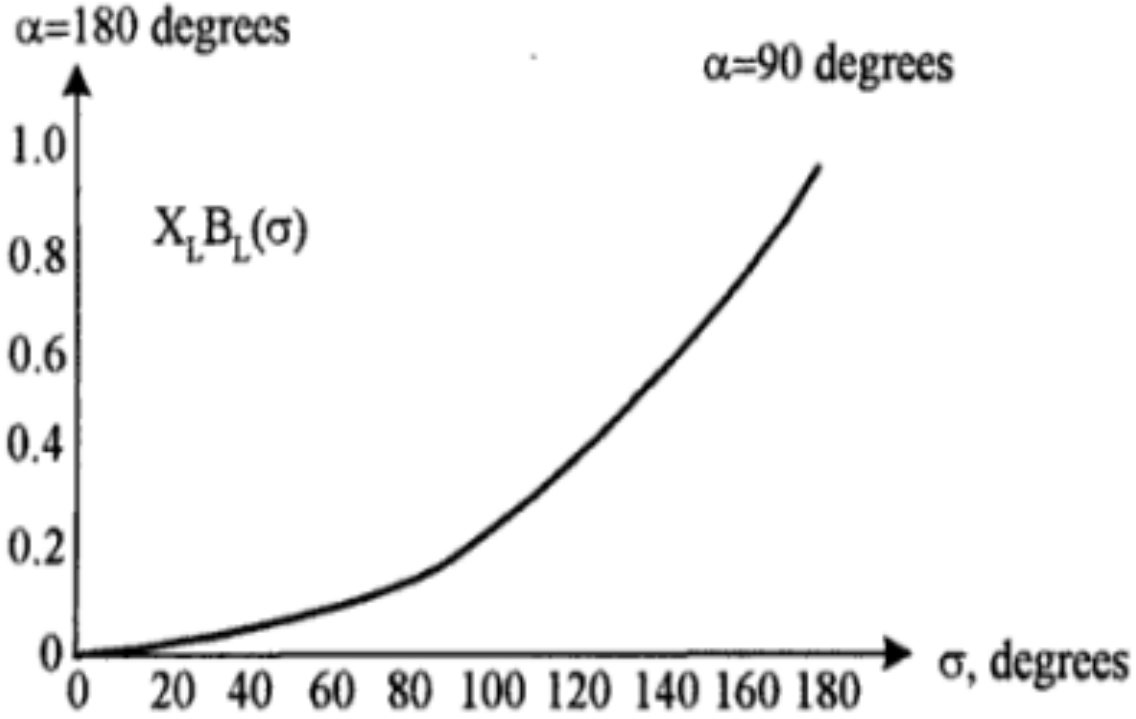
$$\begin{cases} i = \frac{\sqrt{2}V}{X}(\cos\alpha - \cos\omega t) & \alpha < \omega t < \alpha + \sigma \\ 0 & \alpha + \sigma < \omega t < \alpha + \pi \end{cases}$$

$\alpha + . = \pi$

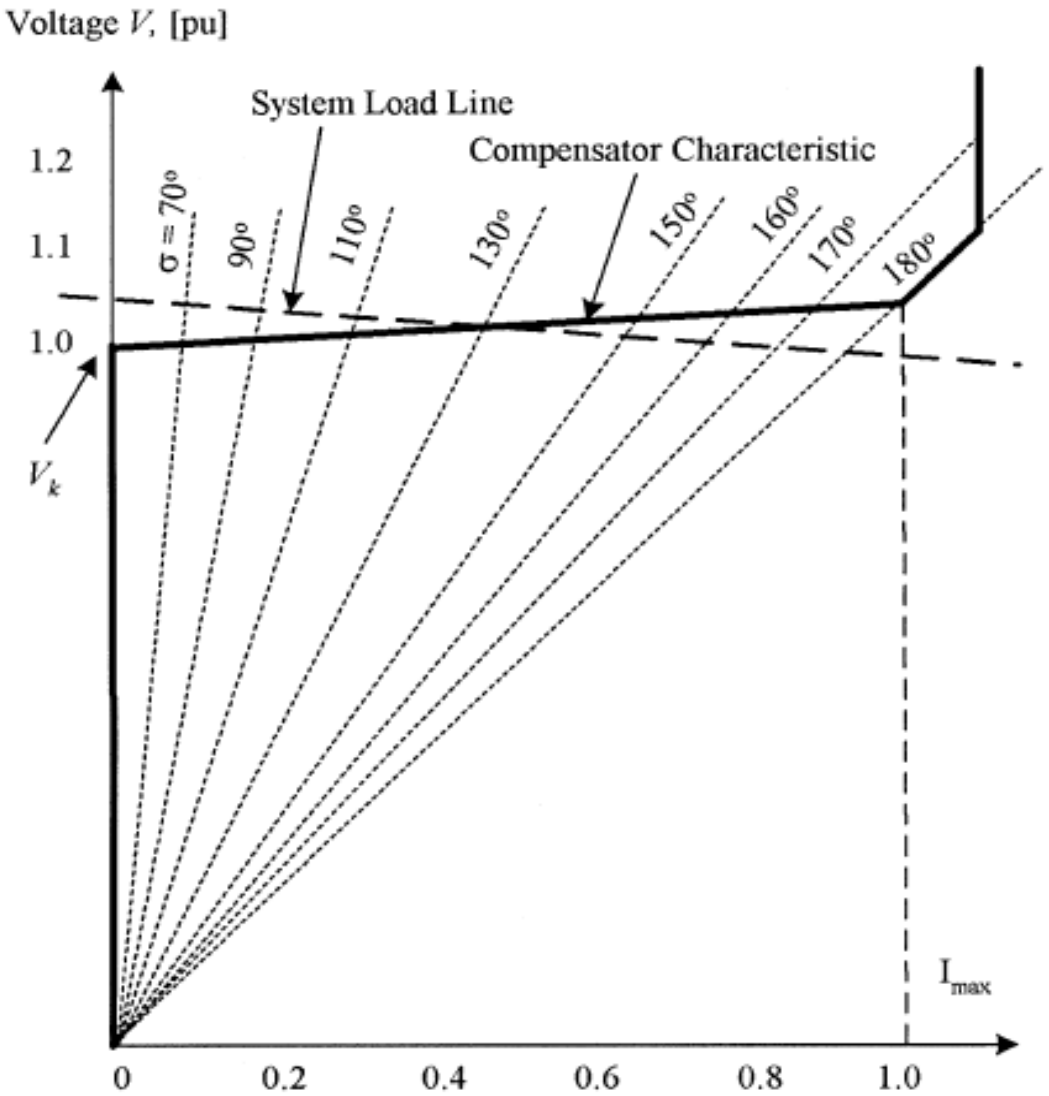
دامنه مربوط به مولفه اصلی جریان، $i(\sigma)$ ، می تواند به عنوان تابعی از زاویه σ با استفاده از تحلیل فوریه به صورت زیر بیان شود:

$$i(\sigma) = \frac{\sigma - \sin\sigma}{\pi L \omega} V$$

- سوسپتانس قابل تنظیم با زاویه هدایت در فرکانس پایه $B\ (\sigma)$ ، برای TCR قابل تعریف است.
- $B\ (\sigma) =$ _



مشخصه عملکردی (مشخصه ولتاژ – جریان)



تحلیل هارمونیکی

- برای زاویه آتش ۹۰ درجه جریان TCR کاملاً سینوسی و عاری از هرگونه هارمونیک می باشد، ولی برای دیگر زوایای آتش (زاویه ۹۰ تا ۱۸۰درجه) این جریان سینوسی نخواهد بود و لذا جبران کننده در این زوایا تولید هارمونیک می کند. اگر زوایای آتش متقارن باشند(یعنی برای هر دو تریستور یکسان باشند) آنگاه فقط هارمونیک های فرد تولید می شود و در غیر اینصورت علاوه بر آن هارمونیک های زوج نی تولید می گردند. وجود هارمونیک های زوج در جریان می تواند افزایش تلفات ، به اشباع رفتن ترانسفورماتور و ... گردد

❖ مقدار موثر هارمونیک مرتبه n–ام جریان را می توان تابعی از زاویه آتش توسط رابطه زیر محاسبه نمود:

❖ $I = \ldots[\ldots + \ldots - cos\,\alpha\ldots]$

❖ که در آن $n = 3,5,7,\ldots$ ، $X = L\omega$ راکتانس سلف، V ولتاژ دو سر TCR و n مرتبه هارمونیک می باشند. همچنین کل هارمونیک تولید شده را می توان با رابطه زیر بیان کرد :

❖ $I = [\sum I]$

- The most common harmonic index, which relates to the voltage waveform

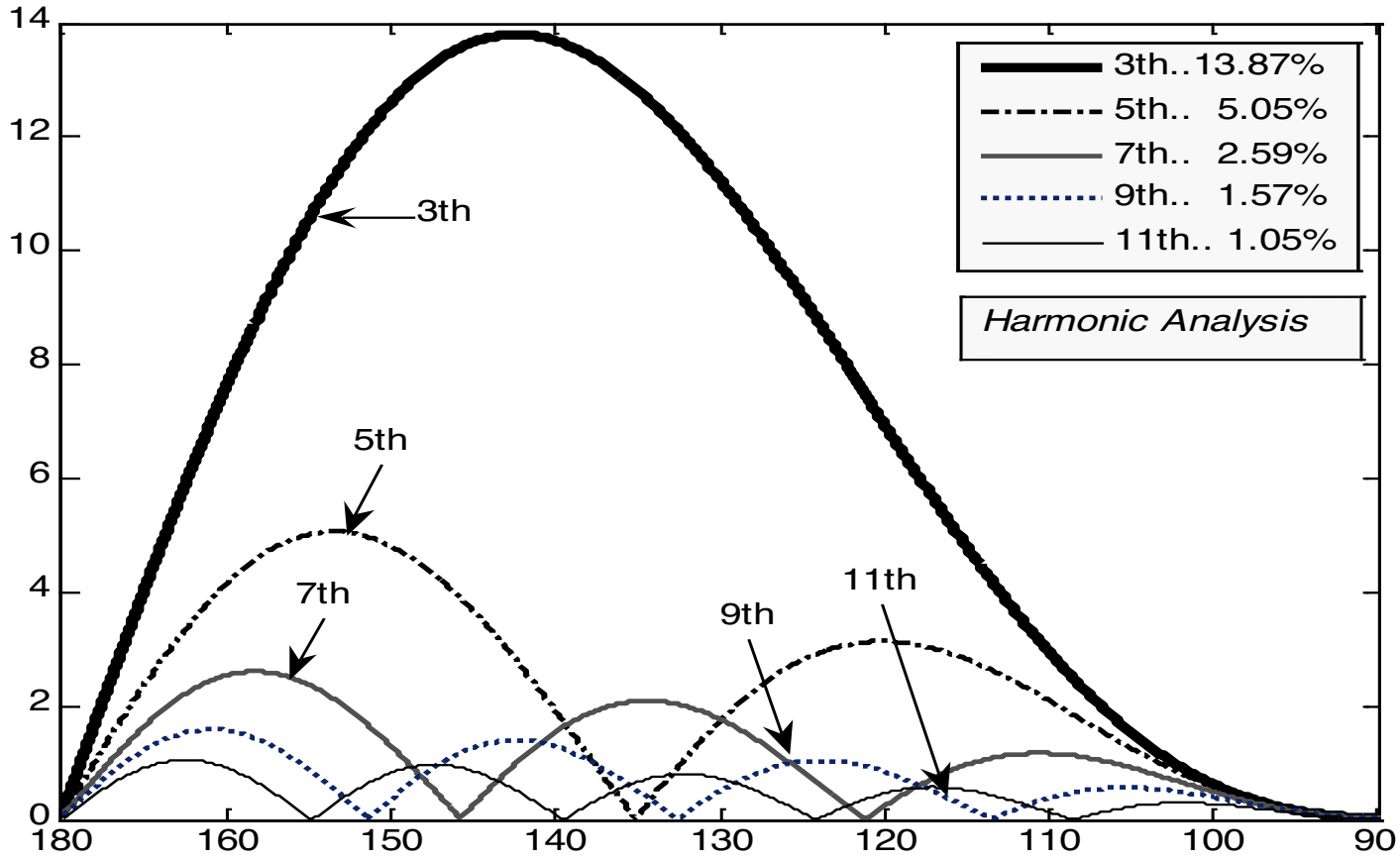
$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} V_n^2}}{V_1}$$

- total demand distortion (TDD) factor

$$\text{TDD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} I_n^2}}{I_R}$$

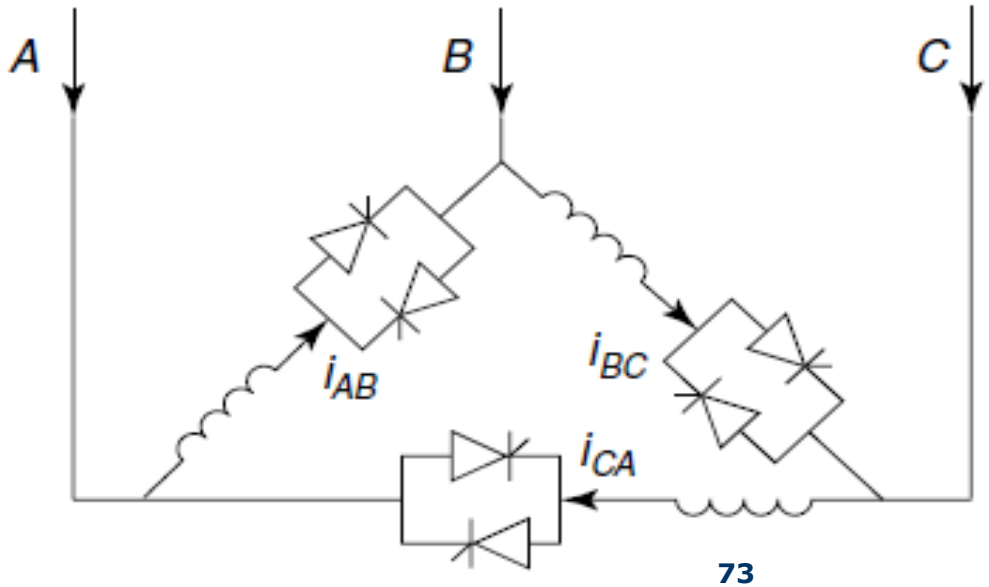
شکل موج مربوط به هارمونیکهای سوم ، پنجم ، هفتم ، نهم و یازدهم جریان TCR

❖ماکزیمم دامنه جریان های هارمونیکی در یک زاویه یکسان رخ نمی دهد.



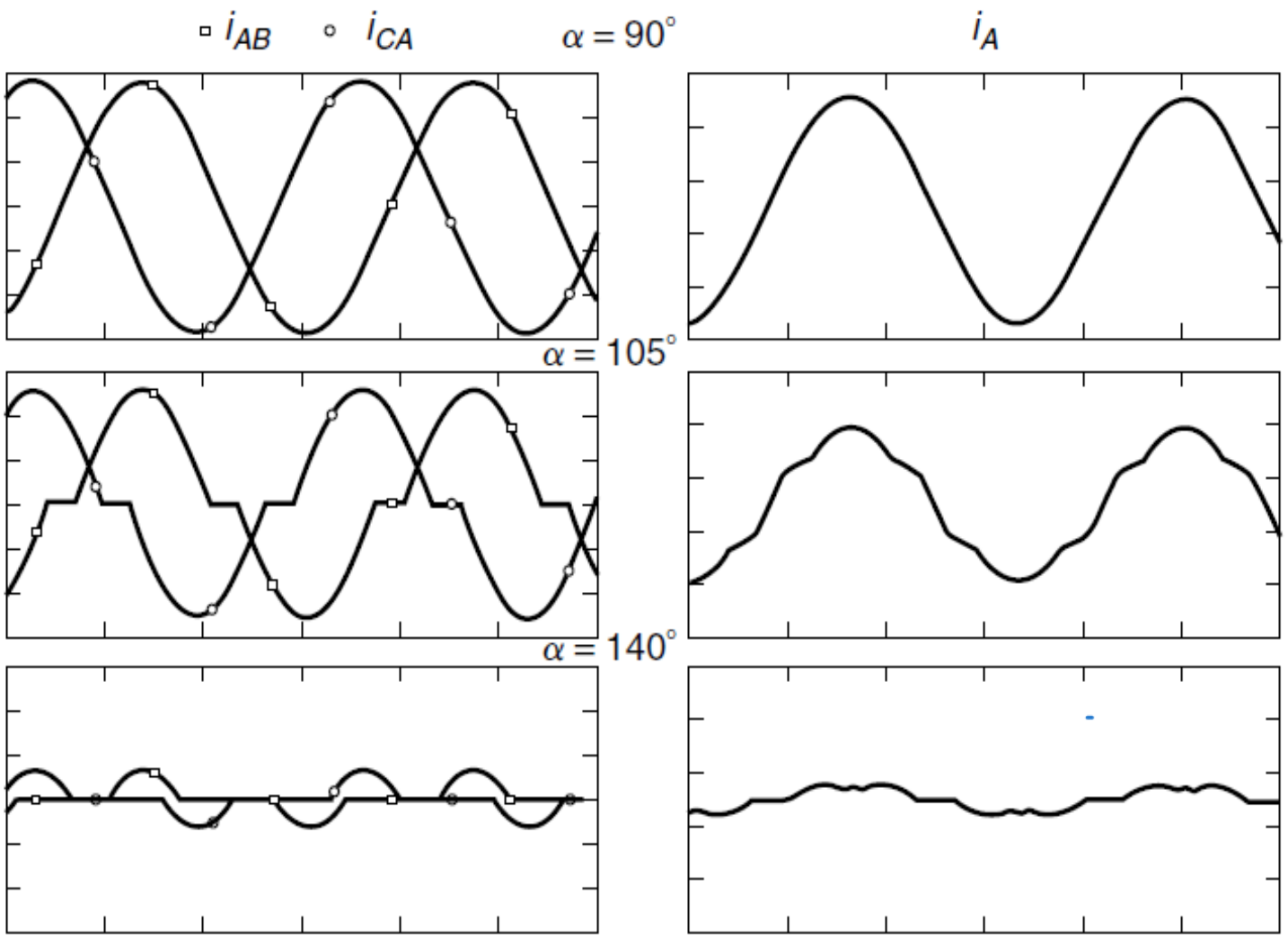
TCR در سیستم های سه فاز

❖ برای سیستم سه فاز، که در آن سه TCR تکفاز بصورت مثلث بسته شده اند، ترجیح داده می شود. وقتی سیستم قدرت در شرایط متعادل باشد، منجر به حذف هارمونیک سوم و مضارب آن (هارمونیکهای ۹ ، ۱۵، ۲۱ ...) در جریان خط می شود. همه این هارمونیک ها در مسیر بسته اتصال مثلث به گردش در می آیند و لذا از جریان خط حذف می گردند.



