Flexible AC Transmission Systems (FACTS)

کاربرد الکترونیک قدرت در سیستم های قدرت

مقدمه

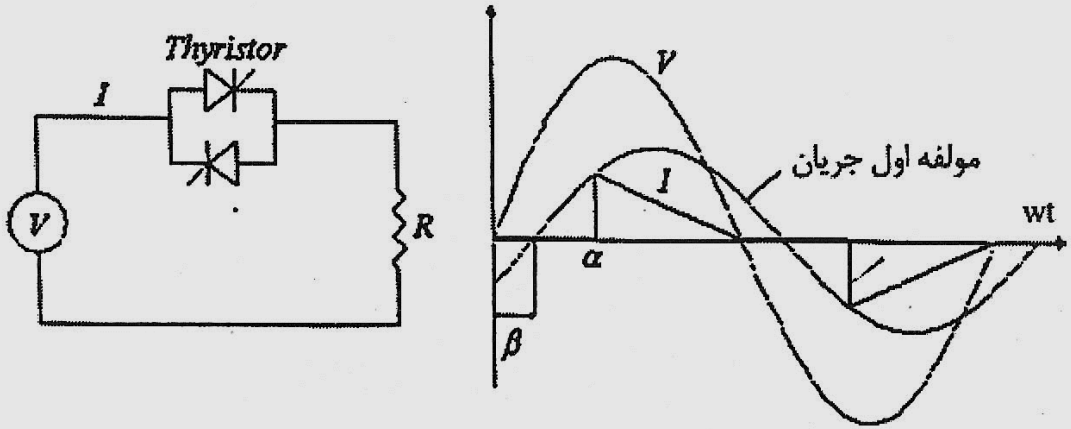
- بانک‌های خازنی و راکتور
- SVC
- ظهور GTO (با MVA در حدود تایریستورها)

ضریب قدرت مبدلهای تایریستوری پس‌فاز می‌باشد یعنی توان راکتیو فقط مصرف می کند.

با GTO ها می‌توان پیش فاز نیز داشت.

پس می‌توان بعنوان خازنی در مدارها از این مبدلها استفاده شود.

مقدمه



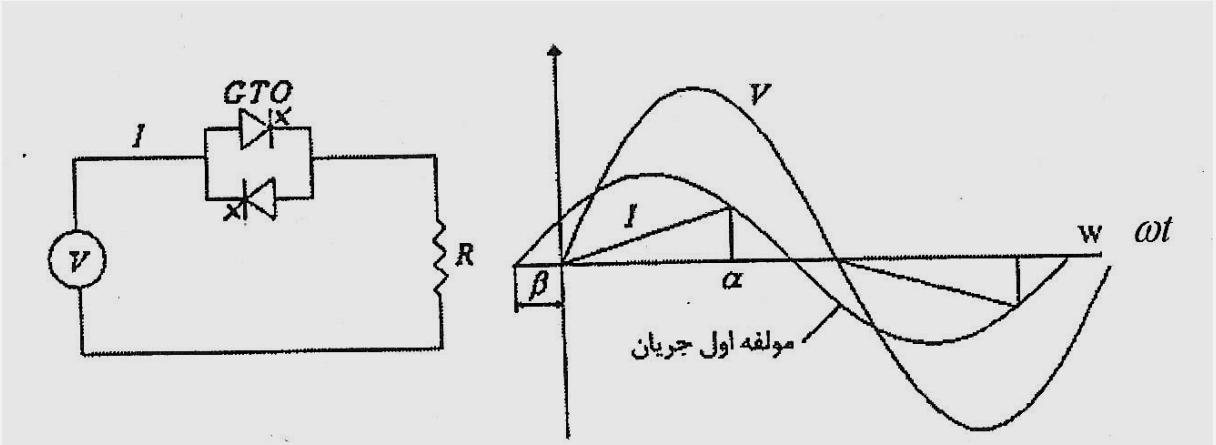
مدار ساده تریستوری و شکل موج ولتاژ و جریان آن

این مبدل‌ها همیشه مصرف کننده‌ی توان راکتیو در سیستم هستند.

مقدمه

با روشن کردن تریستور در زاویه‌ی آتش $0 < \alpha < 180$ ، ولتاژ منبع، دو سر مقاومت قرار گرفته و شکل موج جریان I را به‌وجود می‌آورد. با رسیدن ولتاژ به صفر، جریان هم صفر شده و با شروع نیم سیکل ولتاژ منفی، تریستور نیز خاموش می‌شود و در نیم سیکل بعدی، تریستور موازی در زاویه‌ی $\alpha + 180$ روشن شده و همین روند تکرار می‌شود. با بسط شکل موج جریان به سری فوریه، ملاحظه می‌گردد که مولفه‌ی اول آن یک موج سینوسی خواهد بود که نسبت به شکل موج ولتاژ منبع به اندازه‌ی β درجه تاخیر فاز خواهد داشت. به‌ازای محدوده‌ی تغییرات زاویه‌ی آتش α ، زاویه‌ی β همیشه به‌صورت پس‌فاز خواهد بود و از نظر منبع، جریان مصرفی نسبت به ولتاژ منبع، همیشه پس‌فاز است. لذا این ترکیب همیشه از منبع توان راکتیو جذب می‌کند، در حالی که هیچ عنصر راکتیوی در سیستم وجود ندارد.

مقدمه



مدار ساده با GTO و شکل موج ولتاژ و جریان آن

GTO (تریستور بـا قابلیت خاموش شدن اجباری)

مقدمه

فرض کنید کلیدها در زمان $t=۰$ روشن و در زمان $\omega t < ۱۸۰$ خاموش شوند، در این صورت شکل موج ولتاژ و جریان مطابق شکل خواهد بود. اگر این جریان را با استفاده از سری فوریه بسط دهیم، مولفه‌ی اول آن یک موج سینوسی خواهد بود که با موج ولتاژ منبع به‌اندازه β اختلاف فاز دارد و در این حالت خاص پیش‌فاز است. از این رو این ترکیب می‌تواند توان راکتیو تولید و یا مصرف نماید، بدون اینکه از هیچ عنصر ذخیره کننده‌ی انرژی نظیر سلف و خازن استفاده کند. به‌عنوان یک نتیجه می‌توان گفت که مشخصه‌ی مبدل‌های منبع ولتاژ این است که بدون نیاز به عناصر ذخیره کننده‌ی انرژی می‌توانند توان راکتیو سلفی یا خازنی شبکه را با طرح الگوی کلیدزنی جبران نمایند.

مقدمه

مزیت:

سرعت بالا، افزایش ظرفیت خطوط (در حالت عادی از ۳۰ تا ۴۰ درصد ظرفیت حرارتی خطوط استفاده می شود.)

فرکانس سوئیچینگ GTO ها زیر ۱kHz است ← عدم امکان استفاده از روش های PWM

مقدمه

امروزه دستگاه‌های مصرف کننده‌ی بسیار حساسی وجود دارند که هرگونه ناهنجاری و عدم کیفیت مطلوب سیگنال الکتریکی تغذیه کننده آنها این دستگاه‌ها را در معرض خطرات جدی قرار می‌دهد. قطع شدن برق حتی برای یک سیکل می‌تواند منجر به از کار افتادن بسیاری از دستگاه‌های حساس شود.

همزمان با درخواست افزایش کیفیت تولیدکننده‌های انرژی الکتریکی با درخواست افزایش قدرت نیز روبرو هستند. در نتیجه شبکه های انتقال انرژی با ظرفیتی نزدیکتر به محدودیت‌های نامی خود مورد استفاده قرار می گیرند.

مقدمه

در کشورهای پیشرفته‌تر محدودیت‌های جدی در مقابل گسترش شبکه‌های انتقال وجود دارد. بنابراین می‌توان گفت که انتقال قدرت از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر با استفاده مخاطره‌آمیز از ظرفیت خطوط انتقال ممکن شده است.

که منجر به افزایش ریسک خاموشی و ناپایداری شده است. جهت جلوگیری از چنین مسائلی گردانندگان شبکه‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی بایستی با دقت و وسواس زیادی عمل نمایند. سیستم‌های انتقال در نتیجه این محافظه کاری‌ها با ظرفیتی بسیار کمتر از ماکزیمم ظرفیت نامی خود بکار گرفته می‌شوند.

مقدمه

این سیاست احتمال اختلالاتی را که در اثر افزایش یک تقاضای پیش بینی نشده و یا از دست رفتن مقداری از ظرفیت خط در سیستم بروز می‌کند را کاهش می‌دهد.

علاوه بر بکارگیری خطوط انتقال تنها برای درصدی از ظرفیت ماکزیمم آنها تولیدکنندگان انرژی بایستی همواره ظرفیت نسبتاً بالایی از قدرت تولید خود را به صورت رزرو نگهدارند که در صورت وجود وضعیت‌های اضطراری بتوانند از آنها استفاده کنند.

مقدمه

ابزارها و تکنیک‌های متداول نمی‌توانند کمک چندانی به حل این مسأله بنمایند. این ابزارها در واقع بر سوئیچ‌های الکترومکانیکی تکیه دارند که چندین سیکل طول می‌کشد تا روشن و یا خاموش شوند علاوه بر این، این سوئیچ‌ها شبکه‌های قدرت را مواجه با نویزها و ناپایداری‌هایی که ممکن است در اثر استفاده از این سوئیچ‌ها در سیستم ایجاد شود مواجه می‌سازند.

مقدمه

توسعه‌ی سوئیچ‌های سیلیکونی با ولتاژ بالا، این امکان را برای تولیدکنندگان انرژی فراهم آورده است که با افزایش تقاضای مصرف، بالا بردن ظرفیت کاری خطوط انتقال بدون قرارگرفتن در معرض خطراتی از قبیل ناپایداری و خاموشی این تقاضا را پاسخگو باشند. این سوئیچ‌ها پایه‌های سیستم‌های کنترلی هستند که امکان انتقال چندصد مگاولت آمپر قدرت را با همان سرعت و راندمانی که مدارهای مجتمع میکروواتی عمل می‌کنند را فراهم می‌سازد.

مقدمه

این کنترل‌کننده‌های استاتیکی قادرند ظرفیت خطوط را به طور محسوس افزایش دهند و علاوه بر این شاهراه‌هایی برای کنترل، انتقال و توزیع انرژی باز کنند که به هیچ عنوان توسط سوئیچ‌های الکترومکانیکی امکان پذیر نمی‌باشند.

مشکلات انتقال

جریان متناوب باعث ایجاد میدان‌های مغناطیسی متغیر در اطراف خطوطی می‌شود که آن را انتقال می‌دهد و ولتاژهای خط بطور پیچیده‌ای در اثر تغییرات بار افزایش و یا کاهش می‌یابند. ارتباط بین ولتاژ و جریان خط در انتقال AC به پارامتر امپدانس بستگی دارد که تابع فرکانس است. این امپدانس هم بر دامنه و هم بر فاز جریان تأثیرگذار است.

علاوه بر این امپدانس خطوط غیر از اینکه به ساختار فیزیکی کابل بستگی دارد به تغییرات میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی ناشی از عبور جریان متناوب نیز وابسته است. بنابراین امپدانس خط در حالت کلی ثابت نیست و تابعی از power flow است هرگونه اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان باعث کاهش توان انتقالی می‌گردد.

مشکلات انتقال

کنترل امپدانس یکی از حیاتی‌ترین و مهمترین ابزارهایی است که در انتقال و توزیع مناسب انرژی نقش ویژه‌ای دارد. با این وجود کنترل امپدانس بسیار دشوار و پیچیده است.