- $i = a\cos(3\omega t + \varphi)$
- $i = a\cos(3\omega t + \varphi - 3) = a\cos(3\omega t + \varphi - 2\pi)$
- $i = a\cos(3\omega t + \varphi - 3) = a\cos(3\omega t + \varphi - 4\pi)$
- **از معادلات بالا مشخص است که :**
- $i = i = i$
- **در این حالت جریان های خط برابر خواهند بود با :**
- $i = i - i = 0$
- **و بطور مشابه :**
- $i = i = 0$

شکل موج مربوط به جریانهای خط و فاز THD سه فازبا اتصال مثلث برای زوایای مختلف α



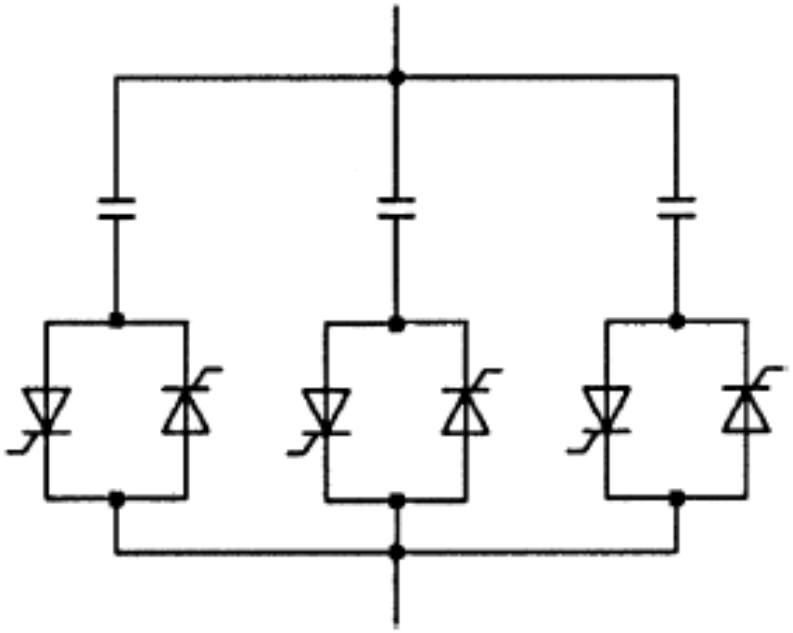
❖اگر هارمونیک های تولید شده توسط TCR با روش های ذکر شده، به میزان کافی قابل کاهش نباشند و شرایط را از نظر اقتصادی یا سایر ملاحظات عملی برآورده نسازند (که معمولاً همین وضع وجود دارد)، از فیلترهای هارمونیکی استفاده می شود. به طور معمول این فیلترها شاخه های LC و RLCسری هستند که به صورت موازی با TCR قرار می گیرند و هارمونیک های مهم، مثل پنجمین، هفتمین و گاهی یازدهمین و سیزدهمین را حذف می نمایند و دارای یک شاخه اضافی فیلتر بالا گذر هستند

مزایا و معایب TCR

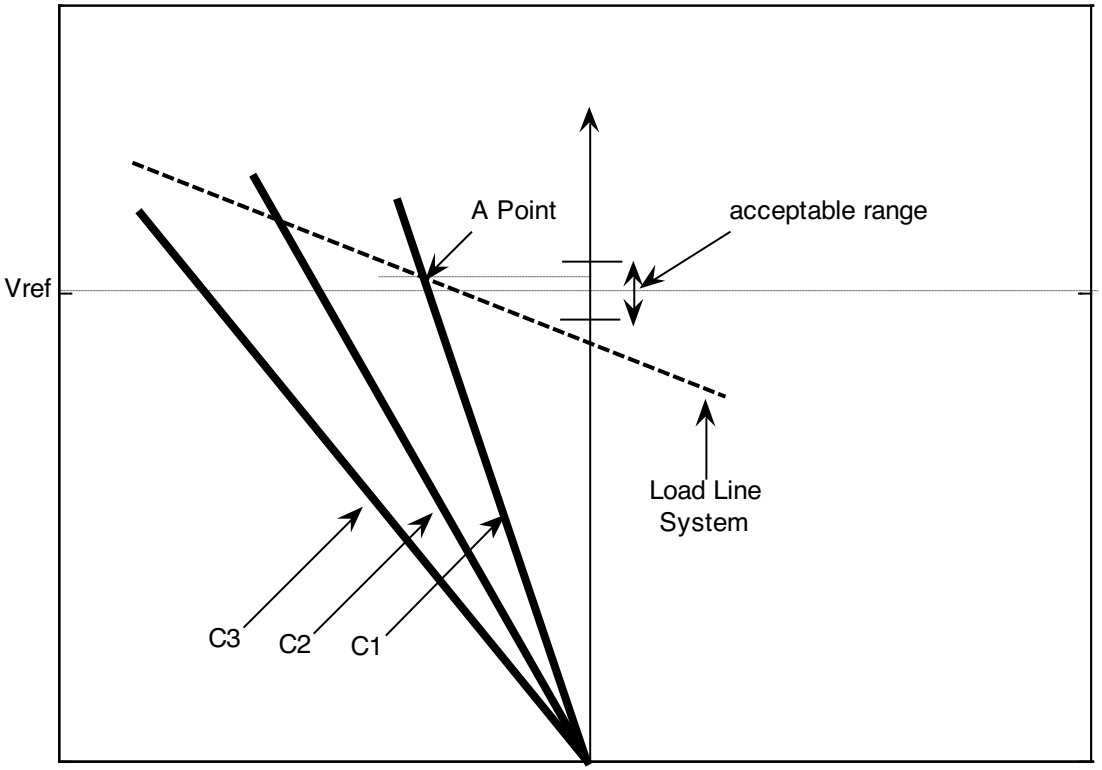
- مزایا
- پاسخ آن سریع است
- قابل کنترل کامل است.
- وقتی خراب می شود به سرعت قابل تعمیر است
- بر سطح اتصال کوتاه اثر نمی گذارد.
- معایب:
- تولید هارمونیک می کند
- رفتارش نسبت به محل قرار گرفتنش حساس است

خازن سویچ شده تایرستوری

- این ساختار شامل یک واحد خازن بصورت سری با یک جفت تریستور دو جهته و یک راکتور کوچک می باشد. استفاده از راکتور در این ترکیب بندی به منظور محدود نمود گذراهای کلید زنی صورت می گیرد. این نوع جبرانگرها جهت پشتیبانی ولتاژ درنقطه اتصال بکار می‌روند و از طریق تزریق توان راکتیو بصورت موازی به سیستم، باعث بهبود پروفایل ولتاژ شده و از این طریق رفتار دینامیکی و گذرای سیستم را در مواجهه با اغتشاشات بهبود می‌بخشند.

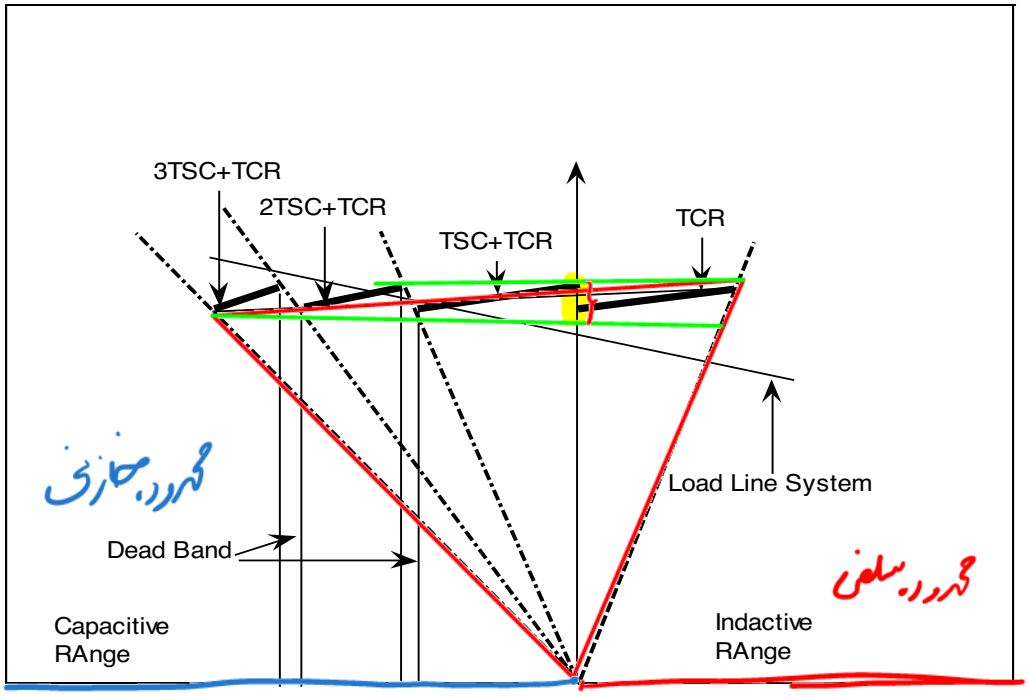


مشخصه ولتاژ – جریان TSC



ساختار و عملکرد TSC/TCR

- این جبران کننده معمولاً از **n** شاخه **TSC** و یک **TCR** بصورت موازی با هم تشکیل شده است.



جبرانگرهای استاتیکی توان راکتیو Static Var Compensator (SVCs)

- بصورت موازی به سیستم قدرت متصل شده
- با جذب و تزریق توان راکتیو قابل کنترل به سیستم، ولتاژ را در سطح معینی تنظیم می کنند.
- با استفاده از سیگنال های کمکی علاوه بر سیگنال های کنترل ولتاژ، پایداری گذرای سیستم و میرایی نوسانات آن را بهبود بخشد.
- این جبران کننده برای اولین بار توسط انستیتو تحقیقاتی توان راکتیو (**EPRI**) به بازار عرضه شد
- در ابتدا این وسیله برای جبرانسازی یک کوره قوس الکتریکی در سال ۱۹۷۲ مورد استفاده قرار گرفت

❖ بطور عمده **SVC** از دو نوع جبران کننده اصلی، خازن های ثابت یا سویچ شده تریستوری و راکتورهای کنترل شده تایریستوری تشکیل شده است. با توجه به نوع ترکیب ، این جبران کننده به دو نوع اصلی زیر تقسیم می شود:

✓ ❖ ۱) راکتور کنترل شونده تریستوری به همراه خازن های ثابت

TCR + FC

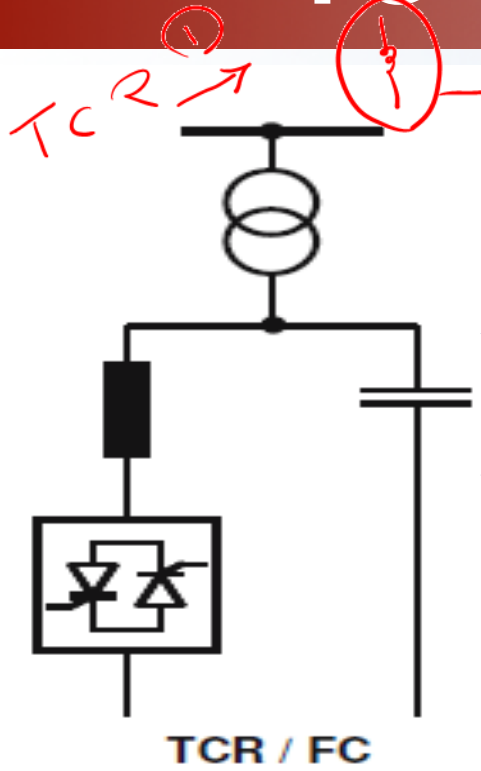
✓ ❖ ۲) راکتور کنترل شونده تایریستوری به همراه بانک های خازنی سویچ شده توسط تریستور

TCR + TSC

راکتور کنترل شونده تایرستوری به همراه خازنهای ثابت

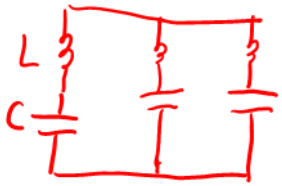
- جبران کننده **TCR** دارای خاصیتی کاملاً اندوکتیوی است که تنها می تواند توان راکتیو را در محدوده پس فازی، بطور پیوسته به میزان توان نامی خود کنترل نماید
- به منظور عملکرد جبران کننده در محدوده پیش فازی علاوه بر پس فازی، نیاز است که **TCR** را با بانکهای خازنی ثابت موازی نمود تا در این حالت قابلیت تزریق توان راکتیو به شبکه در مواقع نیاز را نیز داشته باشد.
- این جبران کننده به جبران کننده **FC-TCR** موسوم است

شمای تک خطی جبران کننده FC-TCR



TCR بایستی دارای ظرفیت بیشتری نسبت به زمانی باشد که به تنهایی مورد استفاده قرار می گیرد این ظرفیت بایستی از ظرفیت مجموع بانک های خازنی بیشتر باشد تا علاوه بر جذب توان راکتیو تولیدی از سیستم در شرایط بی باری یا کم باری، قادر به جذب توان اضافی تولید شده توسط بانک های خازنی نیز باشد. بنابراین در جبران کننده FC-TCR ، TCR با ظرفیت بسیار بالا انتخاب می گردد.

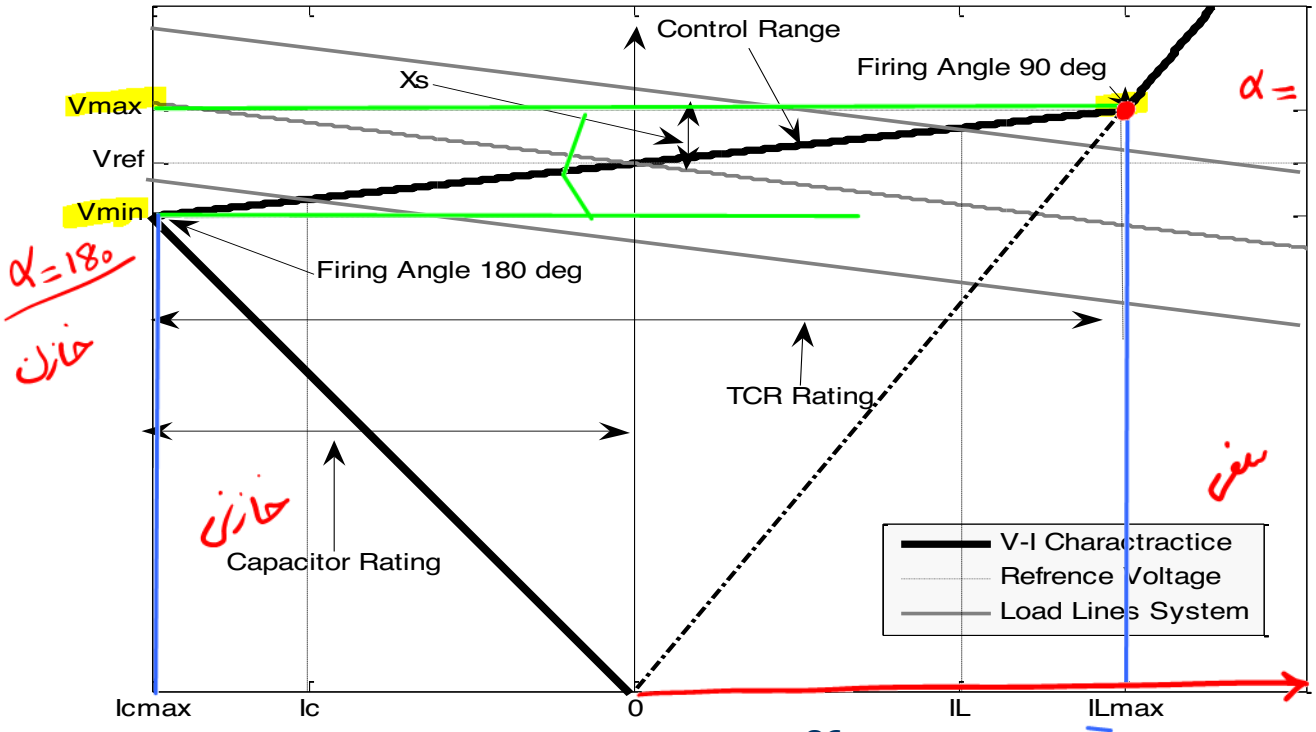
- اثر افزودن خازن های ثابت به مدار **TCR** دارای مزیت دیگری نیز هست و آن اینست که با سری نمودن یک راکتور کوچک با هر خازن می توان از آن بعنوان یک فیلتر برای حذف یک هارمونیک مشخص تولیدشده توسط **TCR** استفاده نمود. از آنجا که بانک های خازنی را در چند گروه مستقل معمولاً ۳ یا ۴ گروه بسته به طراحی به سیستم متصل می کنند، لذا هر گروه را می توان برای حذف یک هارمونیک مشخص طراحی نمود و از این طریق تعدادی از هارمونیک های تولیدی توسط **TCR** از جمله هارمونیک های پنجم و هفتم را فیلتر نمود.

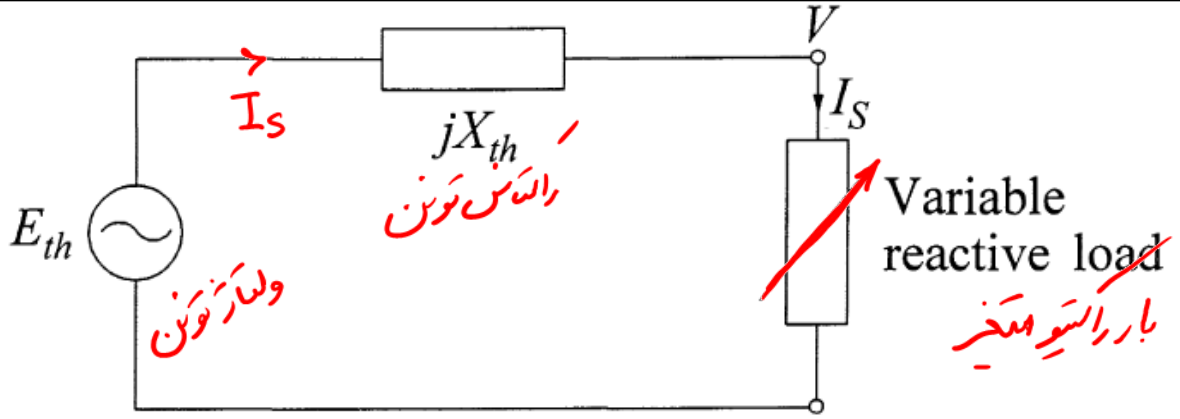


FC-TCR

مشخصه ولتاژ – جریان FC-TCR

- ناحیه کنترلی این مشخصه در سمت پس فازی در حداکثر جریان قابل جذب توسط راکتور (جریان قابل جذب توسط **TCR** در زاویه آتش ۹۰ درجه) و در سمت پیش فازی نیز در جریان تولیدی توسط بانک های خازنی زمانی که راکتور هیچ جریانی را جذب نمی کند(جریان خازنی خالص که در زاویه آتش ۱۸۰ درجه برای **TCR** حاصل می شود) محدود می گردد. در خارج از این محدوده جبران کننده قادر به کنتر ل پارامترهای سیستم نخواهد بود.



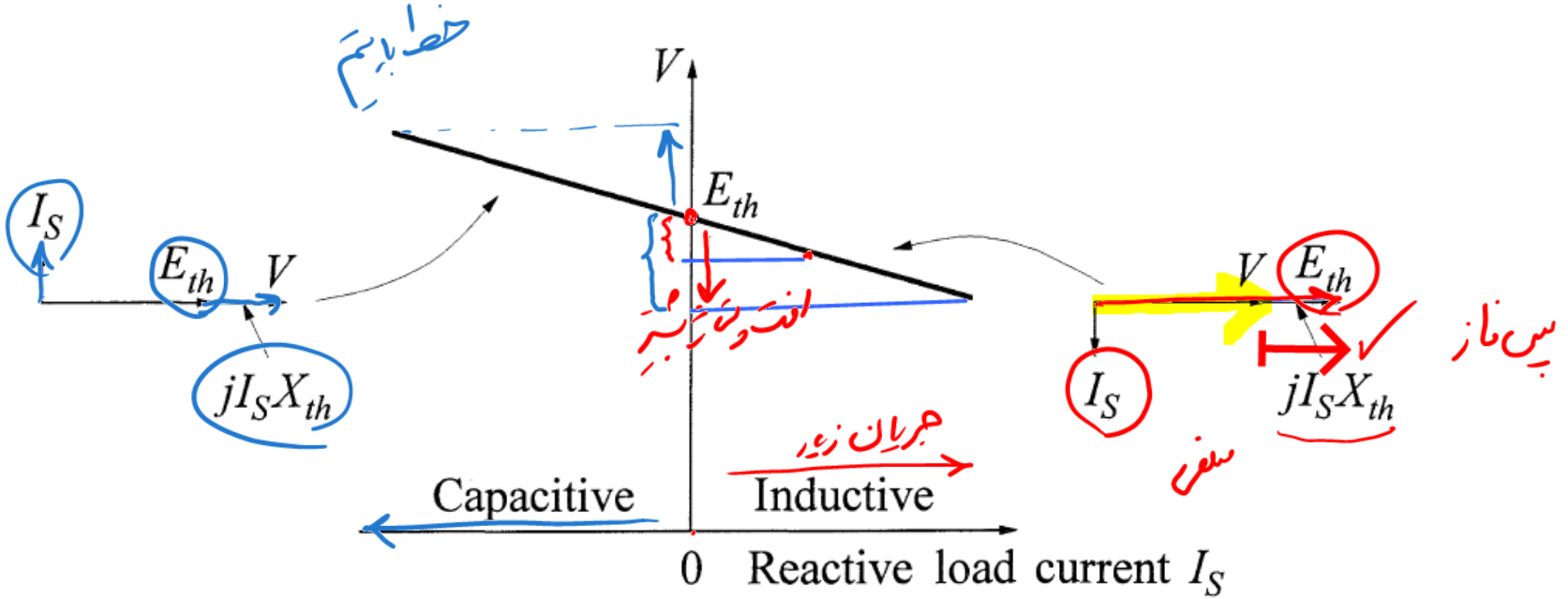


$$V = E_{th} - jX_{th} I_S$$

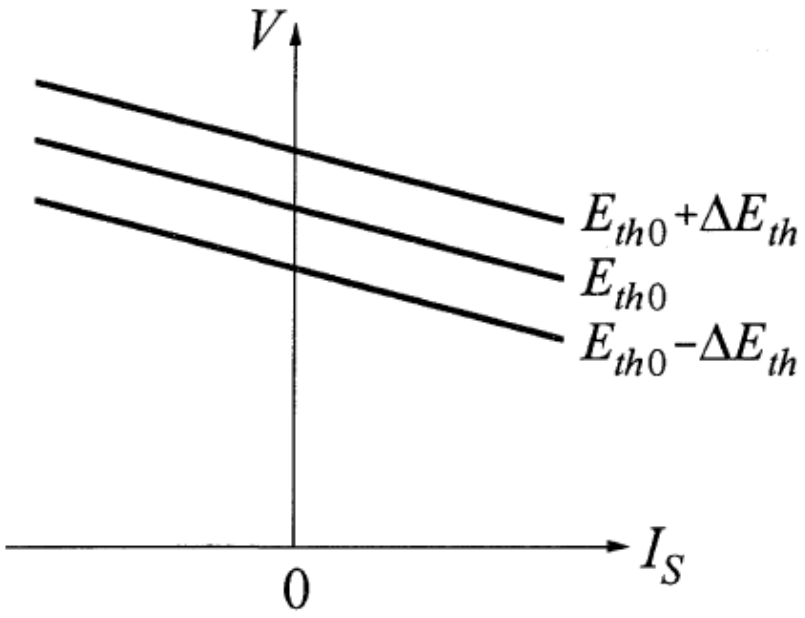
ولتاژ دو سر بار

$I_S = 0 \Rightarrow V = E_{th}$

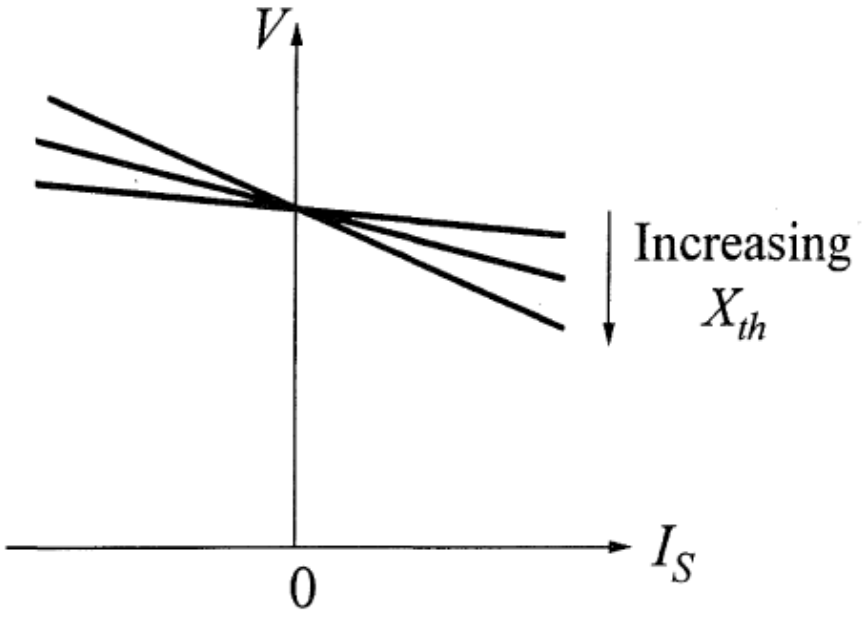
Thevenin equivalent circuit of HVAC network



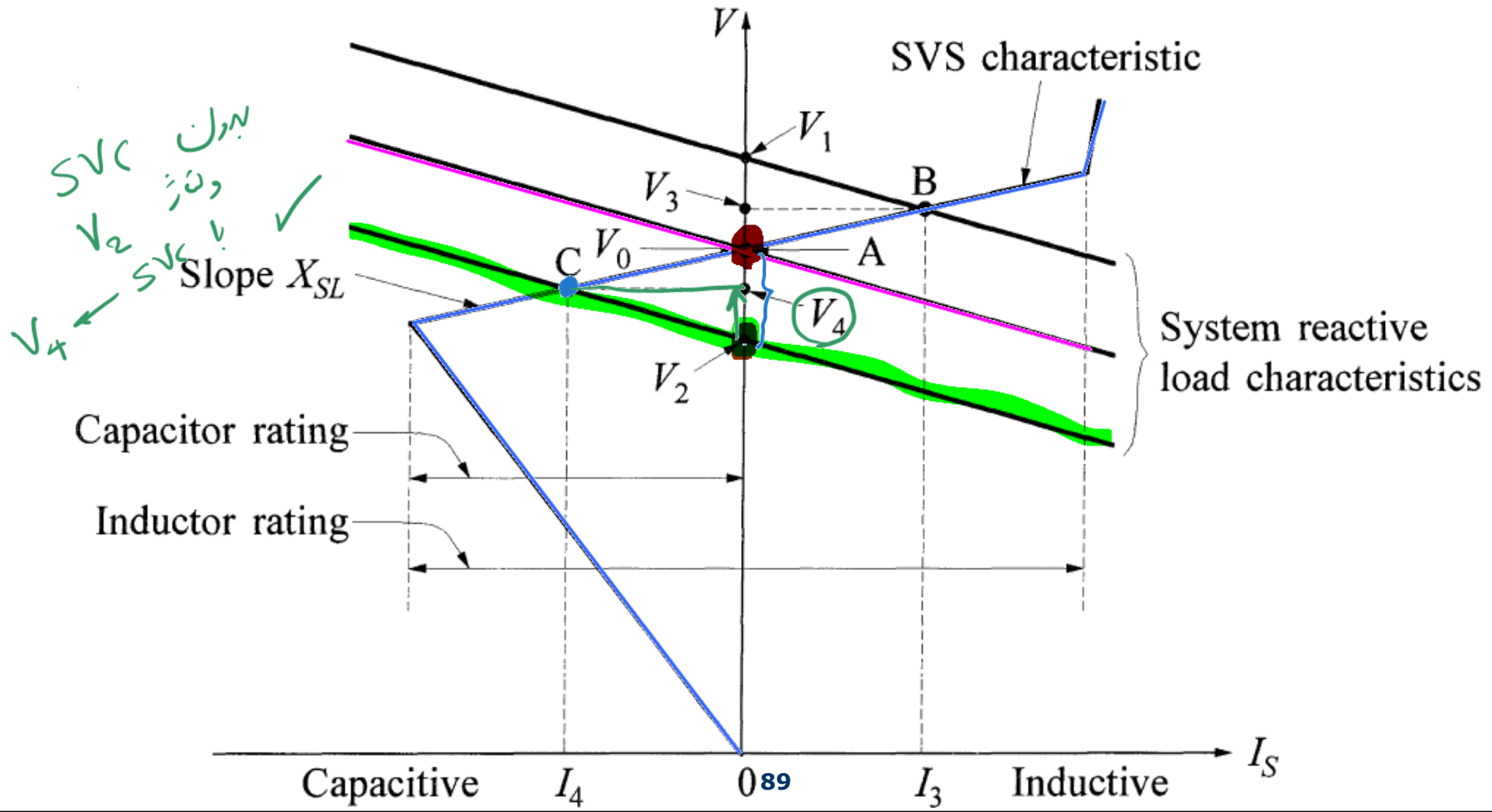
(b) Voltage-reactive current characteristic



(c) Effect of varying source voltage E_{th}



(d) Effect of varying system reactance X_{th}


V
SVS characteristic
V_1
V_3
B
C
V_0
A
Slope X_{SL}
V_4
V_2
System reactive
load characteristics
Capacitor rating
Inductor rating
Capacitive
I_4
0
I_3
Inductive
I_S

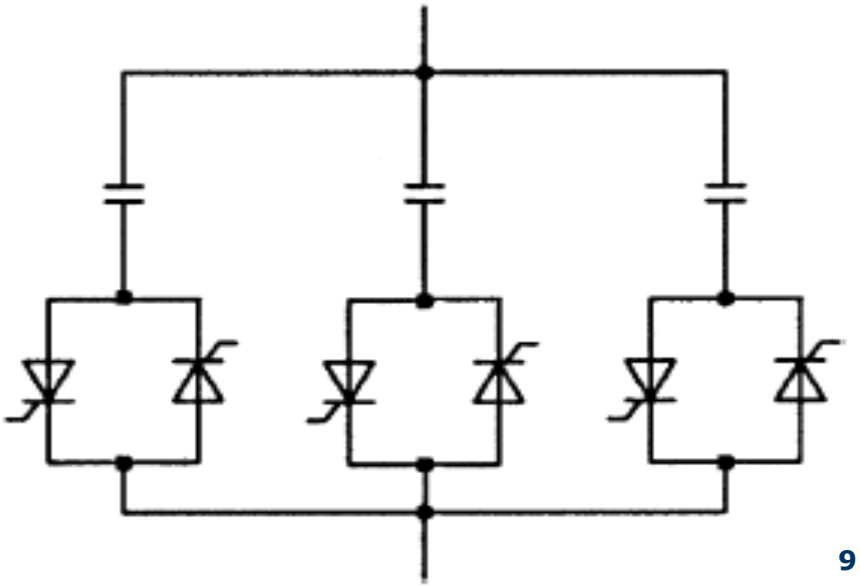
راکتور کنترل شونده تایرستوری به همراه بانک های خازنی سویچ شده تریستوری

- عملکرد انعطاف پذیر جبران کننده در طول اغتشاشات بزرگ و همچنین کاهش تلفات حالت ماندگار بوده است.

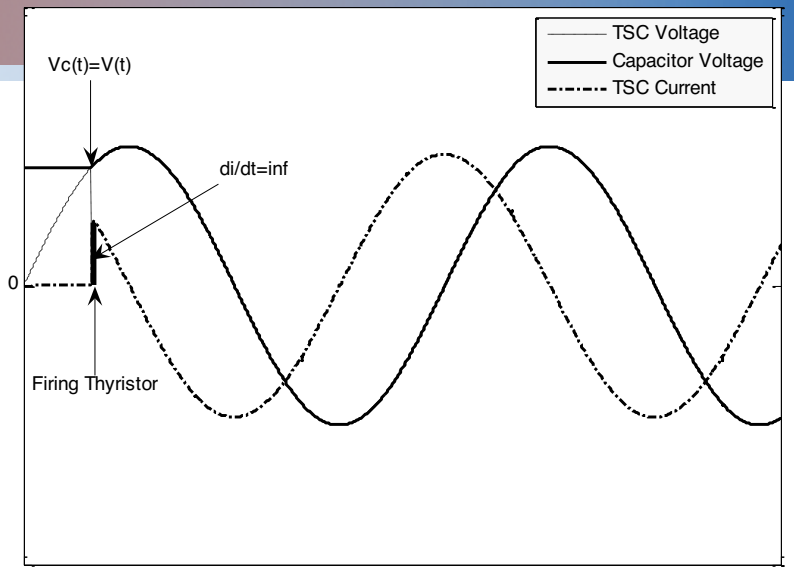
- از جمله معایب دیگر **FC/TCR** آن است که این جبران کننده به مانند یک مدار **LC** عمل کرده و درطول اغتشاشات بزرگ می توان با امپدانس شبکه تشکیل رزونانس دهد. این در حالیست که **TSC/TCR** ها قادرند بلافاصله بعد از بروز اغتشاش، به منظور عدم تولید نوسانات تشدید کننده، از جبران کننده جدا و در لحظه رفع اغتشاش مجدداً وارد مدار گردند

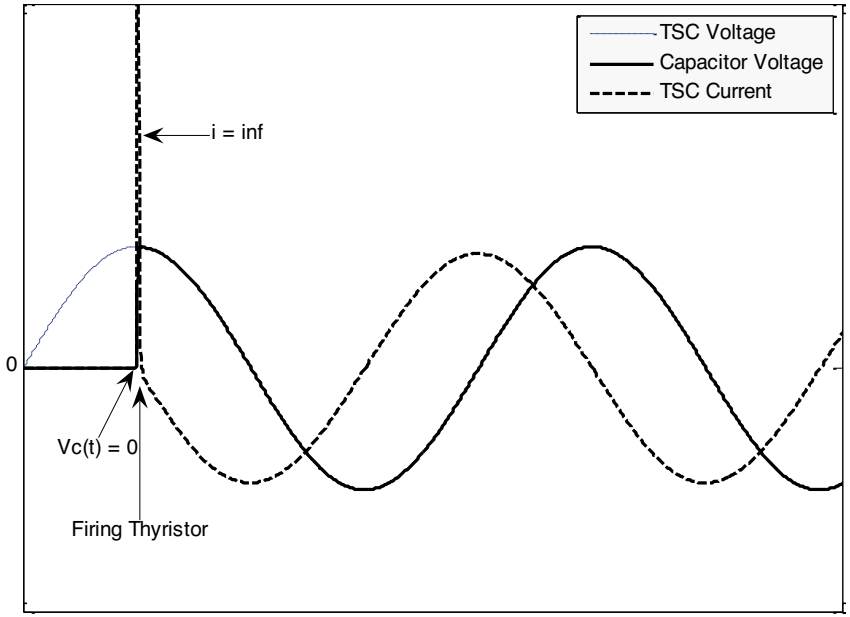
خازن سویچ شده تایرستوری

- این ساختار شامل یک واحد خازن بصورت سری با یک جفت تریستور دو جهته و یک راکتور کوچک می باشد. استفاده از راکتور در این ترکیب بندی به منظور محدود نمود گذراهای کلید زنی صورت می گیرد. این نوع جبرانگرها جهت پشتیبانی ولتاژ درنقطه اتصال بکار می‌روند و از طریق تزریق توان راکتیو بصورت موازی به سیستم، باعث بهبود پروفایل ولتاژ شده و از این طریق رفتار دینامیکی و گذرای سیستم را در مواجهه با اغتشاشات بهبود می‌بخشند.