امپدانس کابل‌ها، ترانسفورماتورها، ژنراتورها و موتورها بعد از اینکه ساخته شدند ثابت است و نمی‌توان آنها را در مقابل تغییرات شرایط کار تغییر داد. امپدانس خطوط می‌تواند با سری کردن بانک‌های خازنی و یا سلفی با خط انتقال تغییر یابد. با این حال این روند زمان بر است و نمی‌تواند جهت کنترل سریع (با سرعت تغییرات امپدانس) بکار گرفته شود.

مشکلات انتقال

عکس‌العمل بین امپدانس و جریان خط مسائل زیادی را ایجاد می‌کند؛ از جمله این مسائل:

- Loop flow: وقتی اتفاق می‌افتد که چندین خط به هم متصل شده باشند. در این حالت قدرت به جای انتقال از خط با کوتاه‌ترین فاصله از خطی عبور می‌کند که کمترین امپدانس را از خود نشان می‌دهد. این مسأله باعث کاهش ظرفیت خط با طول بلندتر و بروز مشکلاتی خواهد شد.

مشکلات انتقال

- Large scale stability: وقتی اتفاق می‌افتد که اختلاف فاز ولتاژهای فرستنده و گیرنده زیاد باشد. در این حالت یک شیفت کوچک در فاز باعث تغییرات زیاد انتقالی می‌گردد که می‌تواند سیستم را ناپایدار سازد. بنابراین همواره قدرت انتقالی توسط خط انتقال را بسیار کمتر از ظرفیت خط انتخاب می‌کنند.

مشکلات انتقال

- کنترل ولتاژ: علاوه بر بارهای سلفی که منجر به افت ولتاژ می‌شوند، خطوط انتقال طویل در بار کم افزایش ولتاژ شدیدی پیدا می‌کنند. نهایتاً رعد و برق، اتصال کوتاه و تغییرات ناگهانی بار می‌تواند باعث ناپایداری ولتاژ (voltage instability) شود. این اختلال می‌تواند موجب آسیب دیدن وسایل و ابزارهای سیستم گردد و حتی ممکن است منجر به خاموشی کامل شود.

مشکلات انتقال

- نوسانات زیر سنکرون (subsynchronous resonances): در مقابل بعضی اختلالات پریودیک سیستم قدرت ممکن است دچار نوسانات زیرسنکرون شود (با فرکانس‌های کمتر از فرکانس اصلی) عکس العمل بین نوسانات طبیعی مکانیکی سیستم و این نوسانات ممکن است آنقدر شدید باشد که شافتی با قطر سه متر را پاره کند.

مشکلات انتقال

قطع برق برای مدت ۵ سیکل ← $ ۲۰۰۰۰۰ خسارت در یک کارخانه تولید شیشه

قطع برق برای مدت ۵ دقیقه ← $ ۵۰۰۰۰۰ خسارت در کارخانه تولید سوئیچ‌های نیمه هادی

مجموع خسارات در آمریکا ۳ تا ۵ بیلیون دلار است.

استفاده ups برای جبران این خسارات:

upsها دارای راندمان کمی هستند و حدود ٪۲۰ تلفات دارند که معادل ۳ بیلیون کیلو وات ساعت انرژی تلف شده که معادل ۱۰۰ میلیون دلار می‌باشد.

در طول سه دهه‌ی گذشته سوئیچ‌های قدرت الکترونیکی ابتدا تایرستور و سپس GTO به بازار عرضه شده‌اند. این سوئیچ‌ها می‌توانند هزاران آمپر جریان را در ولتاژ هزاران ولت از خود عبور دهند. کاربرد این سوئیچ‌ها در circuit breaker کنترل امپدانس، کنترل ولتاژ، کنترل جریان و زاویه فاز و ... امکاناتی را بوجود آورده است که به هیچ عنوان از ابزارهای متعلق به نسل قبل آنها ساخته نیست.

این وسایل انعطاف‌پذیری سیستم‌های قدرت را بطور چشمگیری افزایش می‌دهند. به کمک آنها می‌توان ظرفیت خطوط را افزایش داد بدون آنکه مسایلی مانند پایداری، افت ولتاژ، نوسانات زیرسنکرون و ... شانسی برای حضور پیدا کنند. بنابراین سیستم‌های تولید، انتقال و توزیع انرژی می‌توانند ساخت خطوط و نیروگاه‌های جدید را که علاوه بر پرهزینه بودن با مشکلات زیست محیطی نیز مواجهه هستند به تعویق اندازد. با توجه به این انعطاف پذیریها EPRI واژه FACTS را برای این کنترل کننده ها معرفی کرده است که مقبولیت عامه پیدا کرده است.

از میان ابزارهای متکی بر تریستور می‌توانیم از
SVC (Static Var Compensator)،
TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)،
TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)،
TCPR (Thyristor Controlled Phase Regulator)،
TCBR (Thyristor Controlled Breaking Resistor) نام برد.

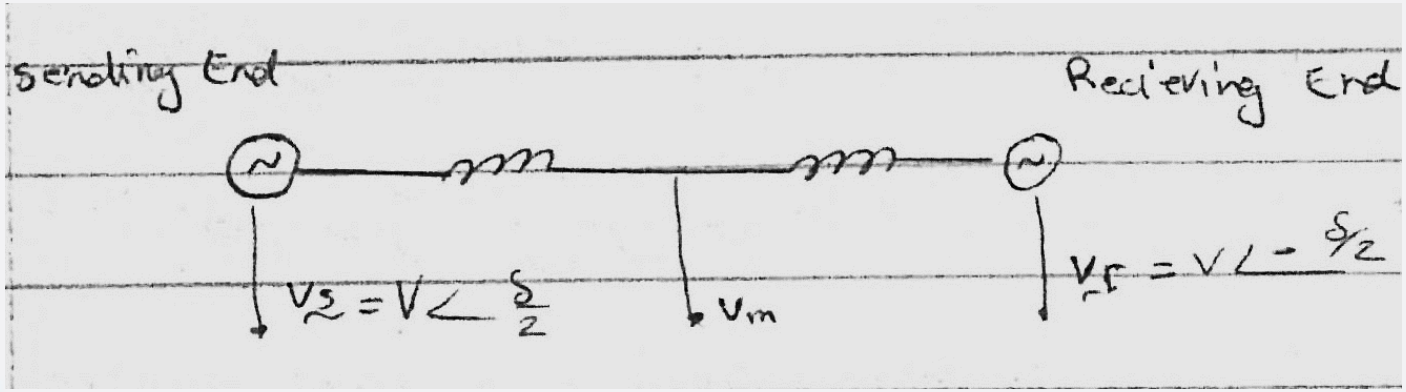
و ابزارهایی که متکی بر GTO هستند می‌توان به:
STATCOM(Static Synchronous Compensator)،
SSSC(Static Synchronous Series Compensator)،
UPFC(Unified Power Flow Controller) اشاره کرد.

به عنوان مثال بکارگیری یک TCSC در خطوط ۵۰۰kV فلوریدا ظرفیت خطوط را از ۲۰۰۰ MW به ۳۰۰۰ MW افزایش داده است؛ که این معادل صرفه‌جویی ۶ میلیون دلار در۲۵ سال می‌باشد. در واقع استفاده از TCSC در طول مدت کوتاهی کلیه هزینه‌های ساخت و نصب آن را توجیه می کند.

اگر به کمک این ابزارها قدرت رزرو از ۲۰ درصد فقط به ۱۵ درصد کاهش پیدا کند معادل صرفه جویی ۵۰ بیلیون دلار در ۲۵ سال می گردد.

اصول انتقال انرژی و جبران سازی

مدل ساده شده‌ی یک سیستم انتقال دو ماشینه



دامنه ولتاژ نقطه وسط از دامنه ولتاژ هر دو سر فرستنده و گیرنده کمتر است.

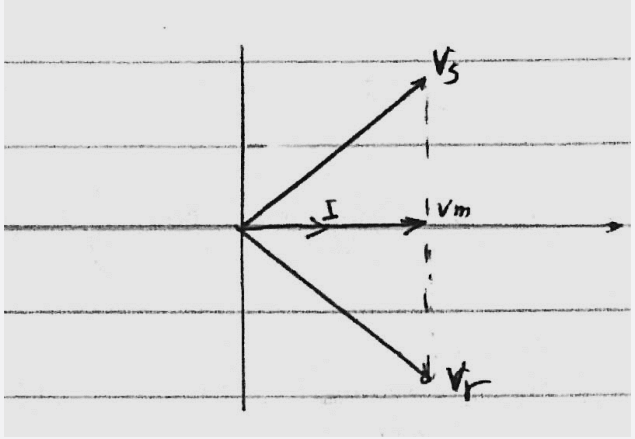
$$V_s = Ve^{j\frac{\delta}{2}} = V\cos\frac{\delta}{2} + jV\sin\frac{\delta}{2}$$

$$V_r = Ve^{-j\frac{\delta}{2}} = V\cos\frac{\delta}{2} - jV\sin\frac{\delta}{2}$$

$$V_m = \frac{V_s + V_r}{2} = V\cos\frac{\delta}{2}$$

اصول انتقال انرژی و جبران سازی

$$I = \frac{V_s - V_r}{jX} = \frac{2V}{X}\sin\frac{\delta}{2}$$



برای خط بدون تلفات، توان در هر دو سر یکسان است.

$$P = \mathrm{Re}\left[V_s I^*\right] = \mathrm{Re}\left[V_r I^*\right]$$

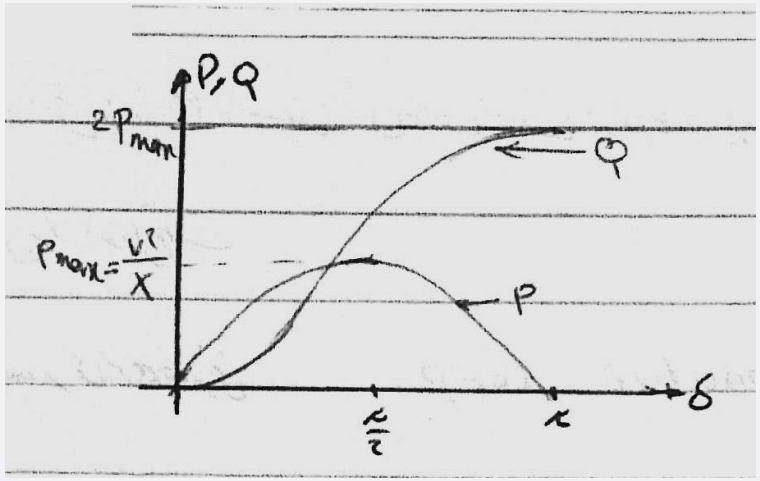
$$\mathrm{Re}\left[V_s I^*\right] = \mathrm{Re}\left[V e^{j\frac{\delta}{2}} \frac{2V_s}{X}\sin\frac{\delta}{2}\right] = \frac{2V^2}{X}\sin\frac{\delta}{2}\mathrm{Re}\left[\cos\frac{\delta}{2} + j\sin\frac{\delta}{2}\right]$$

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

اصول انتقال انرژی و جبران سازی

$$Q_s = \mathrm{Im}\left[V_s I^*\right] = \mathrm{Im}\left[V e^{j\frac{\delta}{2}} \frac{2V}{X} \sin\frac{\delta}{2}\right] = \frac{2V^2}{X}\sin^2\frac{\delta}{2} = \frac{V^2}{X}\left(1-\cos\delta\right)$$