- هنگامی که یک خازن به منبع ولتاژ سینوسی متصل می شود، در صورتی که ولتاژ اولیه خازن با ولتاژ لحظه ای منبع برابر نباشد، آنگاه جریان ضربه ای بزرگی در مدار ایجاد می گردد. به منظور محدود نمودن این جریان ضربه ای بایستی کلید زنی در لحظه ای صورت گیرد که ولتاژ اولیه خازن با ولتاژ منبع در زمان کلیدزنی برابر باشد. در این حالت اگر کلید زنی درست در لحظه پیک ولتاژ منبع صورت گیرد هیچ گذرایی در ولتاژ و جریان خازن بوجود نمی آید. اما کلید زنی در لحضاتی غیر از این لحظه در صورت برابر بودن ولتاژ خازن با ولتاژ لحظه ای منبع منجر به نرخ تغییرات بسیار بالا در جریان $\frac{di}{dt} \to \infty$ می شود. این امر بدلیل محدودیت در نرخ تغییر جریان تریستورها می تواند برای این ادوات مشکل ساز شود.


TSC Voltage
Capacitor Voltage
TSC Current
Vc(t)=V(t)
di/dt=inf
0
Firing Thyristor

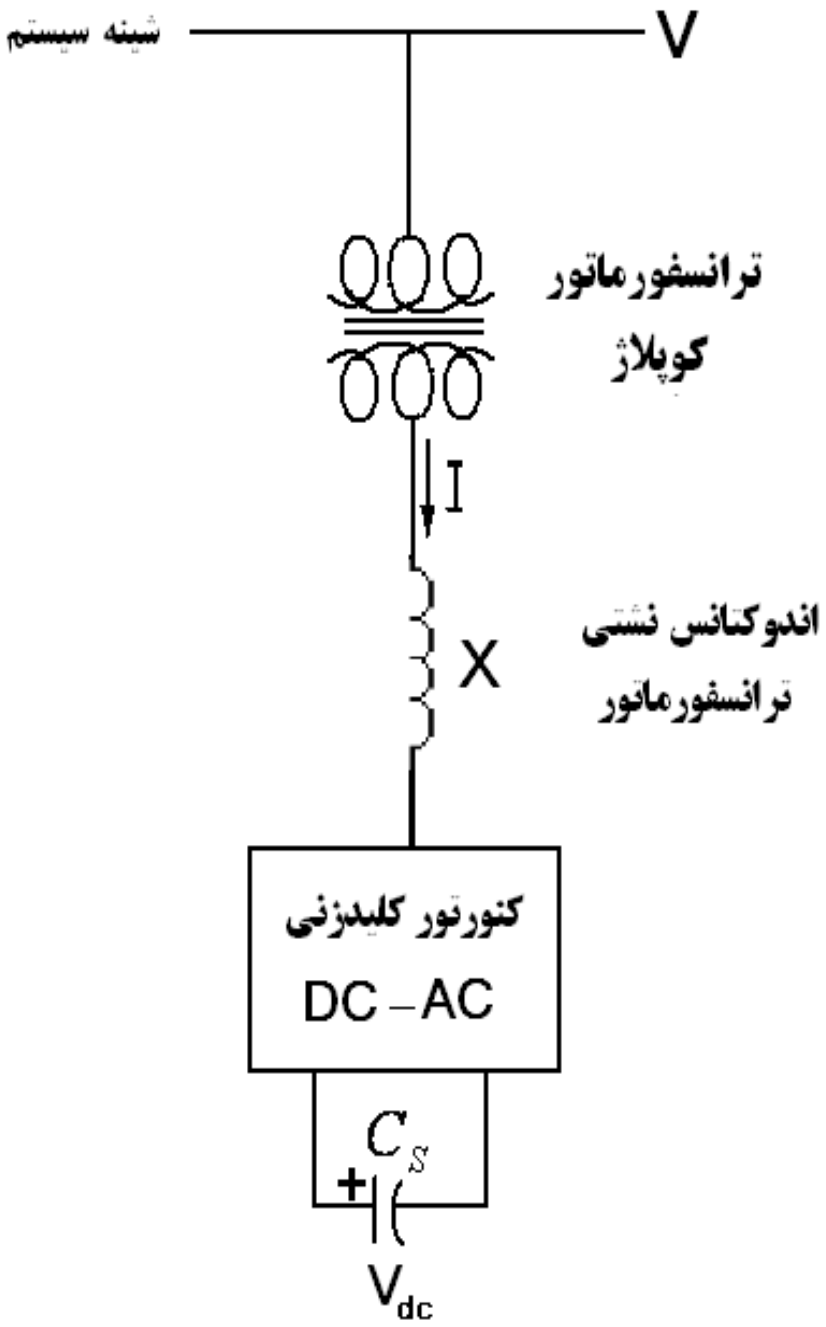

TSC Voltage
Capacitor Voltage
TSC Current
i = inf
0
Vc(t) = 0
Firing Thyristor

کاربردهای SVC

- کنترل اضافه ولتاژهای موقتی(فرکانس اصلی توان)
- جلوگیری از فروپاشی ولتاژ
- تقویت پایدرای گذرا
- تقویت میرایی نوسانات سیستم
- در سیستم توزیع برای متعادل کردن سه فاز در سیستم های با بارهای نامتعادل
- حذف پدیده چشمک زنی ولتاژیا فلیکر(نوسانات سریع ولتاژ)

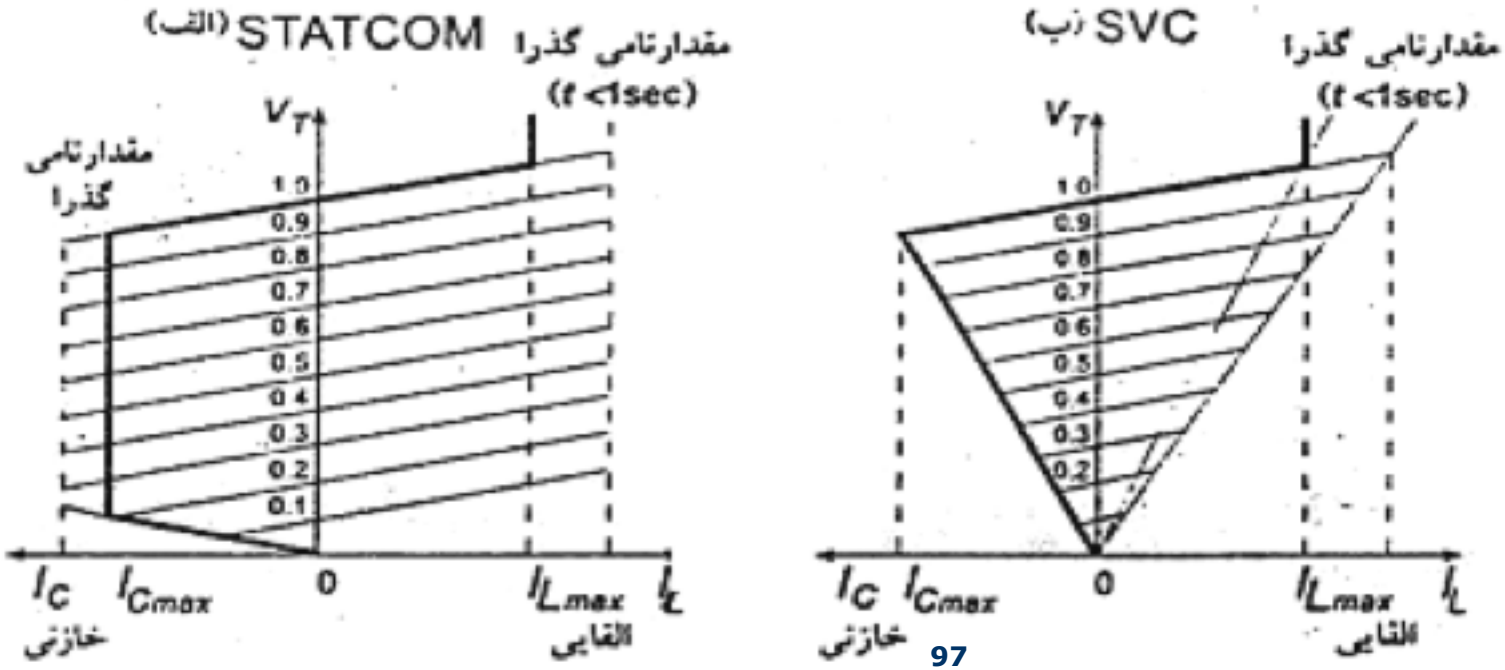
جبران کننده های STATCOM

- امکان تولید توان راکتیو قابل کنترل به صورت مستقیم، بدون استفاده از خازن های ac یا راکتور، و با کلیدزنی متعدد کنورتور های قدرت را «لازلو گایوگی» در سال ۱۹۷۶ آشکار نمود. این کنورتورها dc به ac یا ac به dc بوده و به عنوان منابع ولتاژ و جریان عمل می‌کنند و اساساً توان راکتیو را بدون اجزای ذخیره ساز انرژی راکتیو و با چرخاندن جریان متناوب در میان فازهای سیستم ac، تولید می کنند.

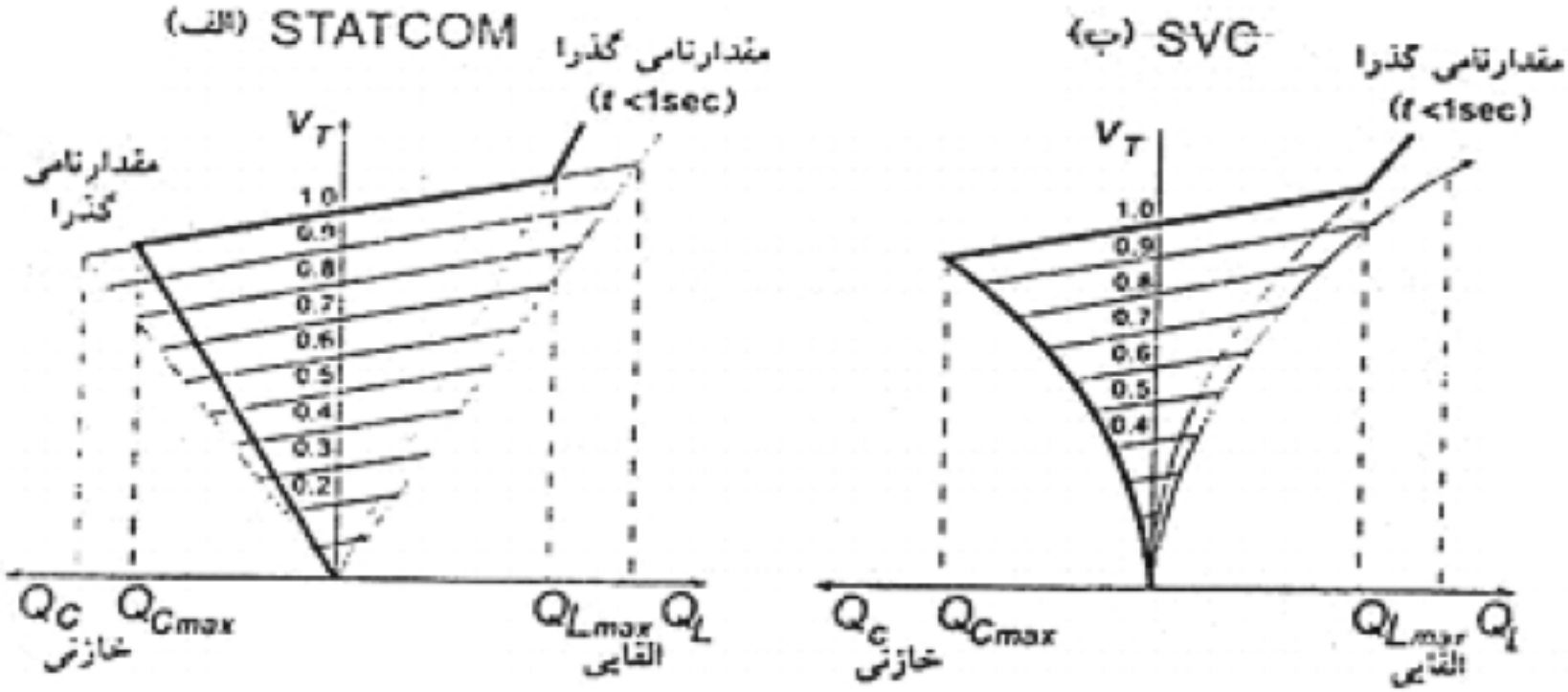


مقدار و زاویه ولتاژ خروجی، دو پارامتر داخلی هستند که جریان حقیقی و راکتیوی را که کنورتور می‌کشد و از آن طریق توان حقیقی و راکتیوی را که کنورتور با سیستم ac مبادله می‌کند، تعیین می‌کنند

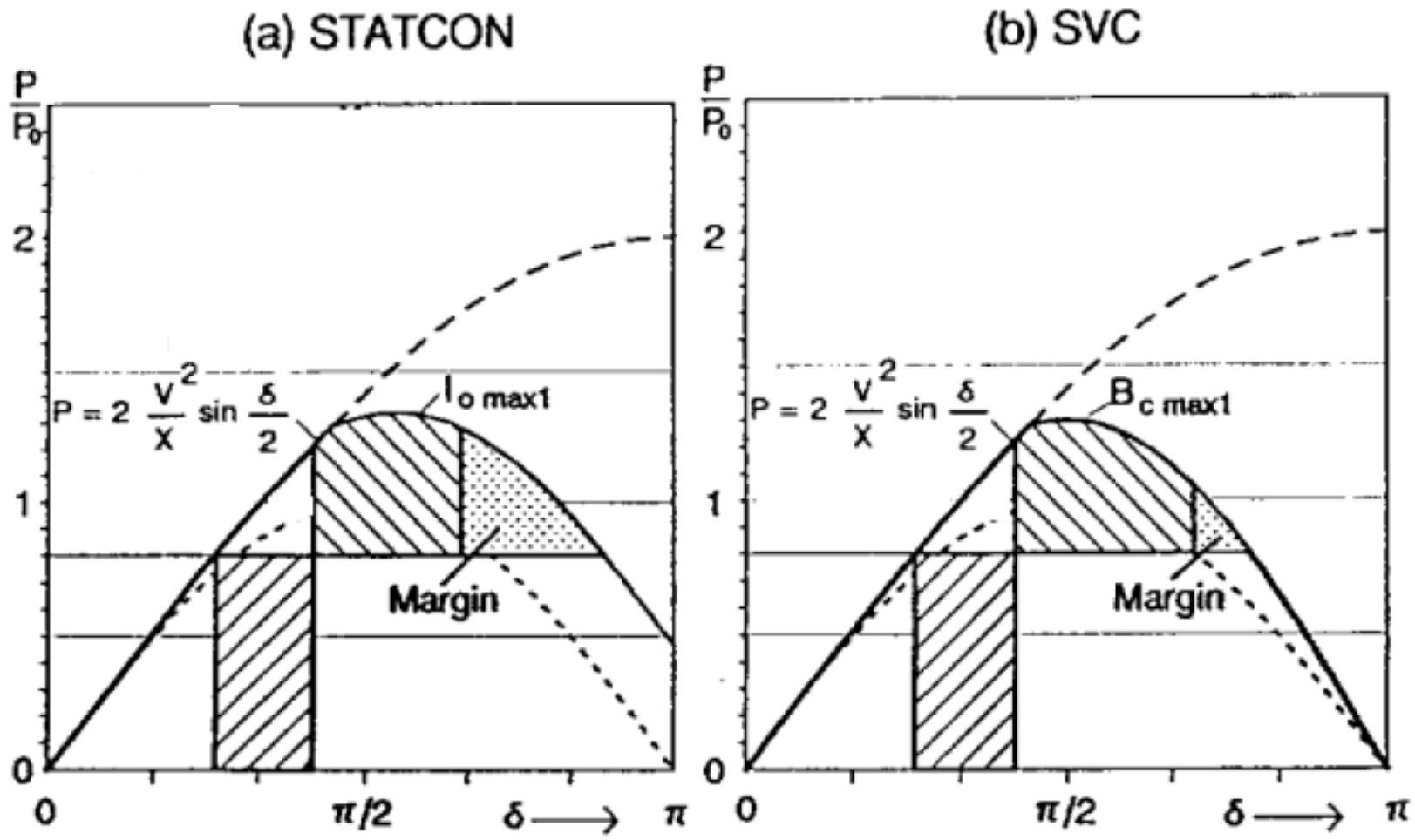
- STATCOM می‌تواند در محدوده کامل جریان خروجی خود، حتی در ولتاژهای بسیار کم از نظر تئوری در حد صفر و نوعاً در حد ۰/۲ پریونیت ولتاژ سیستم کار کند. به عبارت دیگر، حداکثر جریان خروجی خازنی یا القایی STATCOM می‌تواند مستقل از ولتاژ سیستم حفظ شود، و حداکثر توان راکتور تولید شده یا جذب شده به صورت خطی با ولتاژ ac سیستم تغییر می‌کند



- بر عکس **STATCOM** ، **SVC** که از خازن‌ها و راکتورهای سوئیچ شونده با تریستور تشکیل شده، در خروجی تبدیل به یک ادمیتانس خازنی ثابت می‌شود. بنابراین حداکثر جریان جبران سازی قابل وصول **SVC** به صورت خطی با ولتاژ **ac** سیستم کاهش می‌یابد درنتیجه حداکثر توان راکتور خروجی با مجذور این ولتاژ کاهش می‌یابد



پایداری گذرا



- در کاربردهایی که نیاز به جبران سازی توان اکتیو دارند، روشن است که STATCOM بر خلاف SVC می‌تواند واسطه مناسب ذخیره سازی انرژی با سیستم ac، به منظور تبادل توان اکتیو باشد، یعنی این که، STATCOM قادر است توان اکتیو کنترل شده را از یک منبع انرژی (خازن بزرگ، باتری، پیل سوختی، ذخیره‌سازی مغناطیسی ابر رسانا و غیره) از طرف ترمینال dc خود کشیده و آن را به صورت توان ac به سیستم تحویل دهد. هم چنین می‌تواند جذب انرژی از سیستم ac را به منظور شارژ نگه داشتن دستگاه ذخیره ساز، کنترل نماید.