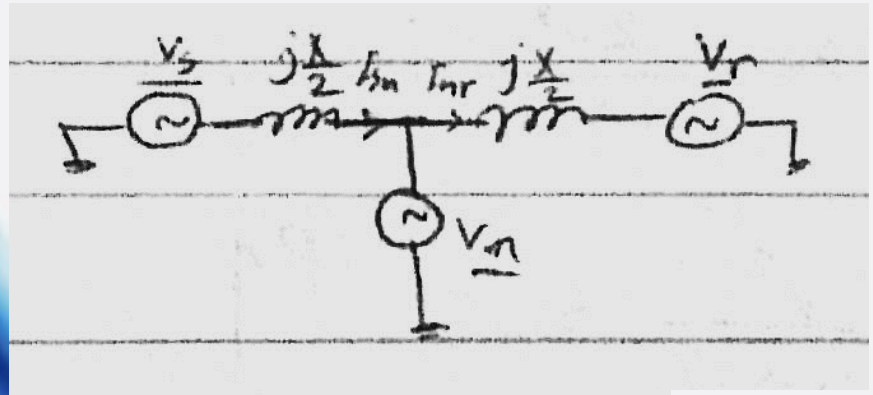
$$Q_r = -Q_s = -\frac{V^2}{X}\left(1-\cos\delta\right)$$

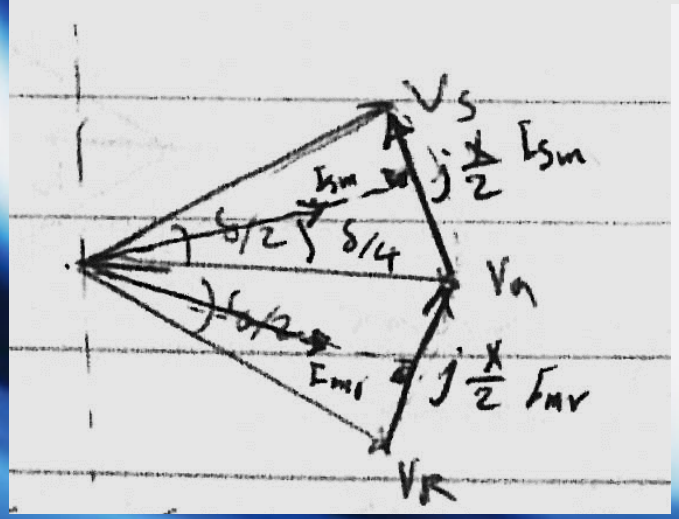


جبران سازی موازی با یک منبع ولتاژ ایده‌آل

Shunt compensation by an ideal voltage source

فرض کنید منبع ولتاژ ایده‌آل V_m به نقطه وسط خط انتقال متصل شده است. دامنه این منبع ولتاژ مساوی با دامنه ولتاژهای فرستنده و گیرنده است و فاز آن با فاز ولتاژ نقطه وسط مساوی است.





با توجه به دیاگرام برداری منبع ولتاژ V_m تنها می‌تواند توان راکتیو به خط تحویل دهد یا از خط تحویل بگیرد و هیچ‌گونه تبادل توان اکتیو وجود نخواهد داشت.

جبران سازی موازی با یک منبع ولتاژ ایده‌آل

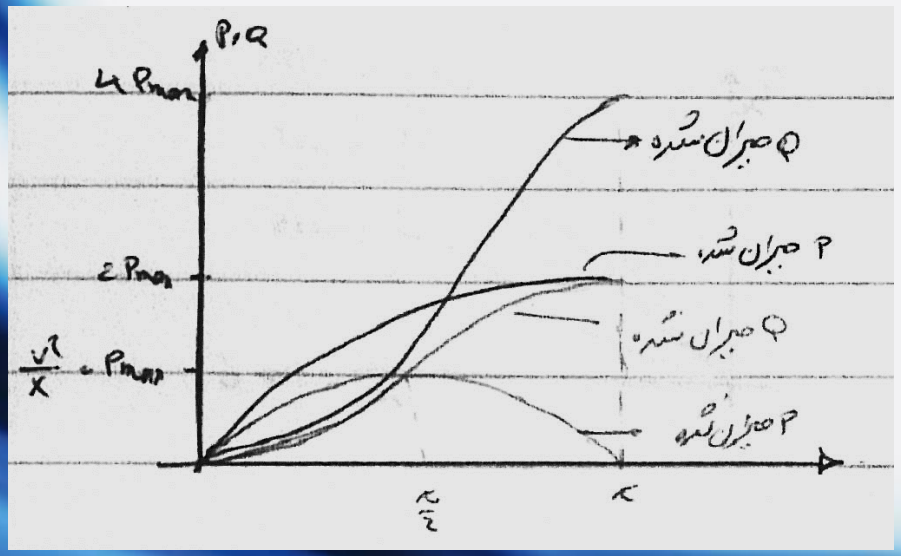
Shunt compensation by an ideal voltage source

در اینجا توان در دو سر گیرنده و فرستنده مساوی است.

$$P_p = \mathrm{Re}\left[V_s I_{sm}^*\right] = \frac{2V^2}{X}\sin\frac{\delta}{2}$$

توان راکتیو تولید شده توسط جبران کننده نقطه وسط برابر است با:

$$Q_p = \frac{4V^2}{X}\left(1-\cos\frac{\delta}{2}\right)$$

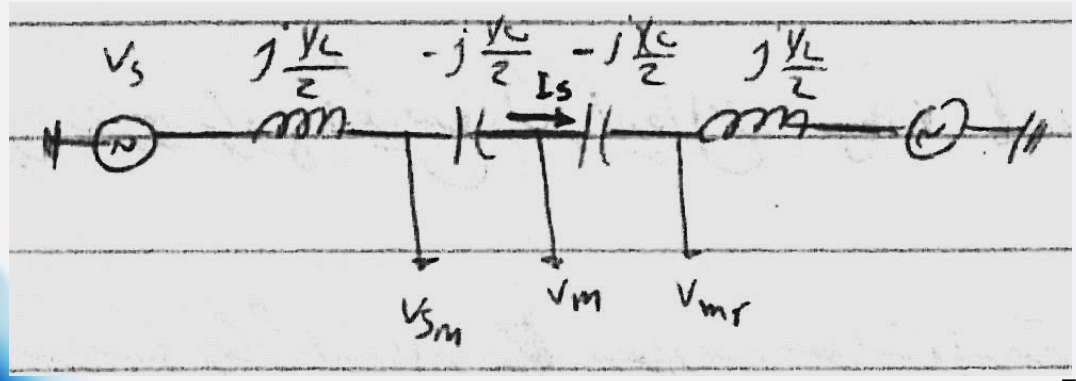


با توجه به افزایش دامنه p و شیفت آن به سمت راست از لحاظ پایداری وضعیت بهتر می‌شود و توان بیشتری توسط خط قابل انتقال است.

جبران سازی سری خازنی

Series capacitive compensation

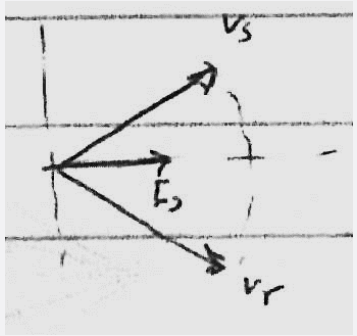
سیستم دو ماشینه با جبران ساز سری خازنی



درجه جبران سازی سری $S = \frac{X_C}{X_L}$

$$X = X_L - X_C = X_L(1-S)$$

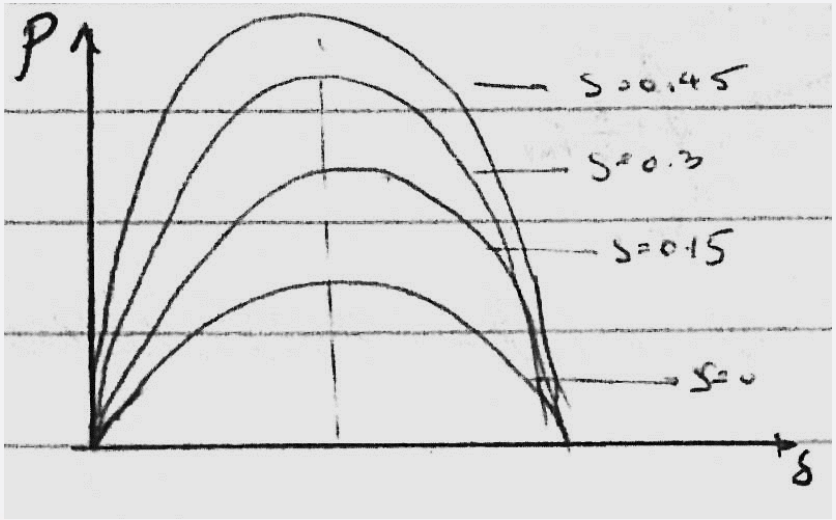
$$0 \le S \le 1$$



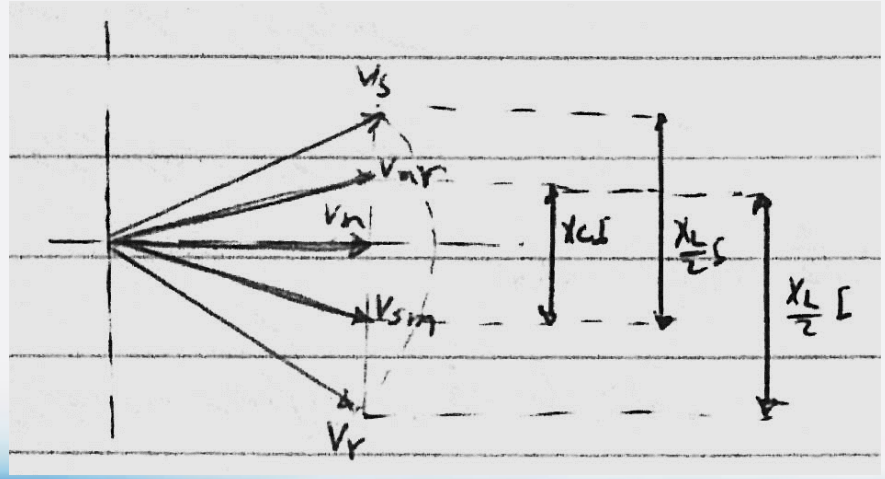
$$I_s = I\angle 0 = \frac{2V}{(1-S)X_L}\sin\frac{\delta}{2}$$

جبران سازی سری خازنی

Series capacitive compensation



$$P = \frac{V^2}{(1-S)X_L}\sin\delta$$

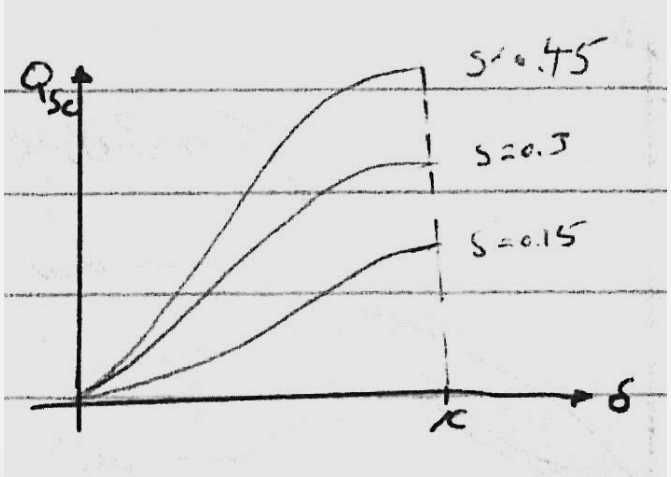


جبران سازی سری خازنی

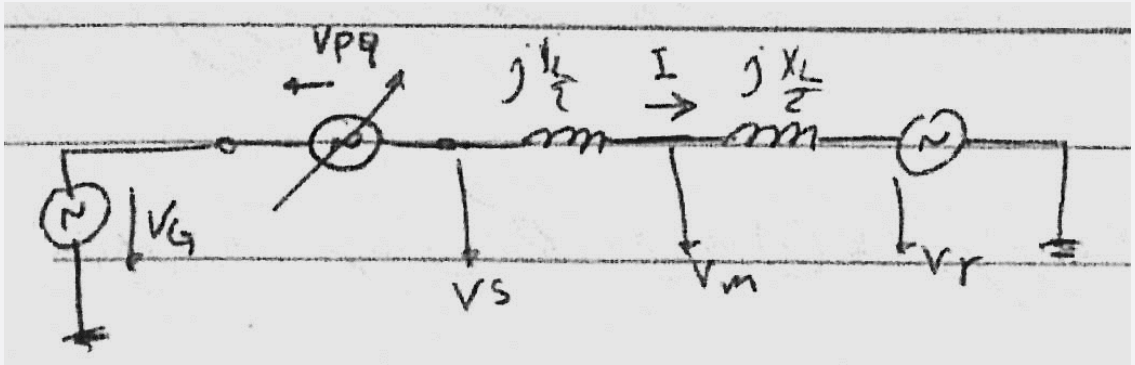
Series capacitive compensation

توان راکتیو تأمین شده توسط خازن‌ها

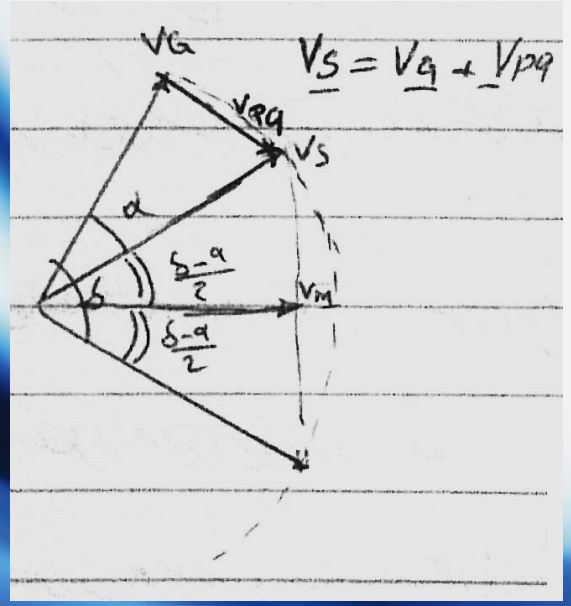
$$Q_{sc} = I^2 X_C = \frac{2V^2 S}{(1-S)^2 X_L}(1-\cos\delta)$$



کنترل زاویه فاز



در این نوع جبران‌کننده یک phase shifter بین ژنراتور و انتهای فرستنده خط انتقال قرار می‌گیرد. .P.S را می‌توان با یک منبع ولتاژ با دامنه و فاز متغیر مدل کرد (سینوسی با فرکانس اصلی سیستم).



کنترل زاویه فاز

ایده‌ی اصلی این است که اگر زاویه δ بخواهد از $\frac{\pi}{2}$(زاویه قدرت ماکزیمم) تجاوز کند .P.S یک ولتاژ V_{pq} با دامنه و فاز مناسب به سیستم تزریق می‌کند که باعث می‌شود تا زاویه‌ی قدرت مؤثر در $\frac{\pi}{2}$ برای انتقال ماکزیمم توان تثبیت شود. در واقع عمل .P.S باعث می‌شود که زاویه‌ی بین ولتاژهای فرستنده و گیرنده به $\delta - \alpha$ تغییر یابد.

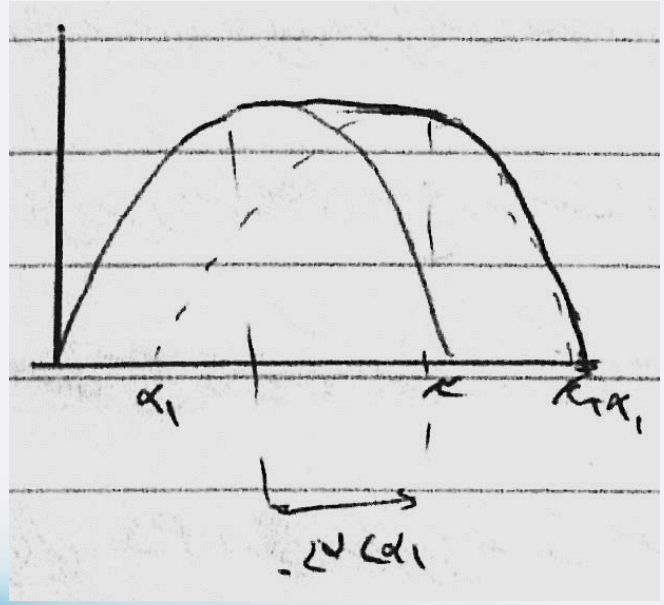
توان انتقالی:

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

کنترل زاویه فاز

با وجودی که P.S. ماکزیمم توان انتقالی خط را تغییر نمی‌دهد این امکان را فراهم می‌سازد که بتوان توان را در سطح ماکزیمم آن برای هر زاویه فازی در رنج $\frac{\pi}{2} + \alpha \leq \delta \leq \frac{\pi}{2}$ تثبیت نمود. در واقع منحنی P بر حسب δ به سمت راست شیفت پیدا می کند.

دقت کنید که امکان شیفت به چپ این منحنی نیز وجود دارد.



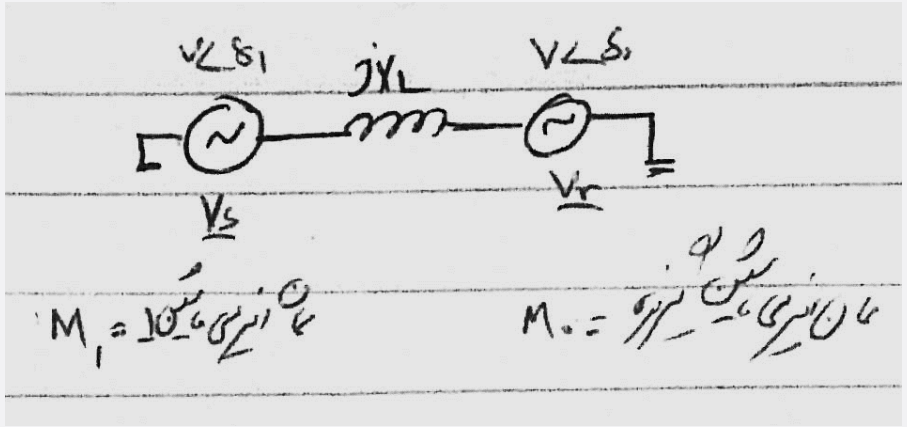
در بعضی مواقع سیستم قدرت ممکن است ضریب میرایی منفی داشته باشد. در این وضعیت یک اختلال جزئی می‌تواند منجر به افزایش نوسانات سیستم و در نهایت از دست رفتن سنکرونیزاسیون ژنراتورها گردد. با توجه به اینکه هر دو جبران‌کننده‌های سری و موازی ماکزیمم توان انتقالی را افزایش می‌دهند؛ بنابراین انتظار می‌رود که با اعمال کنترل کننده‌های سریع و مناسب این تکنیک‌ها بتواند power flow را تحت تأثیر خود قرار دهند و بنابراین تا حدودی سطح پایداری گذرا را افزایش دهند. همچنین برای مستهلک کردن نوسانات سیستم ضریب میرایی مناسبی را ایجاد کنند.

جبران‌کننده‌های فوق تنها برای حالت دایمی مفید هستند و در طول حالت‌های گذرا به دلیل سرعت بالا اثری ندارند.

سیستم‌های انتقال قدرت بر اساس شرط باقی ماندن تمام ژنراتورهای سیستم در حالت سنکرون پایه‌گذاری شده‌اند. این مسأله به پایداری معروف شده است. بایستی اطمینان کافی وجود داشته باشد که پس از وقوع اختلال‌های اصلی (faults, generator and line outages, load changes,...) که در طول وقوع آنها زاویه‌ی قدرت و توان انتقالی از مقدار نامی خود مقدار زیادی دور می‌شود و یا حول مقدار نامی خود نوسان می‌کنند سیستم قدرت توانایی بازیابی خود را داشته باشد.

Transient stability level: ماکزیمم سطح توان انتقالی در شرایط ماندگار که در این سطح سیستم بتواند بعد از وقوع یک اختلال اصلی بتواند خود را بازیابی کند.

دینامیک سیستم قدرت دو ماشینه



توان انتقالی

$$P = \frac{3V^2}{X_l}\sin(\delta_1 - \delta_0)$$

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = T_{s1} - \frac{3V^2}{X_l\omega_0}\sin(\delta_1 - \delta_0)$$

$$P_1 = T_{e1}\omega_0$$

$$M_0 \frac{d^2\delta_0}{dt^2} = \frac{3V^2}{X_l\omega_0}\sin(\delta_1 - \delta_0) - T_{S0}$$

$$\frac{d^2}{dt^2}(\delta_1 - \delta_0) = \frac{T_{S1}}{M_1} + \frac{T_{S0}}{M_0} - \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_0}\right)\frac{3V^2}{X_l\omega_0}\sin(\delta_1 - \delta_0)$$

دینامیک سیستم قدرت دو ماشینه

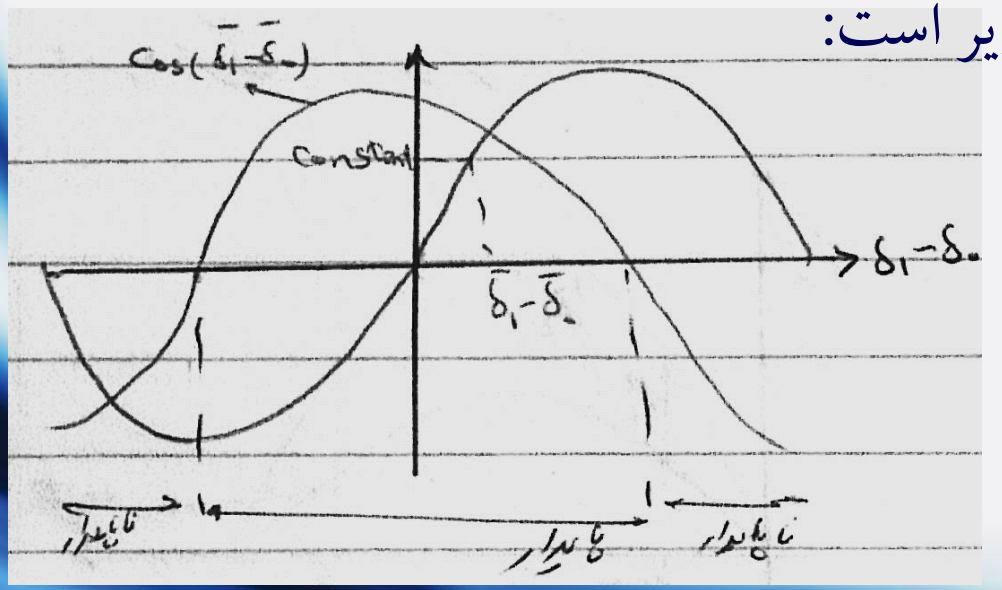
در حالت تعادل

$$\delta_0 = \bar{\delta}_0 \,,\ \ \delta_1 = \bar{\delta}_1$$

$$\frac{d^2}{dt^2}\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0\right) = 0 \Rightarrow \frac{T_{S1}}{M_1} + \frac{T_{S0}}{M_O} - \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V^2}{X_l\omega_0}\sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0\right) = 0$$

$$\rightarrow \frac{T_{S1}}{M_1} + \frac{T_{S0}}{M_0} - \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_0}\right)\frac{3V^2}{X_l\omega_0}\sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0\right)$$

توان انتقالی توسط خط بصورت تابعی از اختلاف زوایای قدرت دو سر فرستنده و گیرنده بصورت شکل زیر است:



خطی سازی معادلات دینامیکی

$$\delta_1 - \delta_0 = \bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0 + \delta_{10}$$

$$\frac{d^2\delta_{10}}{dt^2} = -\left(\frac{1}{M_0} + \frac{1}{M_1}\right)\frac{3V^2}{X_l\omega_0}\cos\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0\right)\delta_{10}$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -ky$$

$$K < 0 \rightarrow y(t) = Ae^{-\sqrt{k}t} + Be^{\sqrt{k}t}$$ ناپایدار

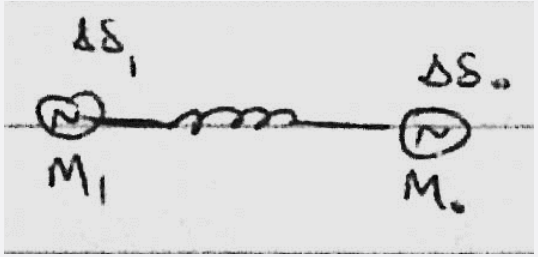
$$K > 0 \rightarrow y(t) = A\sin\left(\sqrt{k}t\right) + B\cos\left(\sqrt{k}t\right)$$ پایداری نوسانی

با توجه به بحث فوق اگر $\cos(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0) > 0$ ، سیستم پایدار است

و $\delta_{10} = A\sin\omega_r t + B\cos\omega_r t$

و اگر $\cos(\overline{\delta_1} - \overline{\delta_0}) < 0$ باشد سیستم ناپایدار است.