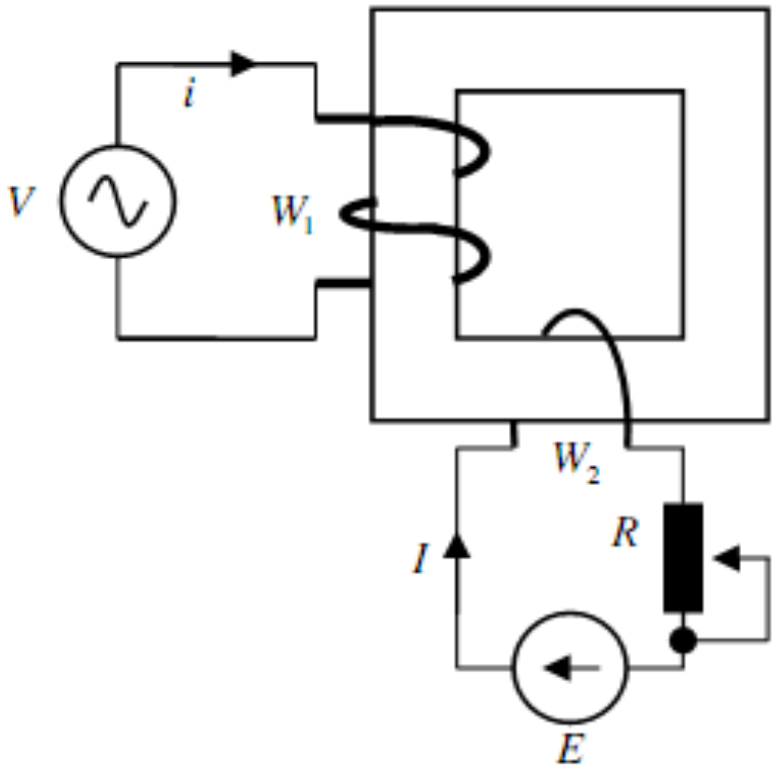
- تبادل توان حقیقی و راکتیو بین STATCOM و سیستم ac می‌تواند مستقل از یکدیگر کنترل شود، و هر ترکیبی از تولید و جذب توان اکتیو و راکتیو قابل وصول است. بنابراین، با تجهیز STATCOM به یک دستگاه ذخیره ساز انرژی با ظرفیت مناسب، راهبردهای فوق‌العاده مؤثر کنترلی برای مدولاسیون توان خروجی اکتیو و یا راکتیو به منظور اصلاح پایداری گذرا و میرایی نوسان توان، می‌تواند به مورد اجرا گذاشته شود

MCR Magnetically controlled reactor راکتورهای کنترل شونده مغناطیسی

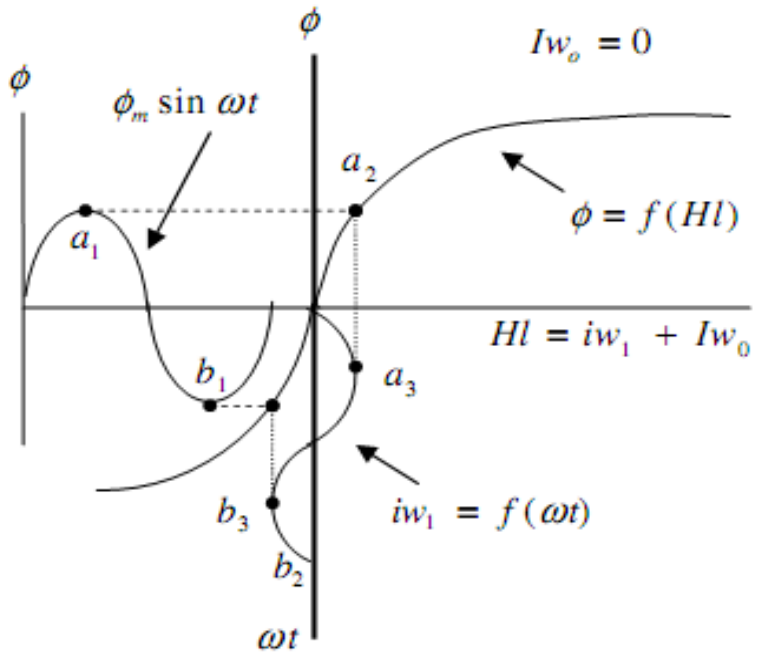
- MCR ها طبق استاندارد IEC، توسط کنسرسیوم راکتورهای الکتریکی قابل کنترل روسیه و اوکراین که به اختصار $CERC$ (*Controllable Electric Reactors Consortium*) نامیده می شود، تولید می گردند.
- MCR با تغییر ضریب نفوذ پذیری مغناطیسی هسته کنترل می شود.
- میزان مغناطیس شدگی هسته آهنی توسط یک جریان dc که به سیم پیچ های کنترل راکتور اعمال می گردد، تنظیم می شود. به عبارت دیگر ظرفیت و جریان خروجی MCR به میزان اشباع شدگی هسته آهنی بستگی دارد که به نوبه خود با جریان DC متناسب می باشد

❖ . عملکرد MCR بر پایه دو اصل مهم بنا شده است. اصل اول در عملکرد این راکتور، تولید و کنترل مولفه مستقیم شار مغناطیسی است که توسط منبع ولتاژDC متصل به سیم پیچ ثانویه MCR صورت می گیرد و اصل دوم عملکرد آن ناشی از اشباع مغناطیسی هسته، تحت شرایط نامی کار این راکتور است.

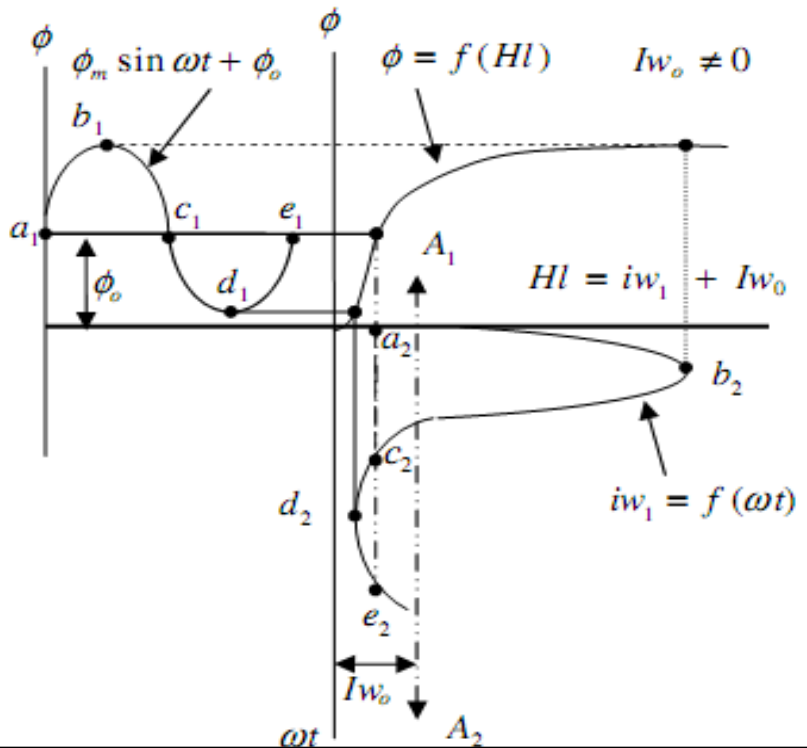
❖ در شرایط عادی که ولتاژ DC متصل به سیم پیچ ثانویه برابر صفر است، MCR در حالت اشباع نیست ولی کم کم با افزایش ولتاژ، MCR به حالت اشباع رفته و جریان راکتور و در نتیجه توان راکتیو تولیدی افزایش می یابد


i
V
W1
W2
R
I
E

❖ اگر ولتاژ DC اعمال شده به سیم پیچ ثانویه صفر باشد ، در این صورت $I = 0$ و همـانطور که در شکل زیر مشخص است تنها جریان، جریان سیم پیچ اولیه i است که این مقدار برابر با جریان بی باری ترانسفورماتور خواهد بود.



❖اگر ولتاژ DC اعمال شده به سیم پیچ ثانویه صفر نباشد ($I \neq 0$)، این جریان DC در هسته، تولید یک شار ثابت ϕ می کند و شار کل برابر با $\phi = \phi \sin \omega t + \phi$ خواهد بود.



مزایای MCR :

۱- MCR از قابلیت اعتماد بالا و نحوه عملکرد ساده ای برخوردار می باشد و همچنین نگهداری و مراقبت از آن همانند ترانسفورماتورهای عادی می باشد ولی TCR از نحوه عملکرد ساده ای برخوردار نیست و نیاز به پرسنل آموزش دیده و متخصص و فیلترهای الکتریکی متعددی دارد .

۲- بررسی عملکرد ۴۰ عدد MCR در طی مدت ۲۰ سال نشان داده است که هیچکدام از آنها نیاز به جایگزینی و تعویض نداشته اند، به دلیل اینکه MCR درون یک محفظه بسته قرار گرفته و این گونه سیستم های مغناطیسی محافظت شده، تحت تاثیر آسیب های مکانیکی ناشی از رژیم های دینامیکی قرار نمی گیرند. از طرف دیگر TCR ها در یک محیط باز قرار می گیرند و سیستم های محافظت نشده دچار برخی آسیب های مکانیکی ناشی از رژیم های دینامیکی می گردند و به همین علت معمولاً عمر یک TCR بیشتر از ۱۰ سال نیست.

۳- MCR می‌تواند ۵۰ درصد اضافه بار را تا مدت ۲۰ دقیقه و ۱۰۰ درصد افزایش بار را برای مدت ۲۰ ثانیه تحمل نماید ، در صورتی که بررسی TCR نشان می دهد که این راکتور قابلیت تحمل ۵۰ درصد افزایش بار را برای مدت ۲۰ ثانیه و ۱۰۰ درصد افزایش بار را فقط برای مدت زمان ۳ ثانیه دارا می باشد

۴- حد اضافه ولتاژ در یک MCR تا ۳/۲ برابر ولتاژ نامی آن می باشد اما این مقدار برای یک TCR تا ۸/۱ برابر ولتاژ نامی آن می باشد . این مطلب بیانگر آنست که MCR محدوده عملکرد کاری وسیع تری نسبت به TCR به عنوان یک راکتور و تنظیم کننده ولتاژ دارد.

- ضریب اعوجاج (تغییر شکل) جریان که از آن به عنوان هارمونیک کل (THD) نیز یاد می شود برای MCR کمتر از ۳ درصد (در شرایط مطلوب) و برای TCR در حدود۵/۸ درصد است.
- MCR نیاز به اپراتورهای ویژه و پرسنل ایستگاه نگهداری جهت سرکشی و نظارت بر سیستم خنک کننده تریستورها ندارد. اما در مقابل، TCR به تعدادی تکنسین جهت سرکشی و نظارت بر سیستم پیچیده خنک کننده آب دارد.
- MCR برای استقرار و نصب به فضایی باز در حدود 10⁄)تقریبا ۳/۳ متر مربع به ازای هر مگاوار تولید (احتیاج دارد در حالی که TCR باید در محدوده ای به مساحت 100⁄ مستقر گردد . به عبارت دیگر فضایی که یک TCR اشغال می کند ۱۰برابر فضایی است که یک MCR در بر می گیرد.

❖ ❊ تلفات داخلی توان در یک MCR ، نصف تلفات داخلی TCR است . این تلفات ٪ ۵ صدم کیلووات به ازای هر کیلووار توان راکتیو نامی در حالت بی باری آماده به کار و ٪ پنج دهم درصد کیلووات به ازای هر کیلووار توان راکتیو نامی در بار کامل است . تلفات داخلی TCR حدود ۲ برابر این مقدار است .

- MCR می می‌تواند گونه ای طراحی شود که همانند TCR در زمانی حدود ۰/۰۲ ثانیه عکس العمل) پاسخ مناسب(را از خود نشان دهد . بنابراین قیمت یک MCR به زمان پاسخ آن بستگی دارد; هر چند یک MCR که کوتاه ترین زمان پاسخ را داراست قیمتی برابر TCR معادل خود یعنی تقریباً همان ۲۰ دلار به ازای هر کیلووار را دارد ، با این وجود برای بیشتر شبکه های نمونه، زمان پاسخ مناسب حدود ۱ ثانیه است که قیمت یک MCR با چنین ویژگی نصف مقدار یک TCR یا حدودا ۱۱-۰۱ دلار به ازای هر کیلووار می باشد .
- * هزینه نصب ، اپراتورهای عمل کننده و نگهداری و تعمیر MCR تقریبا نصف TCR است .
- * مهم تر از تفاوت قیمت این دو جبران کننده، قابلیت اعتماد محض این تکنولوژی جدید نسبت به همتای قدیمی اش است .

۲۵ MVA ، ۱۱۰ KV ، سه فاز ، MCR 25/110

LOGO

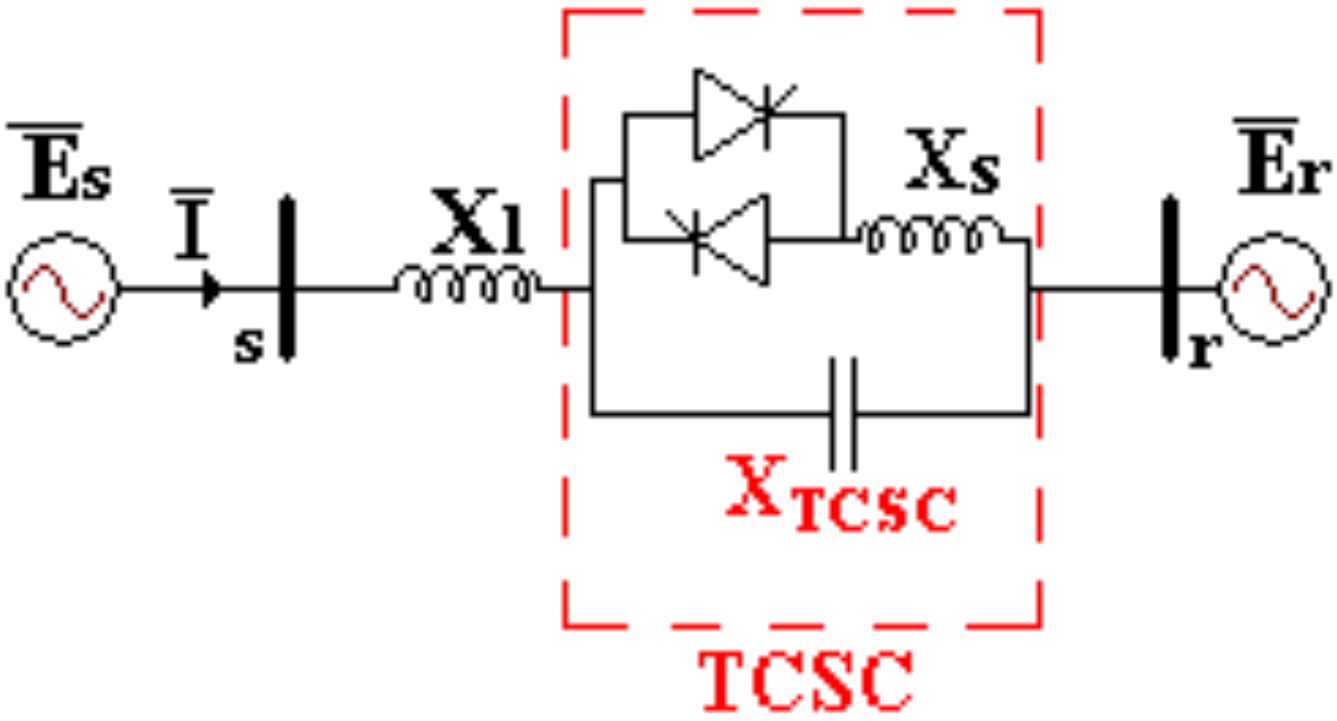
جبران سازی سری

جبران سازی سری

- جبران ساز سری معکوس جبران سازی موازی می باشد.
- جبران ساز موازی، منبع جریان راکتیو کنترل شده است که برای کنترل ولتاژ خط انتقال به صورت موازی به آن منتقل می شود.
- جبران ساز سری، منبع ولتاژ کنترل شده است که برای کنترل جریان خط به صورت سری به آن متصل شده است.

- در جبران سازی موازی پارامتر اصلی مرجع، ولتاژ انتقال است و در جبران سازی سری جریان خط است.

خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)



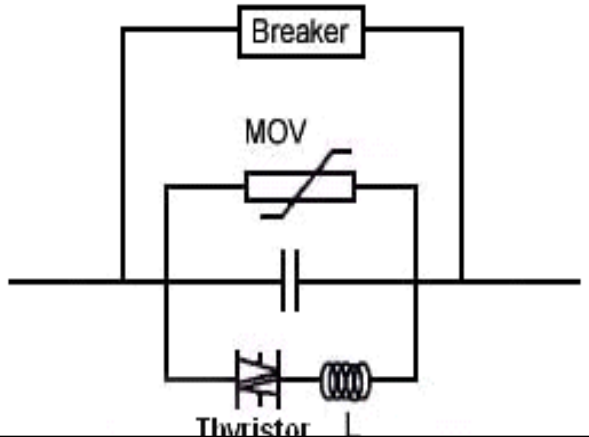
خازن سری کنترل شده با تریستور (TCSC)

معرفی TCSC و محدودیتهای کاری آن

طرح اصلی خازن سری کنترل شده با تریستور ، که در سال ۱۹۸۶ به وسیله ویتایاتیل و دیگران به عنوان تنظیم سریع امپدانس شبکه پیشنهاد شد.

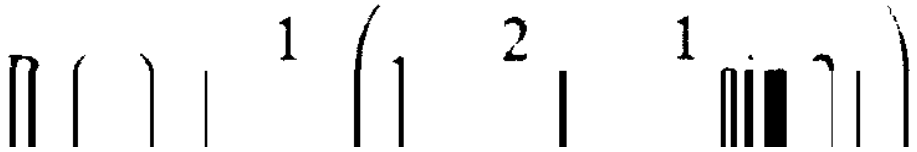
آرایش یک TCSCساده مطابق شکل زیرترکیبی موازی از یک راکتور کنترل شده با تریستور و یک خازن ثابت می باشد که این مجموعه بصورت سری در خط انتقال نصب می‌شود

برای حفاظت در برابر اضافه ولتاژهای گذرا به موازات مجموعه فوق ، یک برقگیر اکسید فلزی (MOV) و نیز یک کلید قدرت قرار داده شده است.



با تغییر زاویه آتش تریستورها ، نسبت ولتاژ به جریان هارمونیک اول ، یعنی راکتانس موثر TCSC تغییر کرده و راکتانس حاصل از موازی شدن سلف متغیر و خازن ثابت ، همانند یک خازن متغیر عمل خواهد نمود.