پایداری حالت ماندگار (Steady State Stability)



$$\delta_{10} = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_0$$

$$\frac{1}{M_{eq}} = \frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}$$

$$M_1 > M_0 \Rightarrow \Delta\delta_1 < \Delta\delta_0$$

$$M_0 \to \infty \Rightarrow \Delta\delta_0 \to 0$$

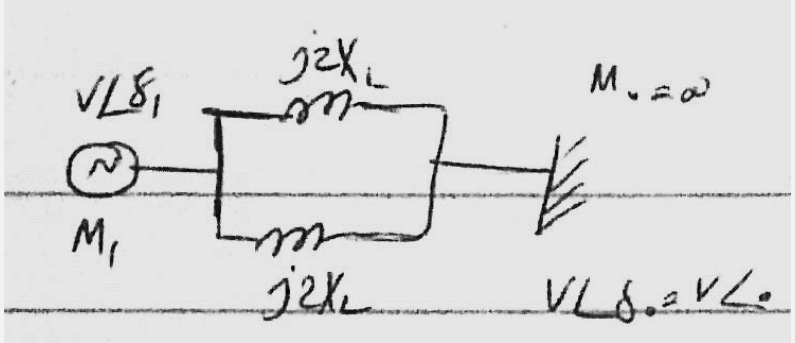
باس بی نهایت

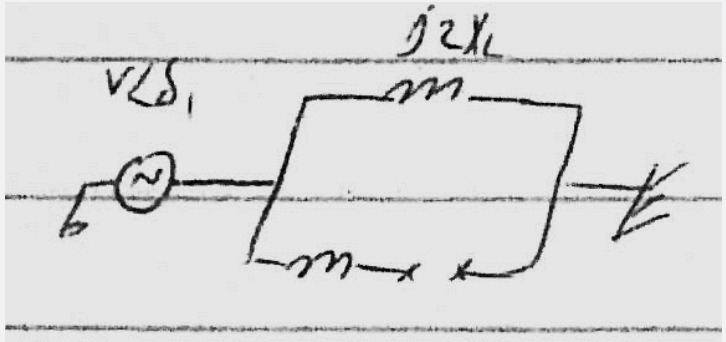
دو نوع توربین داریم:

M_1 کوچک (توربین‌های بخاری یا گازی)

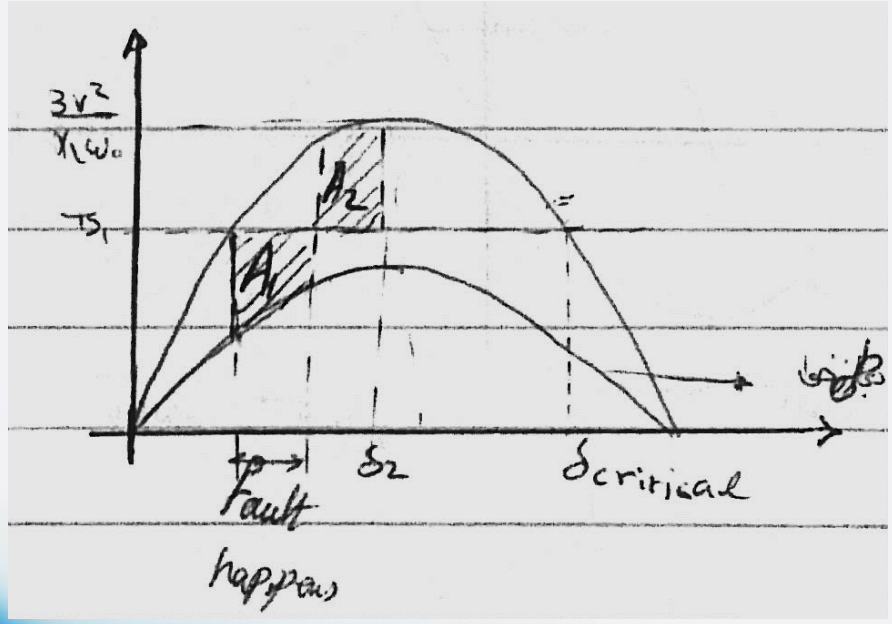
M_1 بزرگ (توربین‌های آبی)

پایداری گذرا





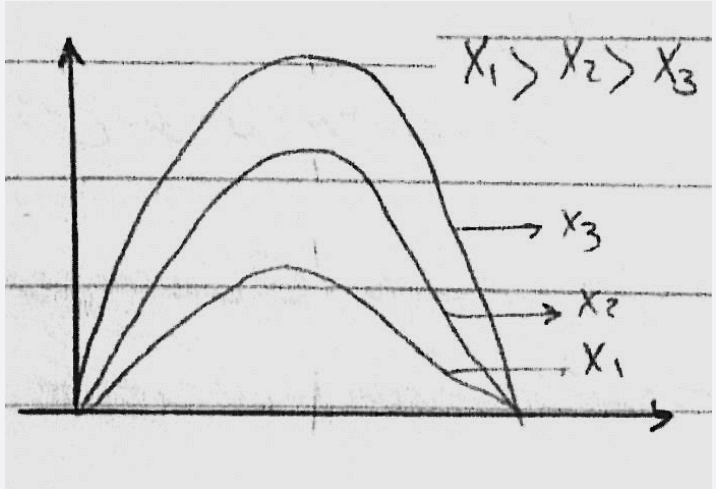
طی خطا



پایداری گذرا

قبل از fault کوپل مقاوم با کوپل محرک برابر است و در زاویه‌ی قدرت $\overline{\delta_1}$ می‌باشد. در طول fault کوپل مقاوم به نصف تقلیل می‌یابد و بنابراین ژنراتور شتاب می‌گیرد تا لحظه‌ای که fault برطرف می‌شود انرژی ذخیره شده در ژنراتور در طول fault برابربا سطح A_1 می‌باشد. بعد از برطرف شدن fault به دلیل اینکه کوپل مقاوم بیش از کوپل محرک است ژنراتور یک شتاب منفی می‌گیرد و سرعت آن رو به کاهش می‌گذارد.

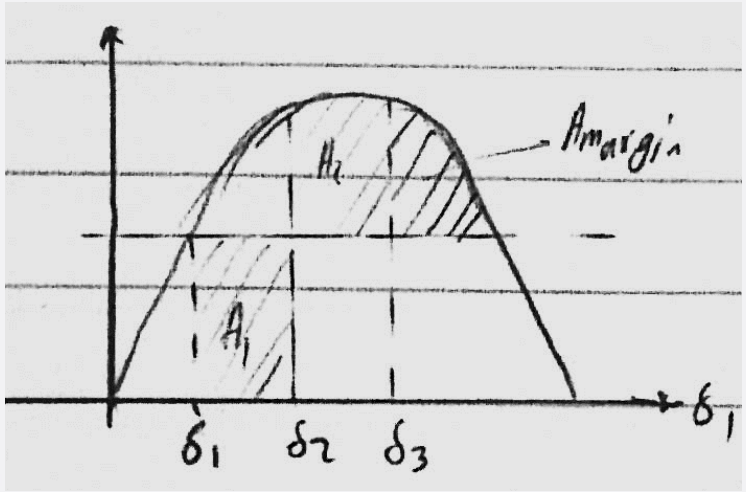
ولی δ_1 بخاطر وجود انرژی ذخیره شده تا δ_2 افزایش می‌یابد سپس شروع به کاهش می‌کند. روشن است که بالای خط T_{s1}=cons. بایستی فضای کافی برای ایجاد سطح $A_1=A_2$ وجود داشته باشد در غیر اینصورت چنانچه δ_1 از $\delta_{critical}$ تجاوز کند کوپل مقاوم کمتر از کوپل محرک خواهد شد و ژنراتور از حالت سنکرون خارج می‌شود.

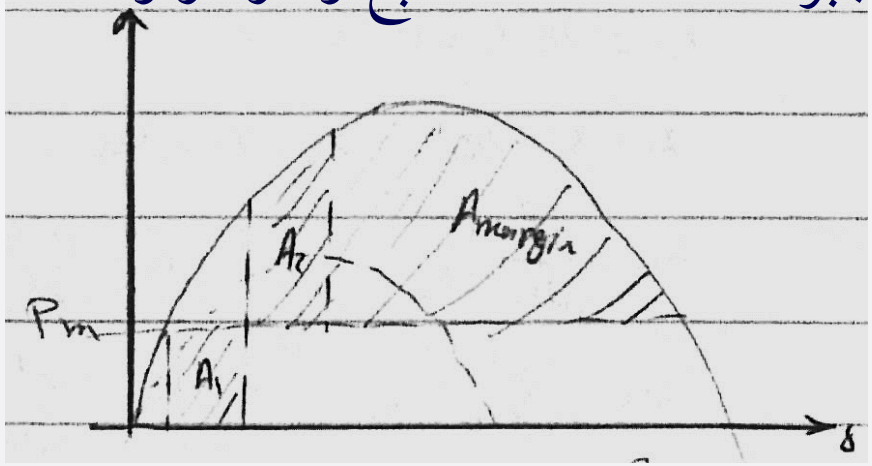


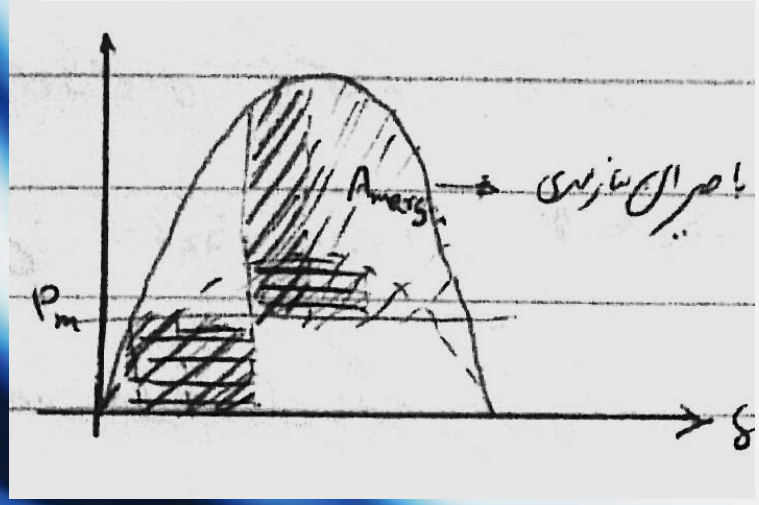
هرقدر طول خط انتقال زیاد شود، پایداری گذرای سیستم در معرض خطر جدی قرار می گیرد.

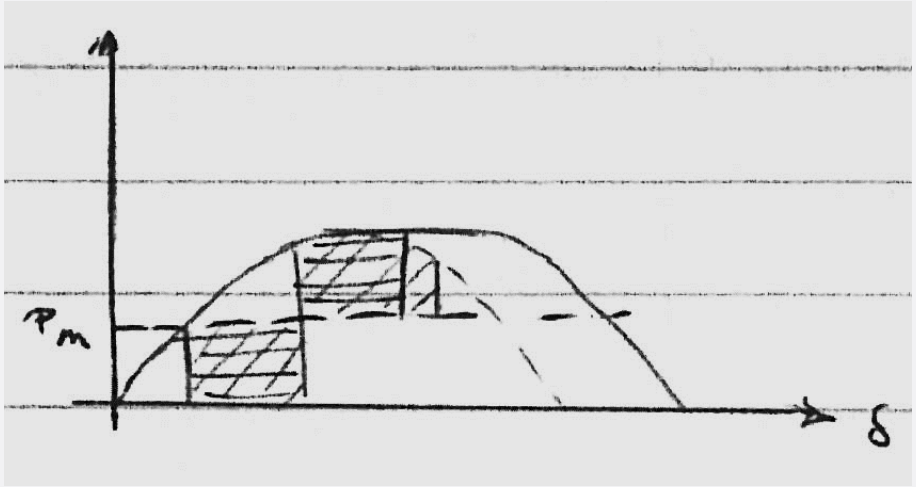
روش‌های جبران‌سازی و بهبود پایداری گذرا

جبران کننده شنت (منبع ولتاژ در وسط خط)









هر سه نوع جبران‌سازی‌های سری، شنت و .P.S سطح رزرو بیشتری نسبت به سیستم بدون جبران‌سازی برای پاک‌سازی fault ایجاد می‌کنند بنابراین از نقطه نظر پایداری گذرا می‌توان ظرفیت خط انتقال با جبران‌کننده را بطور نسبی افزایش داد.

روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

در این روش مسیرهای حالت (مسیرهای فاز) در صفحه‌ی X_1-X_2 ترسیم می‌شوند به کمک این روش می‌توان در مورد پایداری نقطه تعادل و نوع آن نظر داد. معادلات حالت یک سیستم درجه دوم غیرخطی در حالت کلی بصورت زیر داده می‌شود.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2) \\ \dot{x}_2 = f_2(x_1, x_2) \end{cases}$$

تعریف: X=Xe را حالت تعادل معادلات دینامیکی * می‌نامند. هرگاه اگر مسیر حالت سیستم به این نقطه برسد در این نقطه باقی می‌ماند به عبارت دیگر $\dot{X}_e = 0$

روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

هر چند معادلات * در حالت کلی غیرخطی هستند اما می‌توان برای تغییرات کوچک حول نقطه‌ی تعادل سیستم این معادلات را خطی کرد و به کمک ابزارهای شناخته شده سیستم‌های خطی در مورد پایداری نقطه تعادل سیستم‌های دینامیکی نظر داد.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = a_1 x_1 + a_2 x_2 \\ \dot{x}_2 = b_1 x_1 + b_2 x_2 \end{cases}$$

$$x_1 = X_1 - X_{e_1} \quad , \quad x_2 = X_2 - X_{e2}$$

$$a_1 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_1}\right|_{X_e} \qquad b_1 = \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{X_e}$$

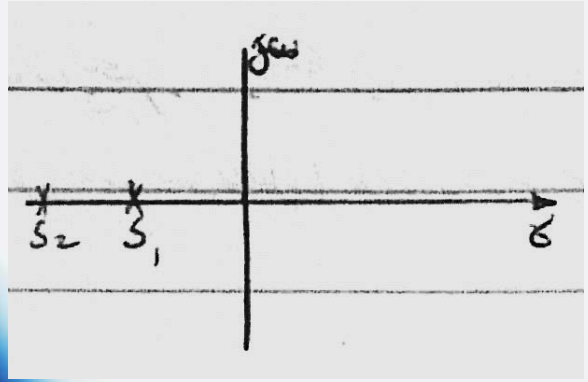
$$a_2 = \left.\frac{\partial f_1}{\partial x_2}\right|_{X_e} \qquad b_2 = \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{X_e}$$

$$\dot{x} = Ax \qquad A = \begin{pmatrix} a_1 & a_2 \\ b_1 & b_2 \end{pmatrix}$$

روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

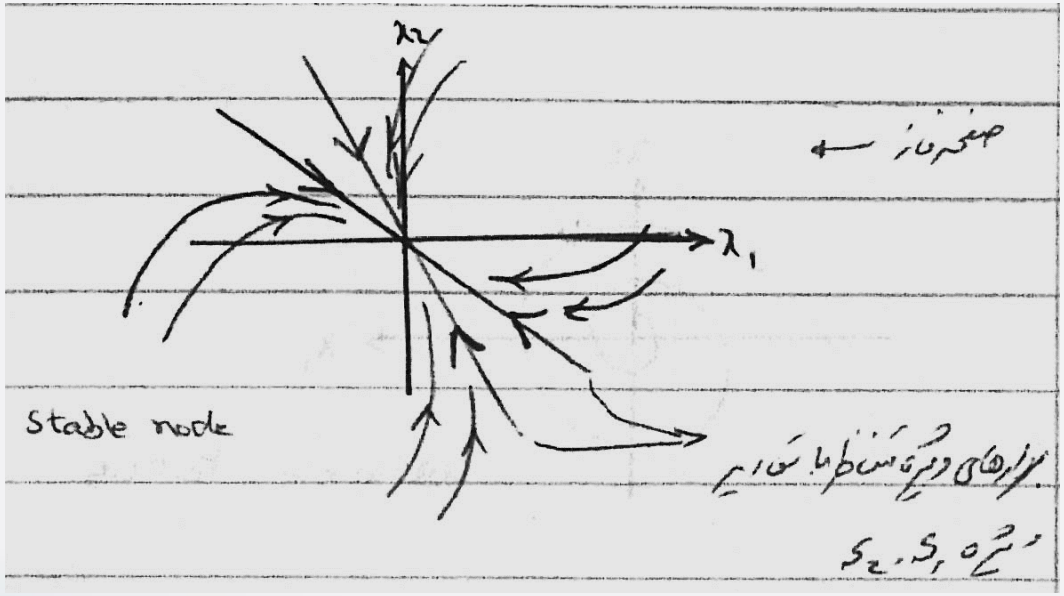
برای بررسی پایداری سیستم خطی شده مقادیر ویژه‌ی ماتریس A را بدست می‌آوریم:

$$\det(SI-A)=0 \rightarrow S_1,S_2$$



حالت اول: $S_1<0$ و $S_2<0$

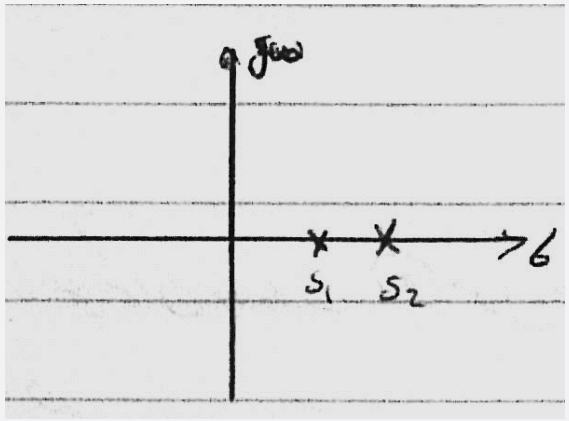
در این حالت نقطه تعادل را گره پایدار می‌نامند.

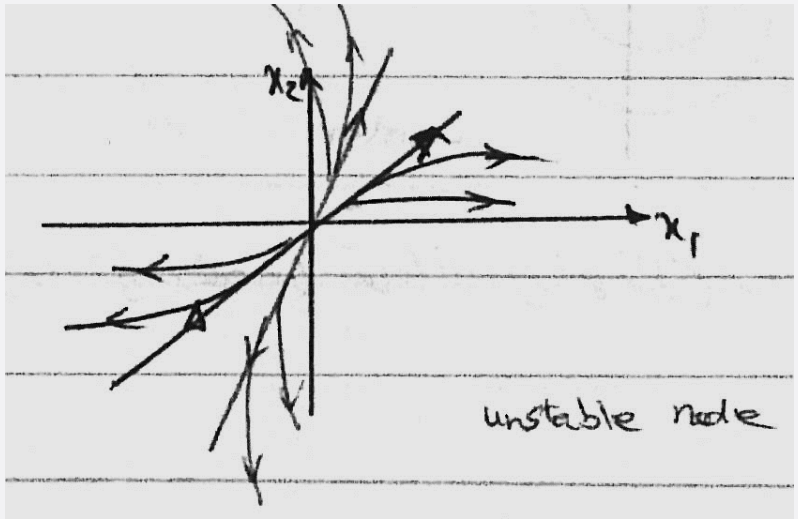


روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

حالت دوم: $S_1>0$ و $S_2>0$

در این حالت نقطه‌ی تعادل را گره ناپایدار می‌نامند.

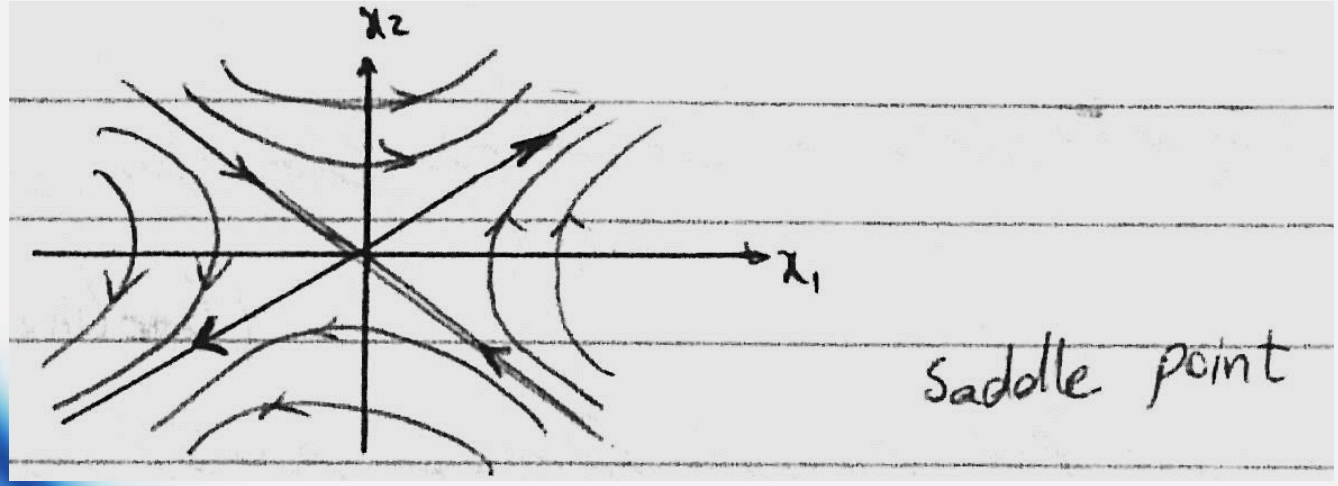




روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

حالت سوم: $S_1>0$ و $S_2<0$

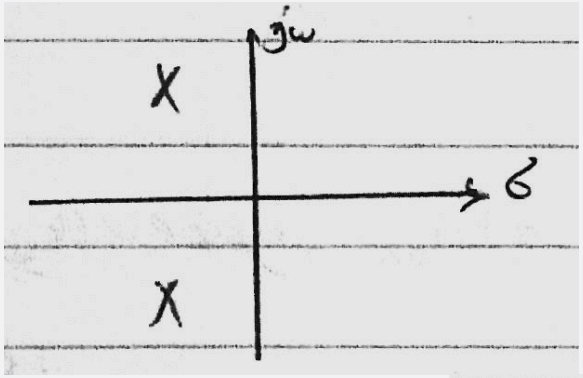
در این حالت تعادل را نقطه زین می‌نامند.