میتوان نشان داد که سوسپتانس شاخه سلف سری شده با تریستورهای موازی معکوس که به اختصار Thyristor Controlled Reactor) TCR) نامیده می‌شود از رابطهٔ زیر بدست می آید:



α زاویه آتش تریستورها

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

راکتانس معادل حاصل از موازی شدن سوسپتانس شاخه TCR با خازن سری ثابت بصورت زیر خواهد شد :

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

- TCSC یک مدار LC قابل تنظیم با جریان خط است که اساساً یک منبع ثابت جریان متناوب محسوب می شود.
- با تغییر امپدانس راکتور کنترل شده ($X_L(\alpha)$ از مقدار حداکثر(بی نهایت) به طرف مقدار حداقل آن (ωL)، TCSC امپدانس حداقل خود را که $X_{TCSC,min} = X_C = 1/\omega C$ را افزایش می دهد تا حالت تشدید موازی که $X_c = X_L(a)$ و $X_{TCSC,max}$ از نظر تئوری بینهایت می شود.

مدهاي كاري TCSC

Blocking mode

هنگامي كه كليدهاي تريستوري روشن نشده اند، جريان خط فقط از خازن عبور كرده و TCSC به منزله يك خازن ثابت است.

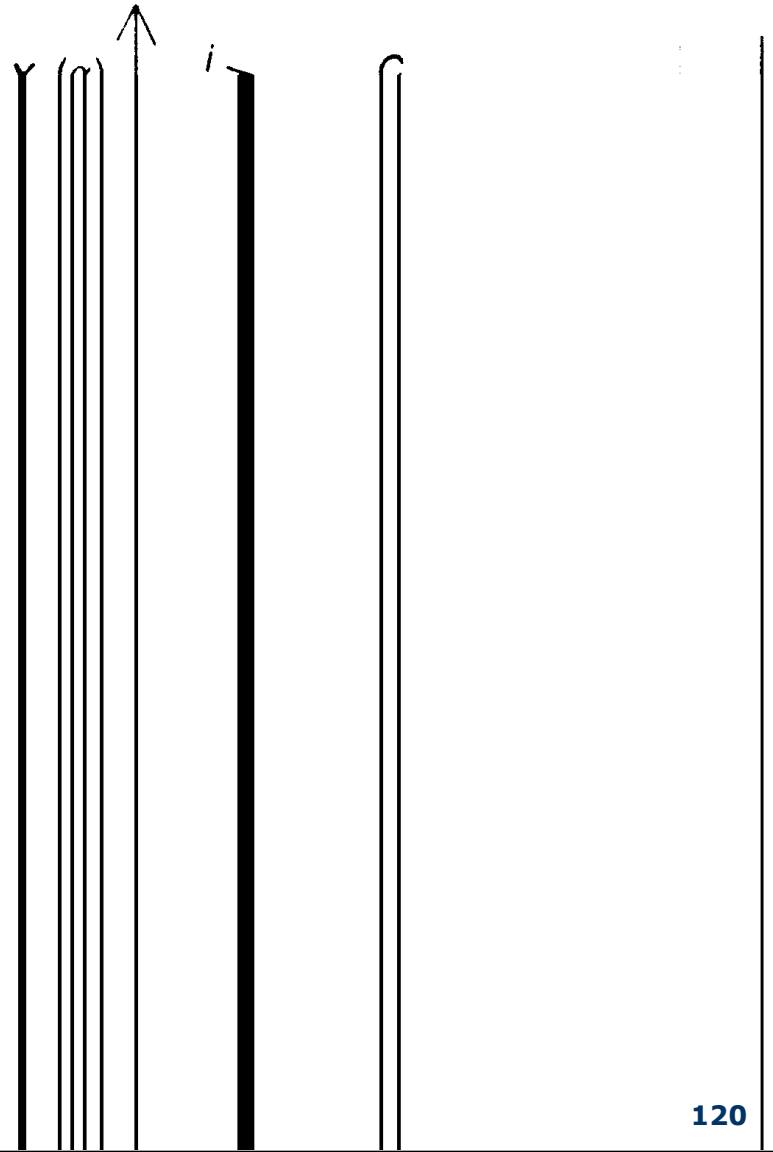
By-pass mode

اگر كليدهاي تريستوري بطور مداوم عمل كنند و در هدايت كامل قرار گيرند (تريستورها در α =90, α =270 درجه روشن شوند.) TCSC به صورت اتصال موازي بانك خازني و راكتور عمل مي‌كند

capacitive boost mode

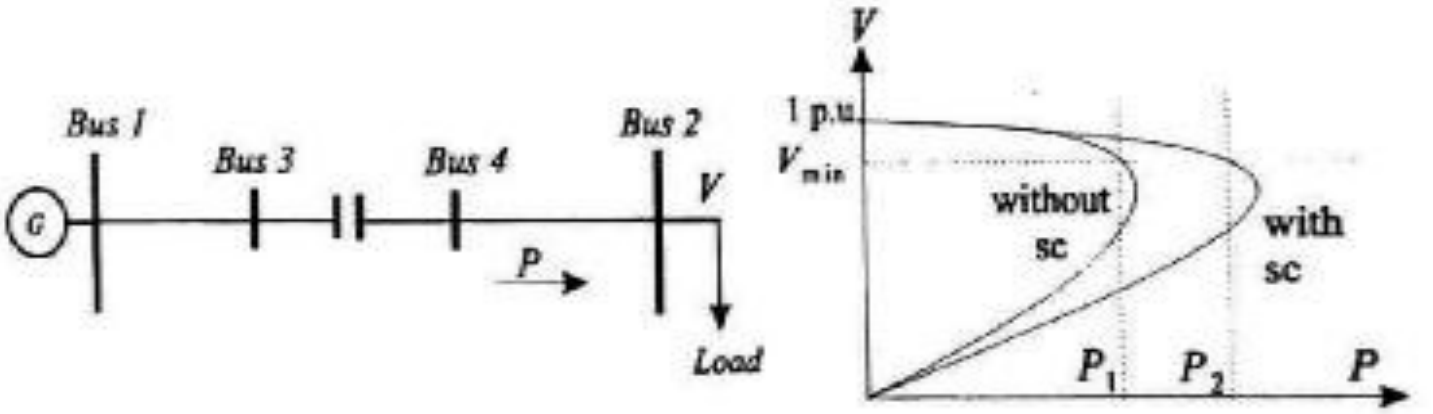
در زاويه آتش α=90 حالت خازني بر سلفي غلبه كرده و مدار حاصل خازني است.هر چه α بزرگتر از 90 باشد، مانند آنست كه ظرفيت هاي خازني بزرگتري در مدار گرفته است.

منحني تغييرات راكتانس معادل TCSC ساده بر حسب زاويه آتش تريستورها

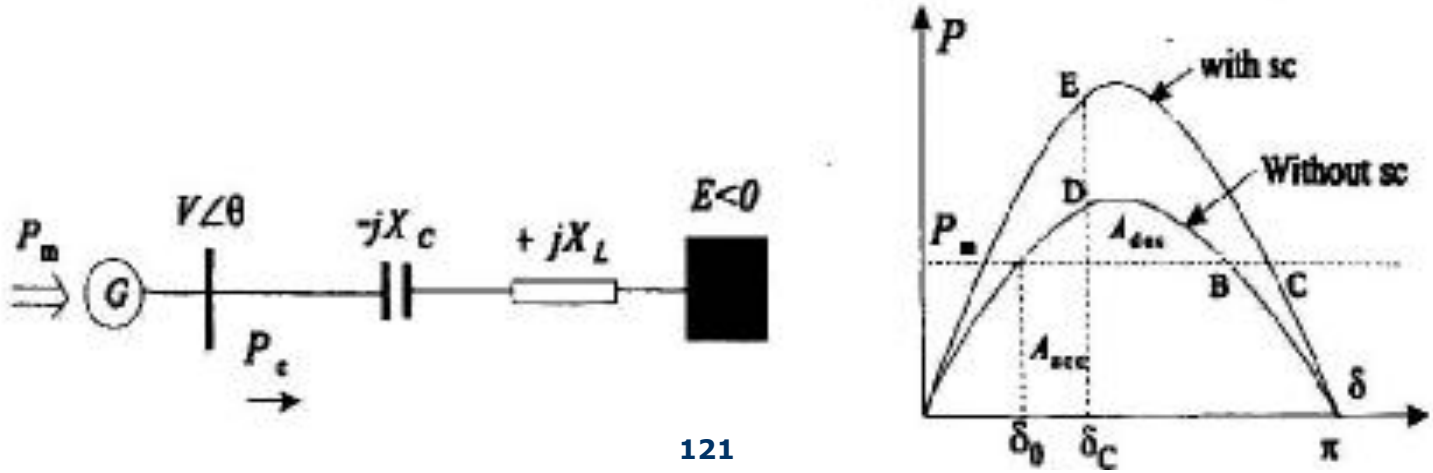


قابليت هاي TCSC

پايداري ولتاژ با نصب خازن سري

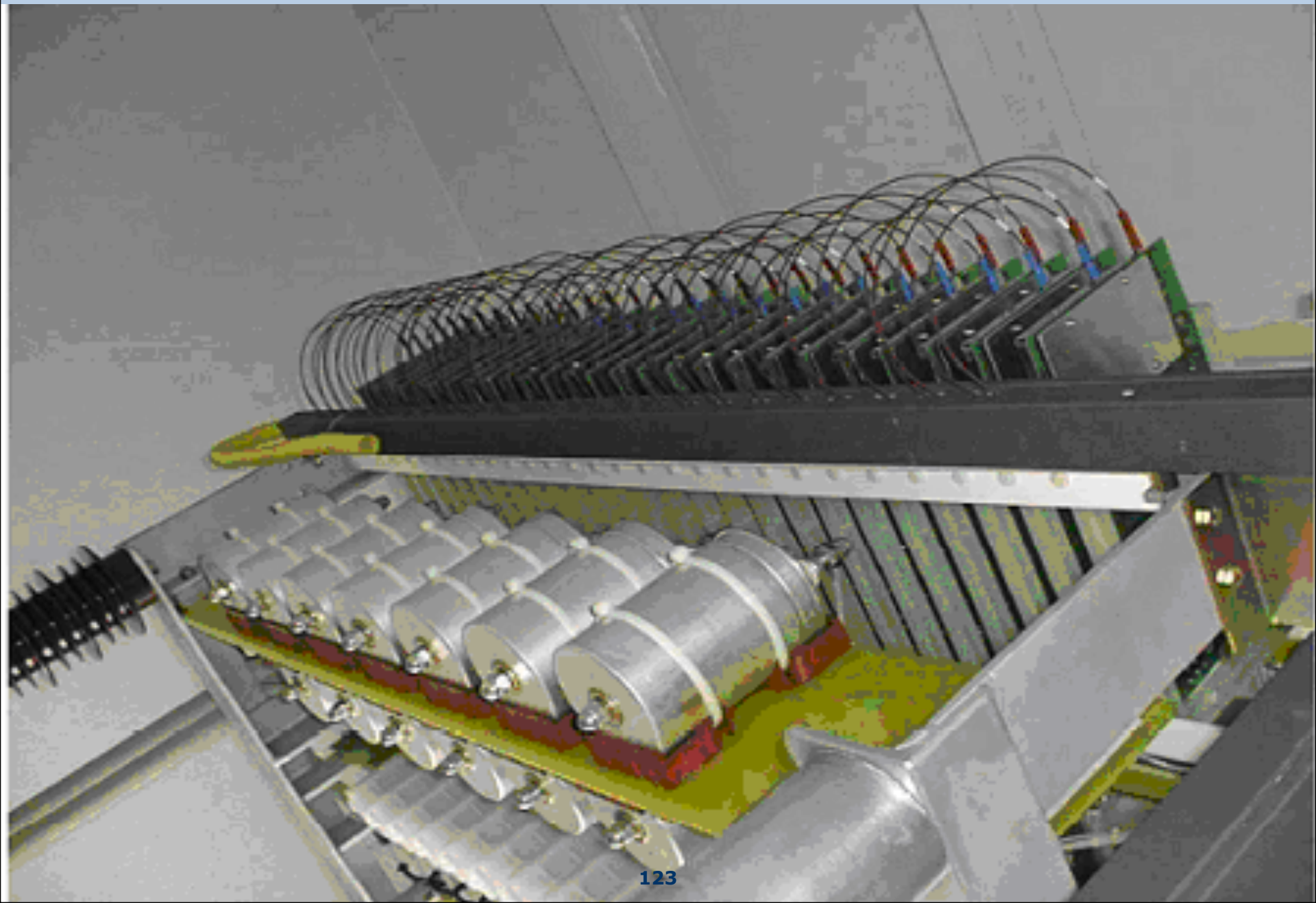


افزايش حاشيه پايداري گذرا با نصب TCSC

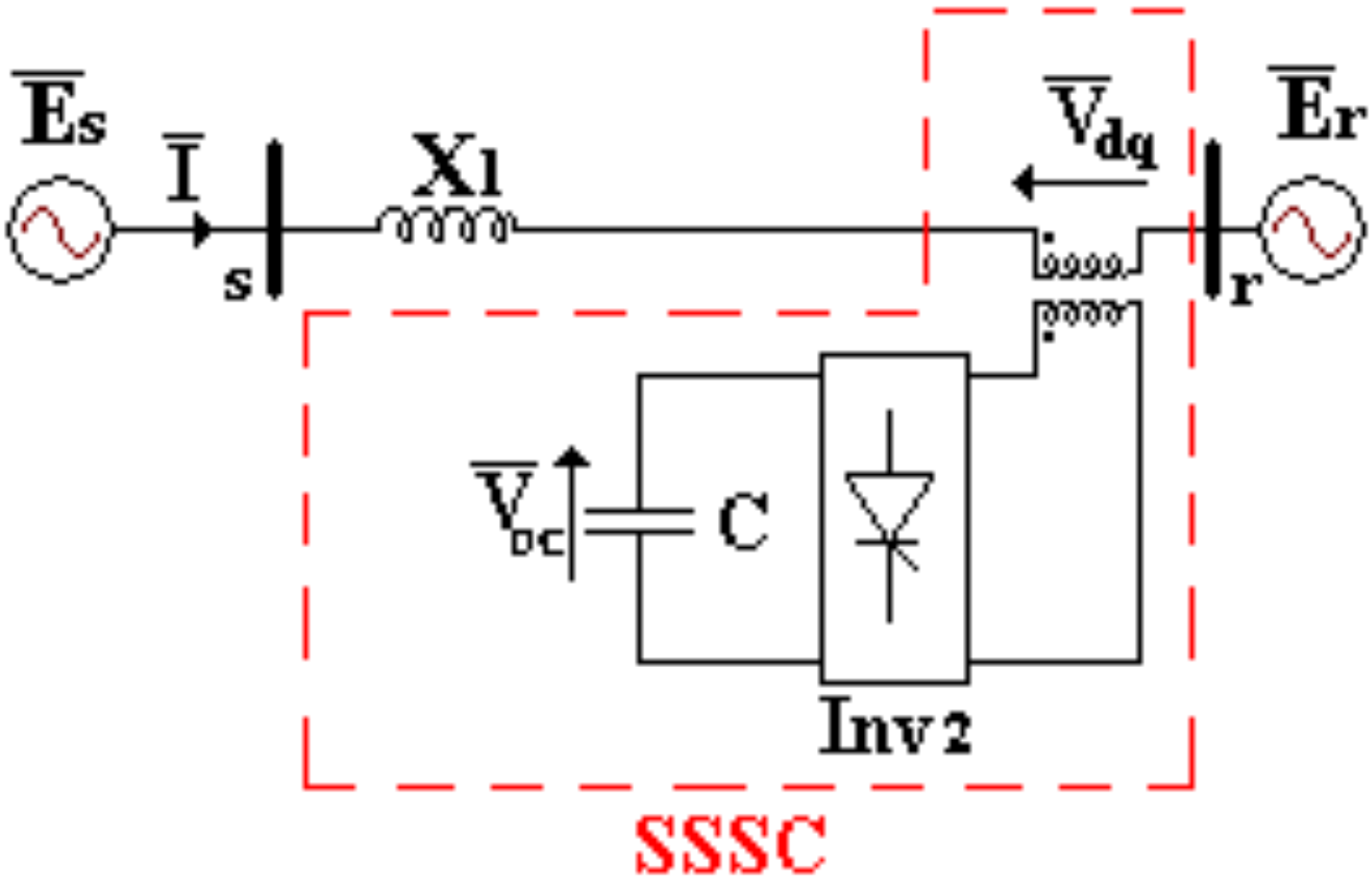


خازن کنترل شده با تریستور

تریستورهایي که با گاز از خازن ها ایزوله شده‌اند(کارتهاي آتش تریستورها نشان داده نشده است)

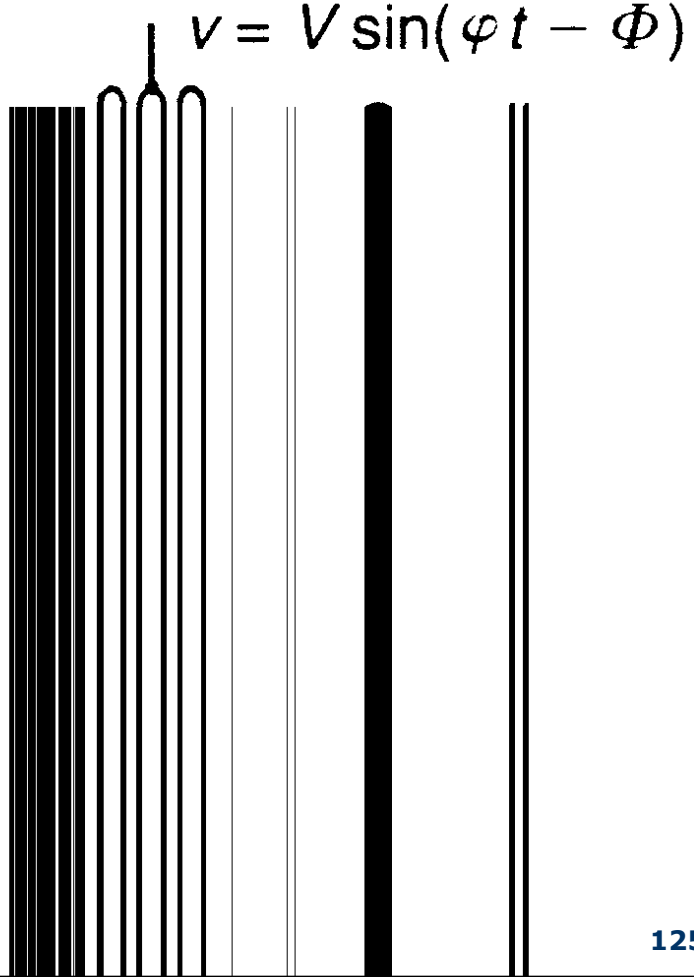


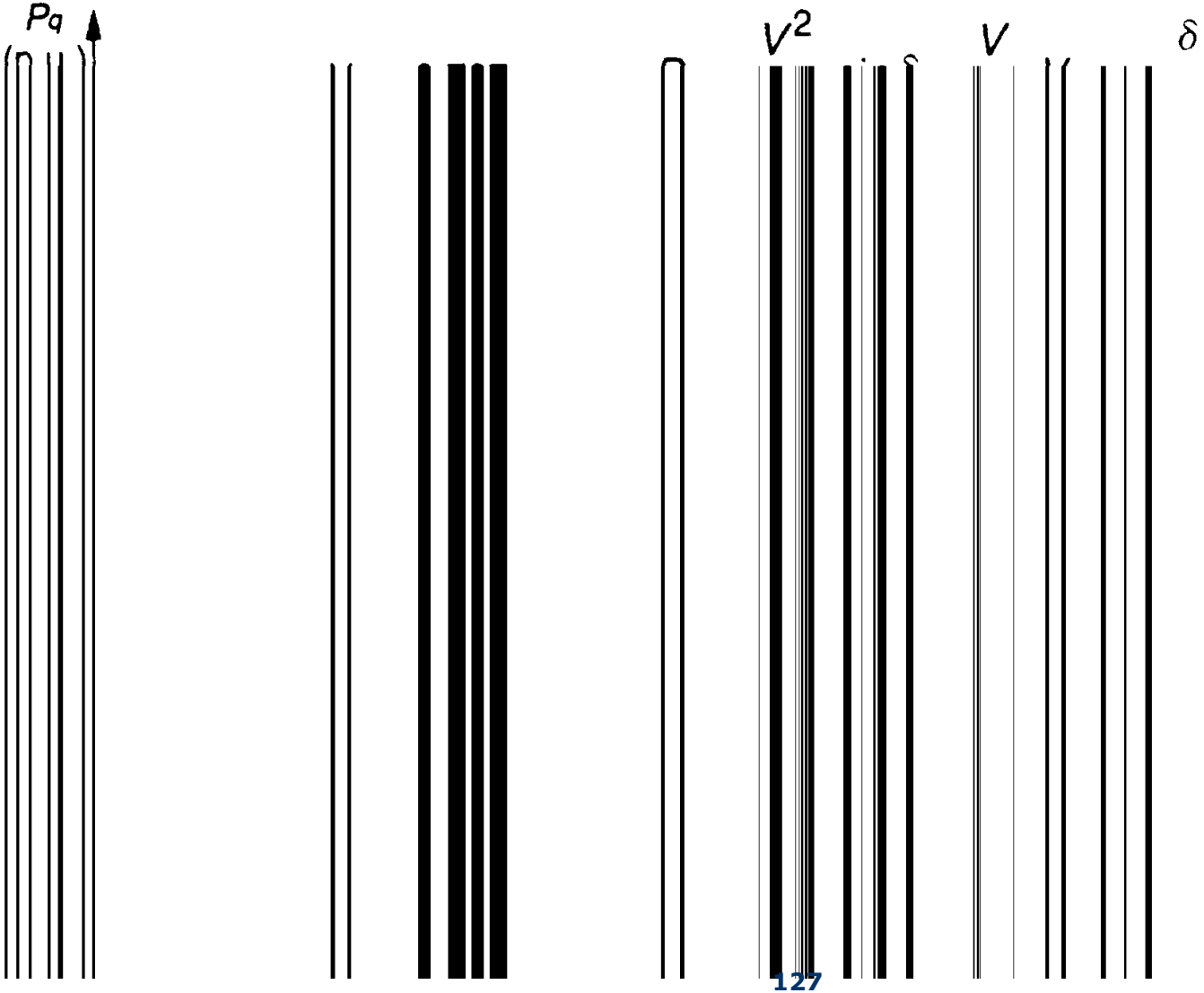
Static Synchronous Series Compensator (SSSC) جبران ساز استاتیکی سنکرون



Static Synchronous Series Compensator (SSSC) جبران ساز استاتیکی سنکرون

- جبران ساز سری منبع ولتاژی مبتنی بر کنورتور در سال ۱۹۸۹ به وسیله « گایوگی» پیشنهاد شد.

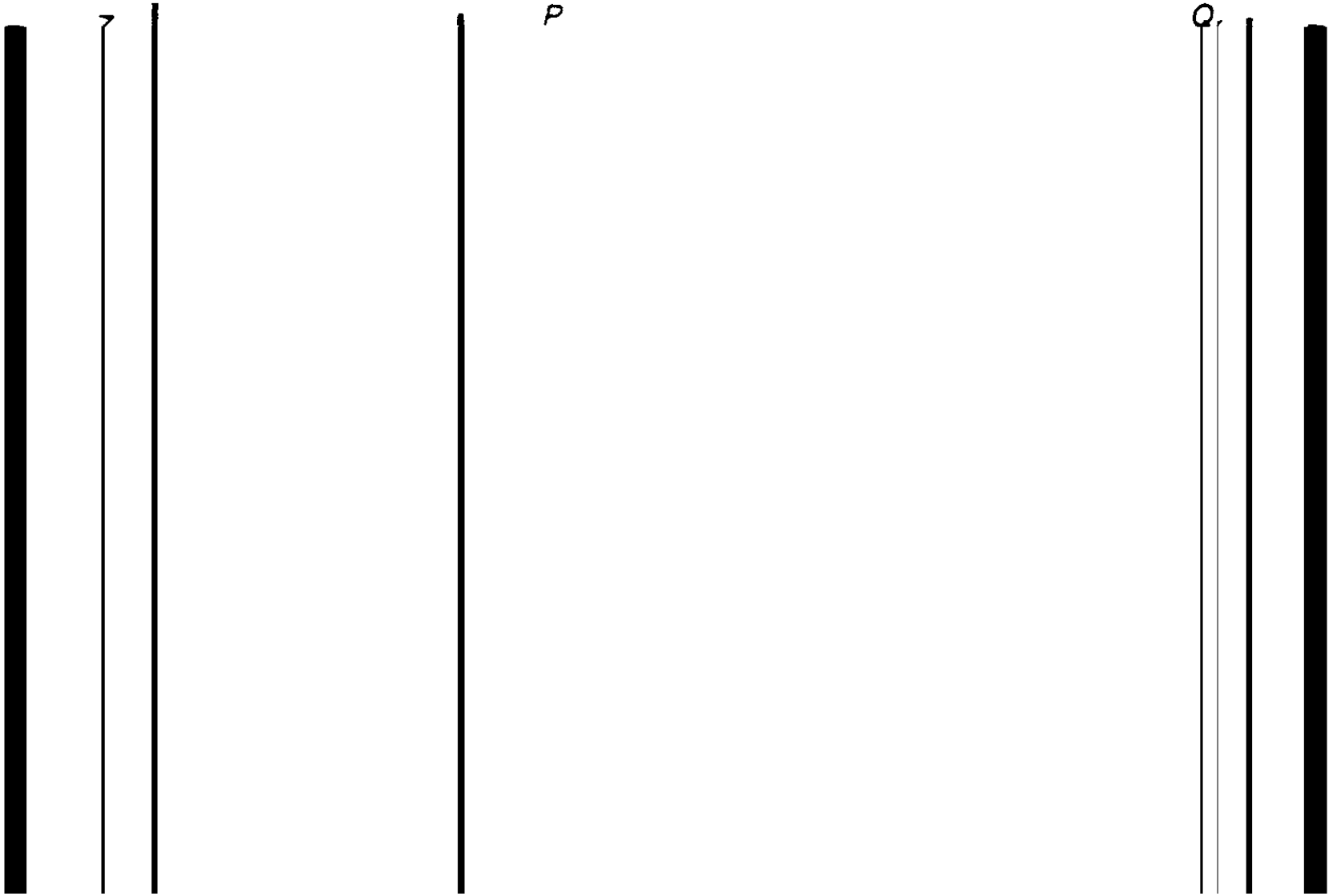



Pq
V2
V
δ

LOGO

کنترل کننده یکپارچه سیلان توان UPFC

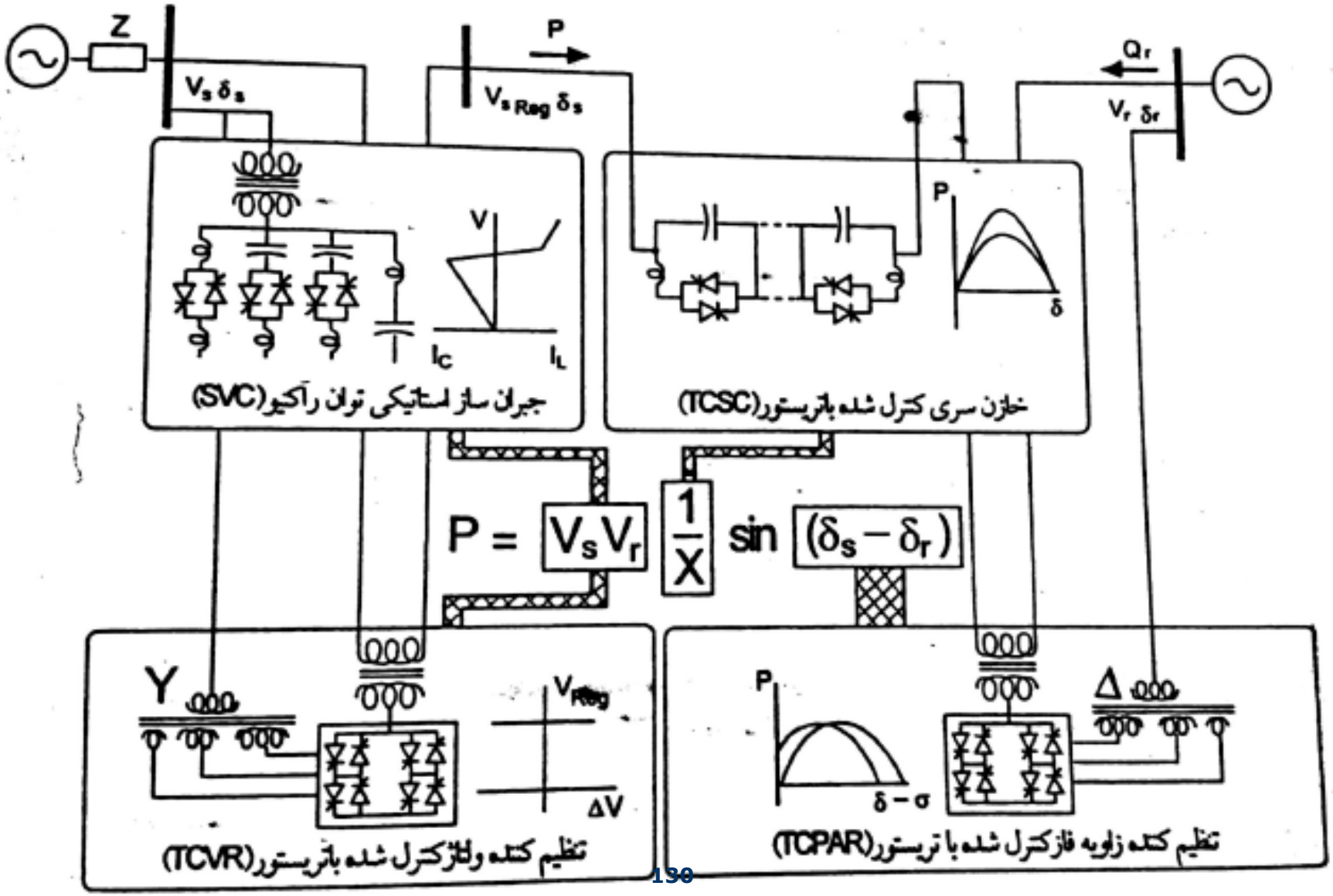
گروه متداول کنترل کننده های FACTS که با تریستور کنترل می شوند



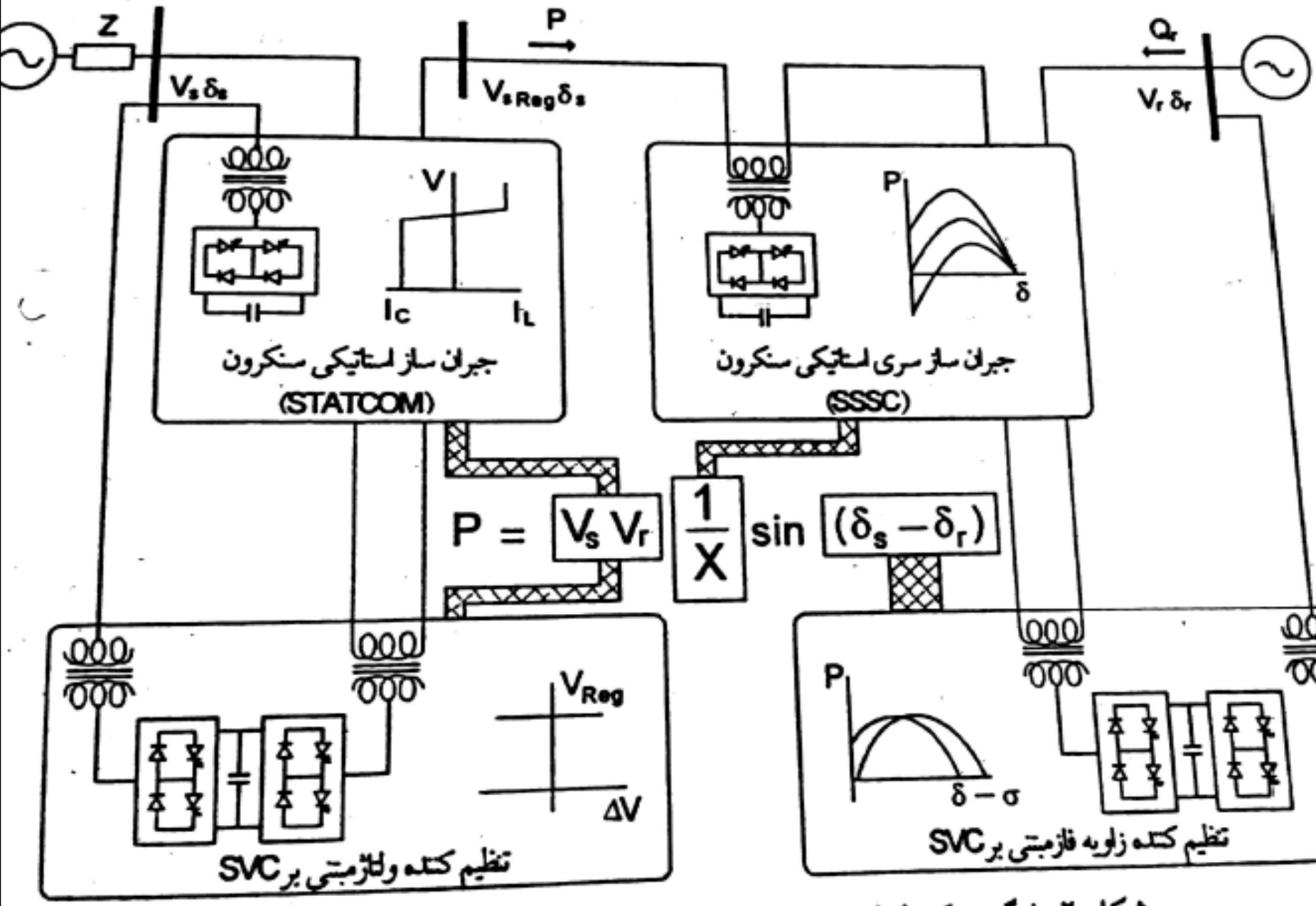
تنظیم کننده زاویه فاز کنترل شده با تریستور (TCPAR)

تنظیم کننده ولتاژ کنترل شده با تریستور (TCVR)

گروه متداول کنترل کننده های FACTS که با تریستور کنترل می شوند

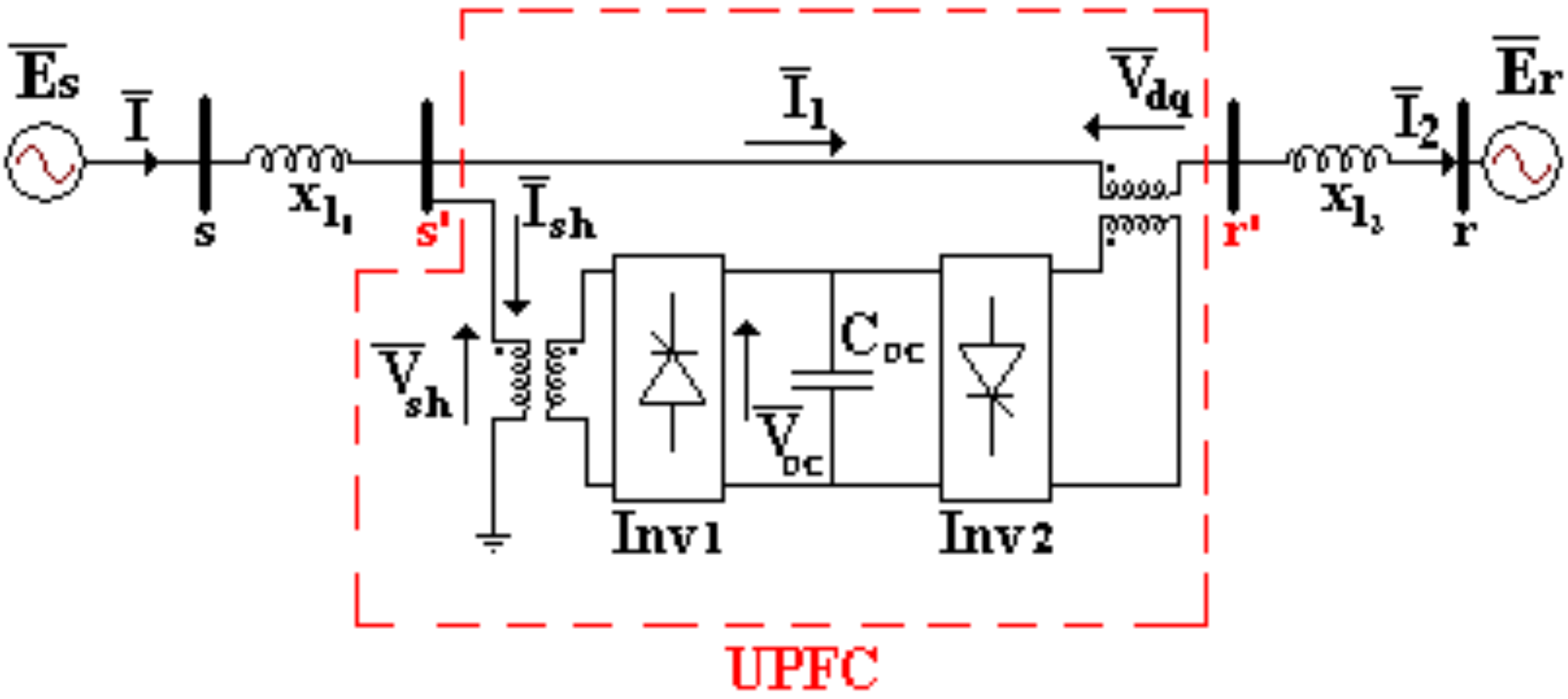


- کنترل کننده یا جبران ساز توان راکتیو (SVC , TCSC) که قادر به مبادله توان حقیقی با سیستم ac نیستند.
- تنظیم کننده ها (TCPAR,TCVR) که می توانند توان و راکتیو را مبادله کنند اما قادر به تولید توان راکتیو نیستند. درنتیجه نمی توانند جبران سازی توان راکتیو را انجام دهند.

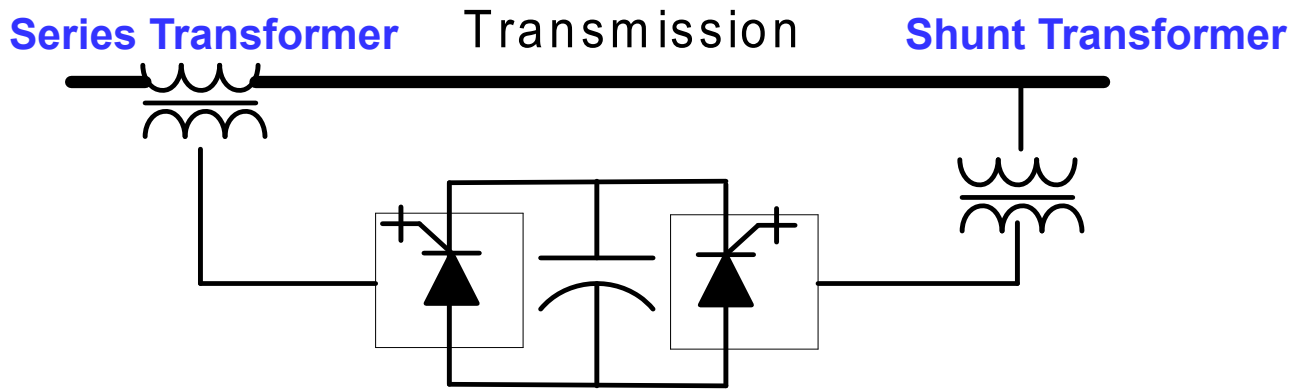


شکل ۲-۸ گروه کنترل کننده های FACTS مبتنی برکنورتورمنبع ولتاژی.

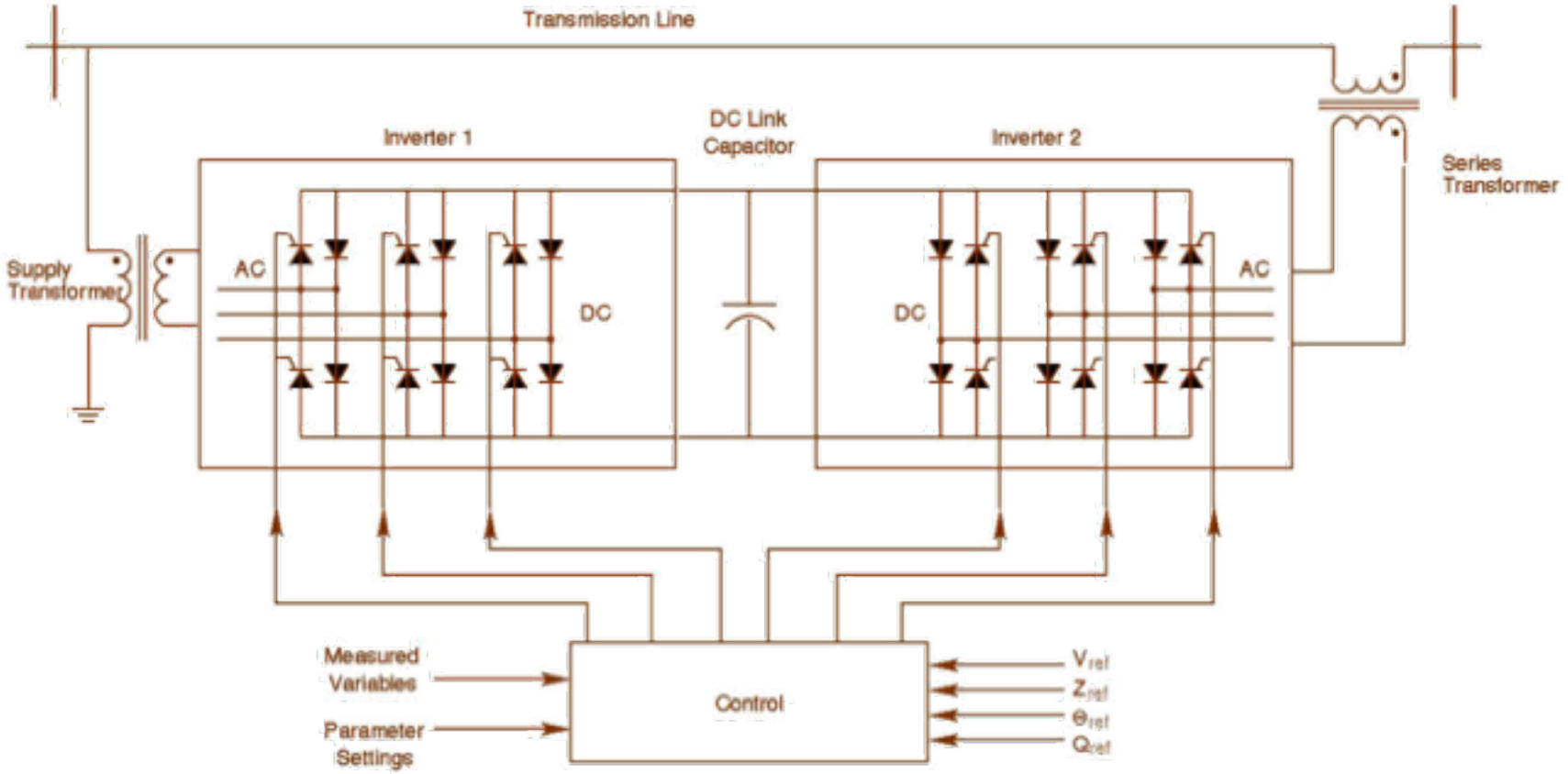
گروه دوم کنترل‌کننده‌ها، مانند یک ماشین سنکرون، دارای قابلیت ذاتی مبادله هر دو توان حقیقی و راکتیو با سیستم ac هستند. به علاوه، این گروه به طور خودکار توان راکتیو شده را تولید یا جذب می‌کند و به این ترتیب جبران سازی راکتیو را بدون خازن‌های ac یا راکتورها انجام می‌دهد. به هر حال توان حقیقی مبادله شده بایستی به وسیله سیستم ac (یک ذخیره یا منبع مستقل انرژی) به آن‌ها داده شده یا از آن‌ها گرفته شود.


Es
I
s
x1
s'
Ish
I1
Vdq
r'
x2
I2
Er
r
Vsh
Vdc
Cdc
Inv1
Inv2
UPFC

کنترل کننده یکپارچه سیلان توان UPFC



- Combines STATCOM and SSSC which are coupled via a common DC link
- Allows bi-directional flow of real power between the STATCOM and SSSC without external energy source
- Controls power flow, voltage and power factor, allowing optimal use of existing lines


Transmission Line
Inverter 1
DC Link
Capacitor
Inverter 2
Series
Transformer
Supply
Transformer
AC
DC
DC
AC
Measured
Variables
Parameter
Settings
Control
V_{ref}
Z_{ref}
Θ_{ref}
Q_{ref}

(STATCOM)

Real power balance & VAR Control

+

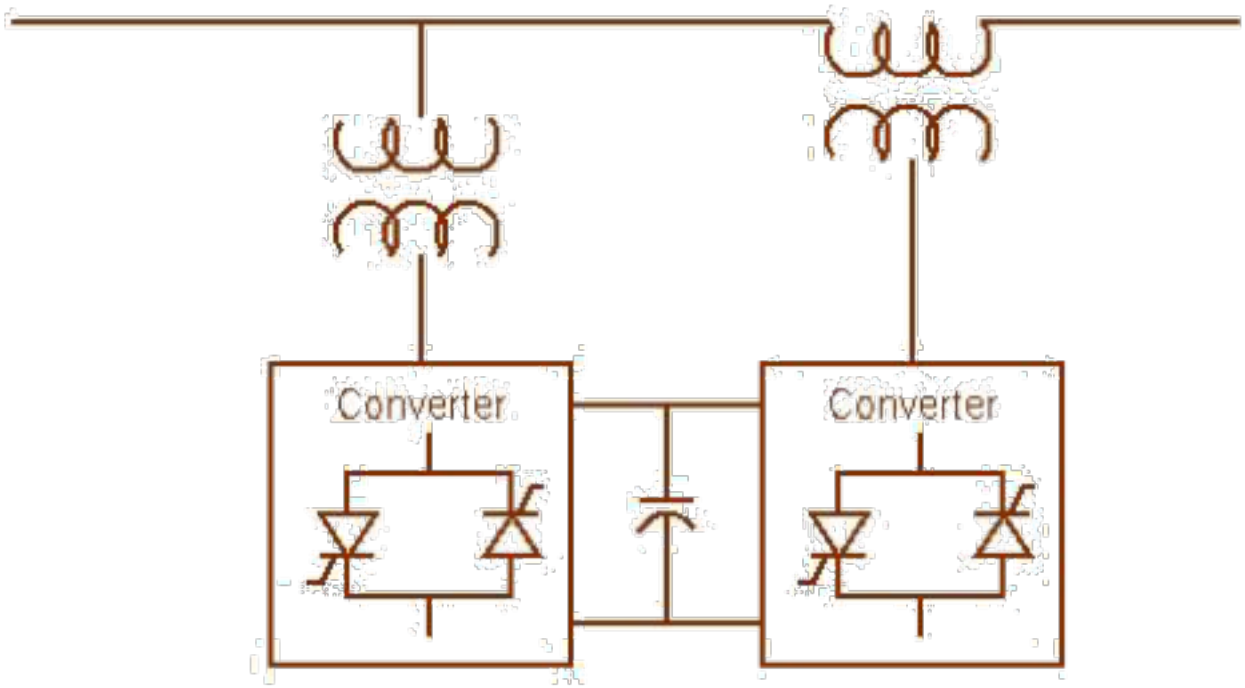
(SSSC)

Main Function
Power Flow Control

UPFC

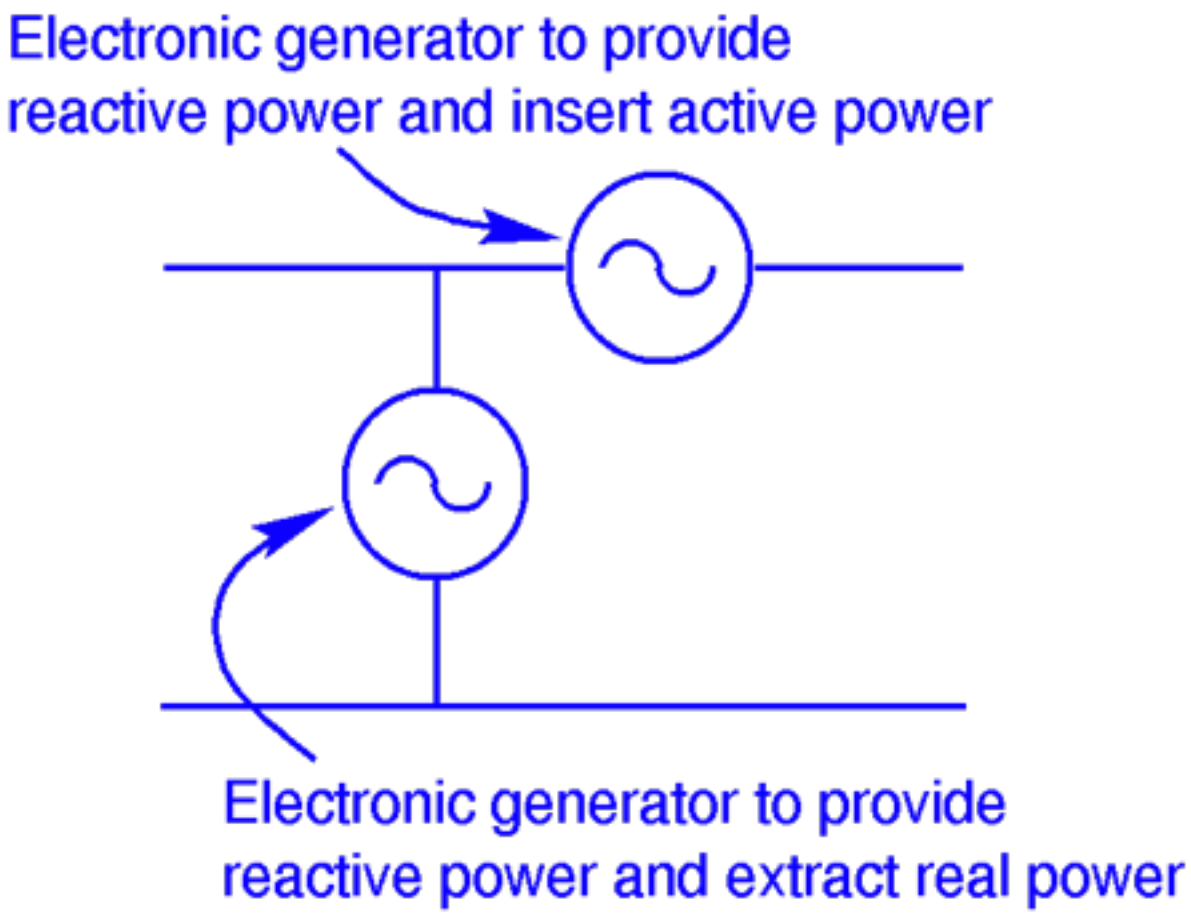
Independent control of real and reactive power flows on a transmission line

UPFC



- may control voltage, impedance, and angle
- impacts active and reactive power flow in line

Basic Operation



UPFC Capabilities

- Increase transmission line capacity
- Direct power flow along selected lines
- Powerful system oscillation damping
- Voltage support and regulation
- Control of active and reactive power flow at both sending- and receiving-end

Operation

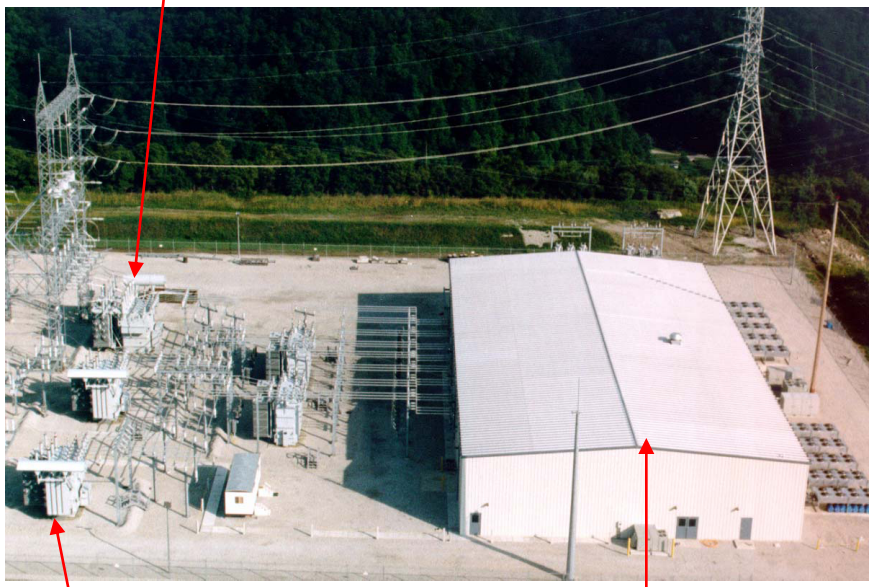
- Reactive power is generated or absorbed by the shunt inverter to control bus voltage
- Reactive power is generated or absorbed by the series inverter to control the real and/or reactive power flow on the transmission line

Cont'd

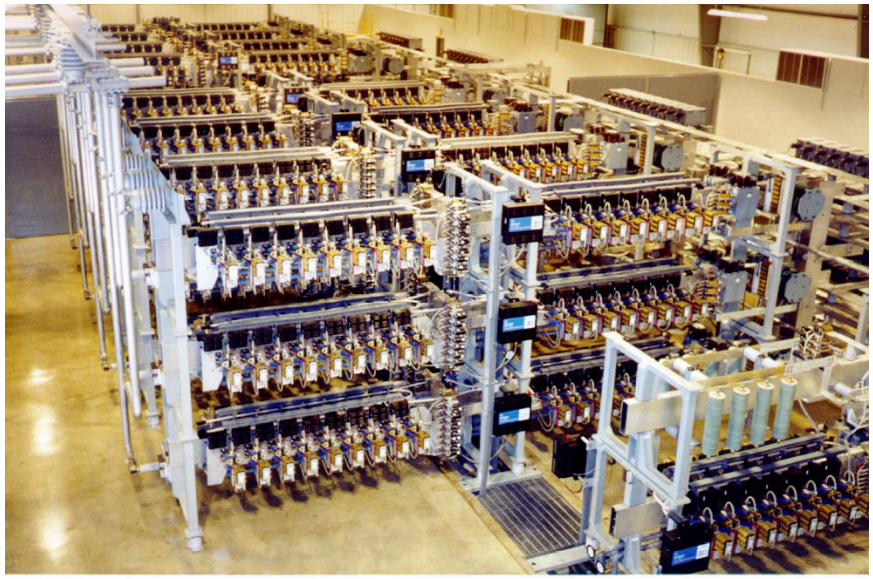
- A portion of the real power flow on the transmission line is drawn from the bus by the shunt inverter to charge the DC capacitor.
- Real power is inserted into the line through the series inverter.

Applications In Power/Utility Industry

- Example – 320MVA 138kV UPFC (GTO Based)



UPFC Equipment



GTO valve hall

Source: AEP Inez UPFC Project