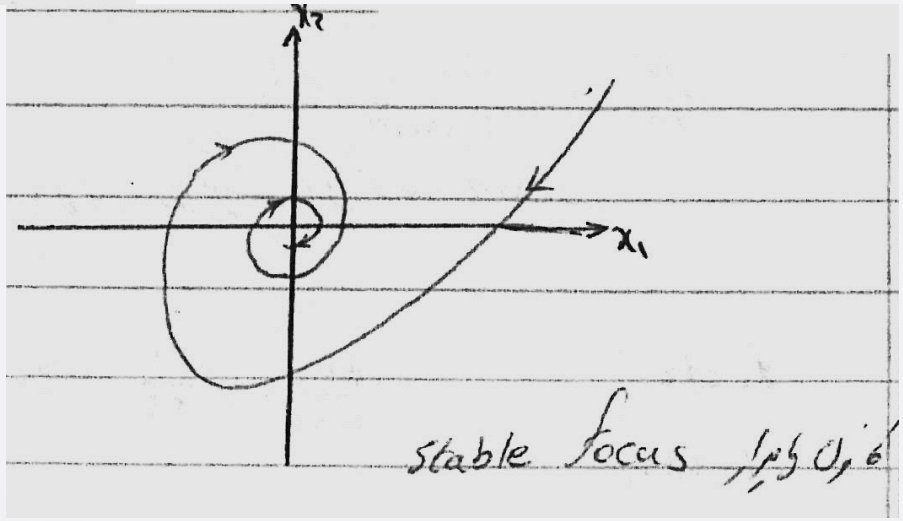


روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی

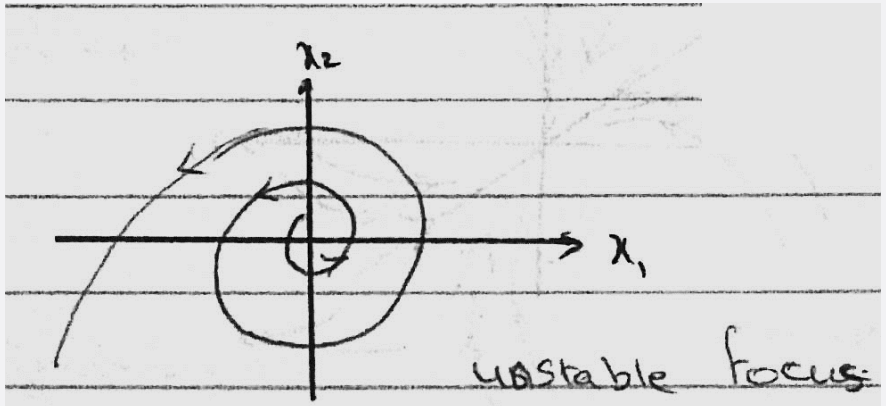
حالت چهارم: $S_1,S_2=\sigma \pm j\omega$ $\sigma < 0$

نقطه تعادل را کانون پایدار می‌نامند.





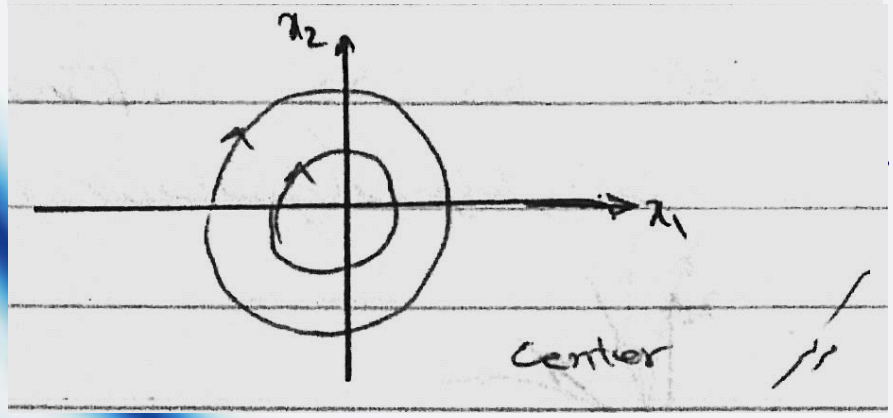
روش صفحه فاز برای بررسی رفتار سیستم‌های غیر خطی دوبعدی



حالت پنجم: $S_1,S_2=\sigma \pm j\omega$

$\sigma > 0$

در این حالت نقطه تعادل را کانون ناپایدار می‌نامند.



حالت ششم: $S_1,S_2=\pm j\omega$

در این حالت نقطه تعادل را مرکز می‌نامند.

با خطی کردن معادلات * حول نقطه‌ی تعادل پایداری محلی (local) نقاط تعادل را می‌توان مورد بررسی قرار داد.

روش‌های ترسیم مسیر فاز

۱- روش تحلیلی:

$$\left.\begin{aligned}\dot{x}_1 &= f_1(x_1,x_2)\\ \dot{x}_2 &= f_2(x_1,x_2)\end{aligned}\right\} \rightarrow \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{f_2(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)}$$

با حل معادله دیفرانسیل فوق با شرایط اولیه مورد نظر مسیر حالت به فرم بسته بدست آمده و در صفحه فاز قابل ترسیم است.

۲- روش خطوط هم شیب:

در صفحه‌ی X_1-X_2 شیب خطوط مماس بر مسیر فاز می‌تواند در هر نقطه محاسبه شود. مکان هندسی نقاطی از صفحه‌ی X_1-X_2 که شیب خطوط مماس بر مسیرهای فاز روی آنها ثابت است خطوط هم شیب نامیده می‌شوند.

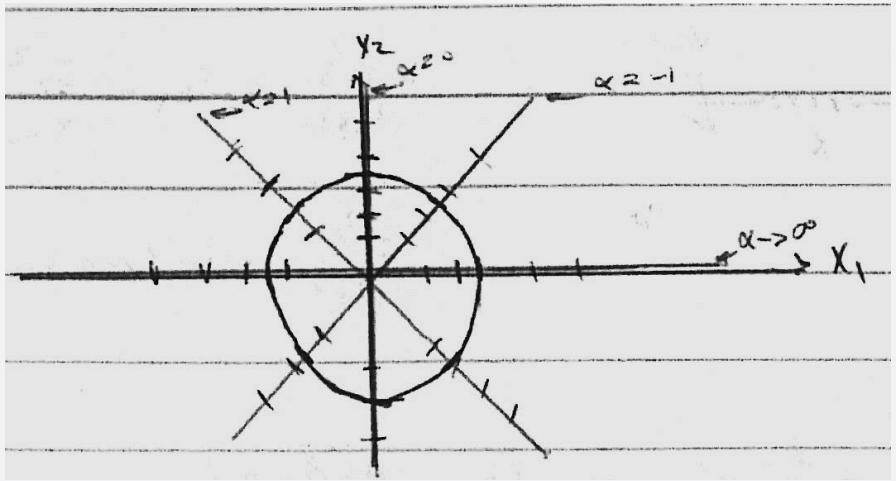
$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{f_2(x_1,x_2)}{f_1(x_1,x_2)} = \alpha$$

بنابراین تمام نقاط روی منحنی $f_2(x_1,x_2) = \alpha f_1(x_1,x_2)$ دارای شیب مماس ثابت α هستند.

روش‌های ترسیم مسیر فاز

مثال:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 \end{cases} \qquad \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-x_1}{x_2} = \alpha \rightarrow x_1 = -\alpha x_2$$



روش‌های ترسیم مسیر فاز

مثال:

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\left[0.2\,(x_1^2 - 1)\,x_2 + x_1\right]$$

$$\dot{x}_1 = 0 \Rightarrow x_2 = 0$$

$$\dot{x}_2 = 0 \Rightarrow x_1 = 0$$

$$\Rightarrow x_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}_2 = -0.2\,x_1^2 x_2 - 0.2\,x_2 - x_1 = f_2(x_1, x_2)$$

$$\dot{x}_2 = \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_1}\right|_{x_e}(x_1 - 0) + \left.\frac{\partial f_2}{\partial x_2}\right|_{x_e}(x_2 - 0) = \left(-0.4\,x_1 x_2 - 1\right)\Big|_{x_1} - 0.2\,x_1^2\Big|_{0}\,x_2$$

$$\dot{x}_2 = x_1$$

روش‌های ترسیم مسیر فاز

مثال:

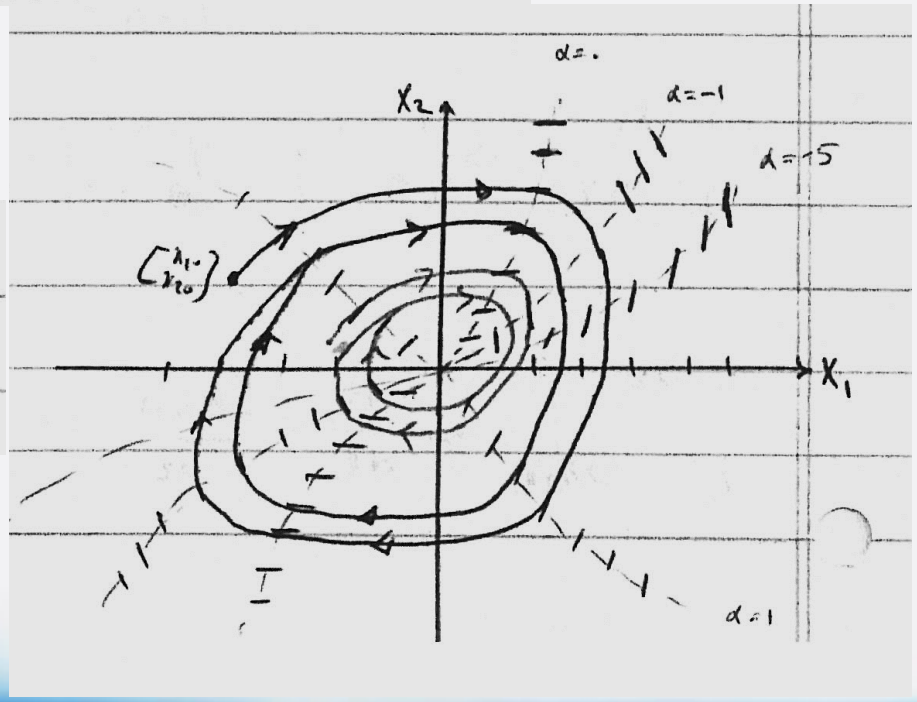
$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -x_1 \end{cases} \qquad A = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \qquad \det(A - sI) = 0 \Rightarrow \begin{bmatrix} -s & -1 \\ 1 & -s \end{bmatrix} = 0$$

$$\Rightarrow s^2 + 1 = 0 \Rightarrow s = \pm j$$

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-[0.2(x_1^2 - 1)x_2 + x_1]}{x_2} = \alpha$$

$$\alpha = 0 \Rightarrow -0.2x_1^2 x_2 + 0.2x_2 - x_1 = 0$$

$$\alpha = 1 \Rightarrow -0.2x_1^2 x_2 + 0.2x_2 - x_1 - x_2 = 0$$

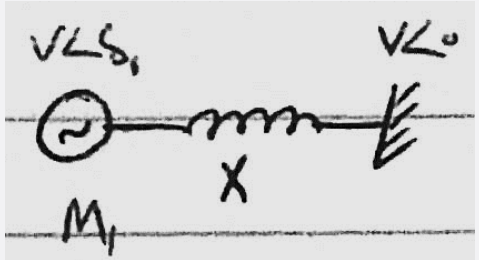


روش‌های ترسیم مسیر فاز

مثال:

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = Ts_1 - \frac{3V^2}{X\omega_0}\sin\delta_1$$

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = A - B\sin\delta_1 \qquad A = \frac{Ts_1}{M} \qquad B = \frac{3V^2}{X\omega_0 M_1}$$



$$\begin{cases} x_1 = \delta_1 \\ x_2 = \dot{x}_1 = \dfrac{d\delta_1}{dt} = \omega \rightarrow \dot{x}_2 = A - B\sin x_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = A - B\sin x_1 \end{cases}$$

با فرض A=0

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -B\sin x_1 \end{cases} \qquad X_{e1} = \begin{bmatrix} 2k\pi \\ 0 \end{bmatrix} \qquad X_{e2} = \begin{bmatrix} (2k+1)\pi \\ 0 \end{bmatrix}$$

روش‌های ترسیم مسیر فاز

معادلات را حول نقطه‌ی تعادل $X_{e1} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$ که نماینده گروه اول است خطی می‌کنیم

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -B\cos x_1\big|_{x_{e_1}} x_1 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -Bx_1 \end{cases} \rightarrow A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -B & 0 \end{bmatrix}$$

$$\det(\mathrm{A} - \mathrm{SI}) = 0 \rightarrow \begin{vmatrix} -S & 1 \\ -B & -S \end{vmatrix} = 0 \rightarrow S^2 + B = 0 \rightarrow S = \pm j\sqrt{B} \quad B > 0$$

بنابراین نقاط تعادل از دسته X_{e1} از نوع مرکز است.

معادلات را حول نقطه تعادل $X_{e2} = \begin{bmatrix} \pi \\ 0 \end{bmatrix}$ که نماینده گروه دوم است خطی می‌کنیم.

روش‌های ترسیم مسیر فاز

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -B\cos x_1\big|_{x_{e_2}} (X_1 - \pi) = Bx_1 \ , x_1 = X_1 - \pi \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Bx_1 \end{cases} \rightarrow A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ B & 0 \end{bmatrix}$$

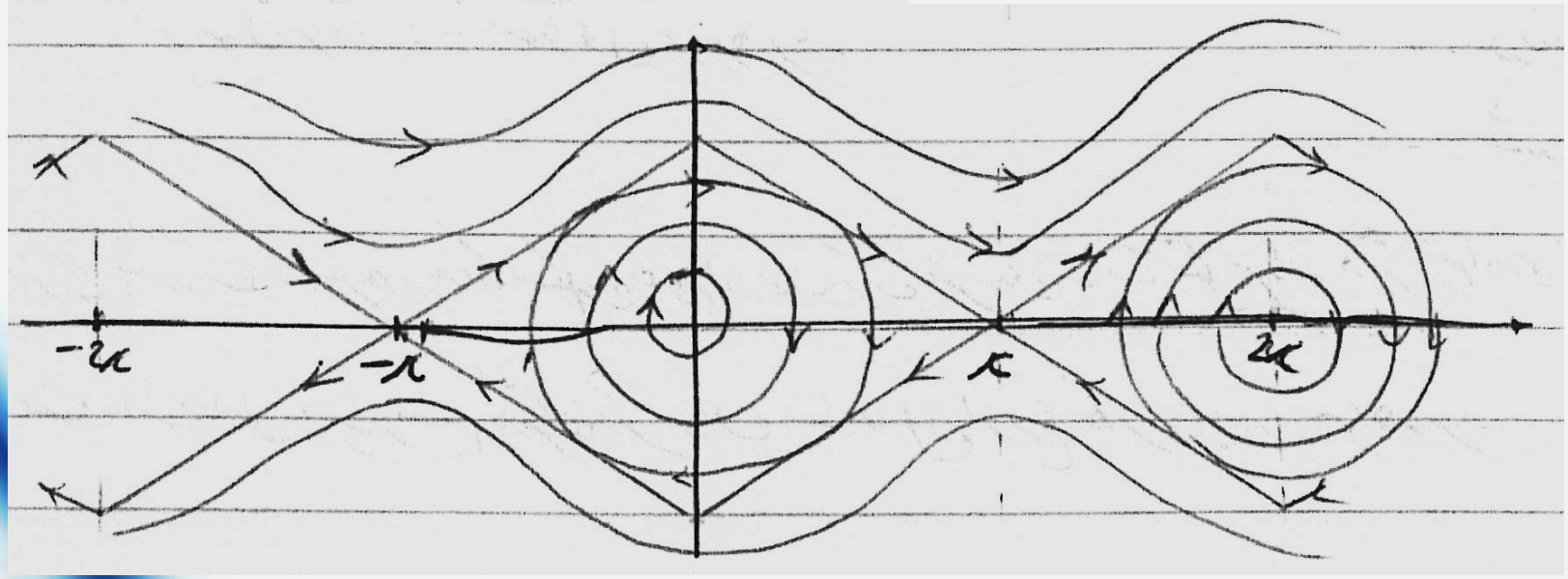
$$\det(A - SI) = 0 \rightarrow \begin{vmatrix} -S & 1 \\ 0 & -S \end{vmatrix} = 0 \rightarrow S^2 - B = 0 \rightarrow S = \pm\sqrt{B}$$

نقطه تعادل از نوع زین است.

روش‌های ترسیم مسیر فاز

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\beta \sin x_1 \Rightarrow \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-\beta \sin x_1}{x_2} = \alpha$$



میرایی نوسانات

اگر در معادلات دینامیکی ماشین یک ترم $\frac{d\delta_1}{dt}$ اضافه شود انگاه نوسانات سیستم میرا خواهد شد.

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} + k_d \frac{d\delta_1}{dt} = Ts_1 - \frac{3V^2}{X\omega_0} \sin\delta_1$$

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = A - B\sin\delta_1 - D\frac{d\delta_1}{dt_1}$$

با فرض A=0

$$x_1 = \delta_1 \rightarrow \dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -B\sin x_1 - Dx_2$$

نقاط تعادل این سیستم همان نقاط تعادل سیستم بدون میراکننده می‌باشند.

میرایی نوسانات

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-B\sin x_1}{x_2} - D$$

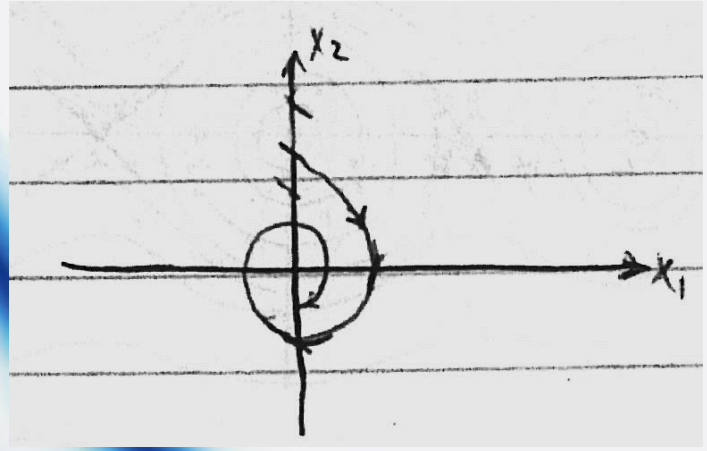
$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-B\sin x_1}{x_2} + \alpha$$

بدون میرائی

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \alpha - D = \alpha'$$

با میرائی

این بدان معنی است که شیب خطوط مماس بر مسیر فاز روی خطوط هم شیب در مقایسه با حالت بدون میرائی منفی‌تر می‌شود.



می‌توان نتیجه گرفت که مسیرهای فازی که سیکل‌های حدی را در جهت حرکت عقربه‌های ساعت شکل می‌دادند و در اثر ترم اضافی D- به سمت نقطه تعادل پایدار سیستم همگرا می‌شوند این نقطه تعادل از نوع کانون پایدار خواهد بود.

میرایی نوسانات

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -Bx_1 - Dx_2 \end{cases} \quad , \quad x_e = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\det(SI - A) = 0 \rightarrow \begin{vmatrix} S & -1 \\ B & S+D \end{vmatrix} = 0 \rightarrow S^2 + DS + B = 0$$

$$\rightarrow S = \frac{-D}{2} \pm \sqrt{\frac{D^2}{4} - B}$$

$$If \;\; B > \frac{D^2}{4} \rightarrow S = \frac{-D}{2} \pm j\sqrt{B - \frac{D^2}{4}}$$

$$x_e = \begin{bmatrix} \pi \\ 0 \end{bmatrix} \qquad \begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Bx_1 - Dx_2 \end{cases} \qquad \det(SI - A) = 0$$

$$\begin{vmatrix} S & -1 \\ -B & S+D \end{vmatrix} = 0 \rightarrow S^2 + DS - B = 0 \rightarrow S = \frac{-D}{2} \pm \sqrt{\frac{D^2}{4} + B}$$

بنابراین نقطه تعادل یک گره ناپایدار است.

چگونگی ایجاد میرایی در سیستم

$$\frac{d^2}{dt^2}(\delta_1-\delta_0)+k_d\frac{d}{dt}(\delta_1-\delta_0)=\left(\frac{T_{S1}}{M_1}+\frac{T_{S0}}{M_O}\right)-\left(\frac{1}{M_1}+\frac{1}{M_O}\right)\frac{3V_0V_1}{X\omega_0}\sin(\delta_1-\delta_0)$$

$$\frac{d^2(\delta_1-\delta_0)}{dt^2}=\left(\frac{T_{S1}}{M_1}+\frac{T_{S0}}{M_O}\right)-\left(\frac{1}{M_1}+\frac{1}{M_O}\right)\frac{3V_0V_1}{X\omega_0}\sin(\delta_1-\delta_0)$$

برای ایجاد ترم میرائی در معادلات اولیه باید یکی از ثابت‌ها را طوری تغییر دهیم که تغییرات بفرم $\frac{d}{dt}(\delta_1-\delta_0)$ ظاهر شود. این ثابت‌ها عبارتند از T_{s1} و X و ω و V

فرض کنید V در طرف فرستنده دارای تغییرات جزیی می‌باشد.

$$V_1=V+\Delta V$$

$$\frac{d^2(\delta_1-\delta_0)}{dt^2}=\left(\frac{T_{S1}}{M_1}+\frac{T_{S0}}{M_O}\right)-\left(\frac{1}{M_1}+\frac{1}{M_O}\right)\frac{3V_0V_1}{X\omega_0}\sin(\delta_1-\delta_0)$$

چگونگی ایجاد میرایی در سیستم

$$\delta_1 = \bar{\delta}_1 + \Delta\delta_1$$

$$\delta_0 = \bar{\delta}_0 + \Delta\delta_0$$

$$\delta_{10} = \Delta\delta_1 - \Delta\delta_0$$

$$V_1 = V + \Delta V$$

$$V_0 = V_1 = V$$

اگر معادلات فوق را خطی نماییم

$$\frac{d^2\delta_{10}}{dt^2} = -\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V_0V_1}{X\omega_0}\cos(\delta_1 - \delta_0)\big|_0(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_0) - \frac{3V_0}{X\omega_0}\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\sin(\delta_1 - \delta_0)\big|_0\Delta V$$

$$\frac{d^2\delta_{10}}{dt^2} = -\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V}{X\omega_0}\sin(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0)\Delta V - \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V^2}{X\omega_0}\cos(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0)\delta_{10}$$

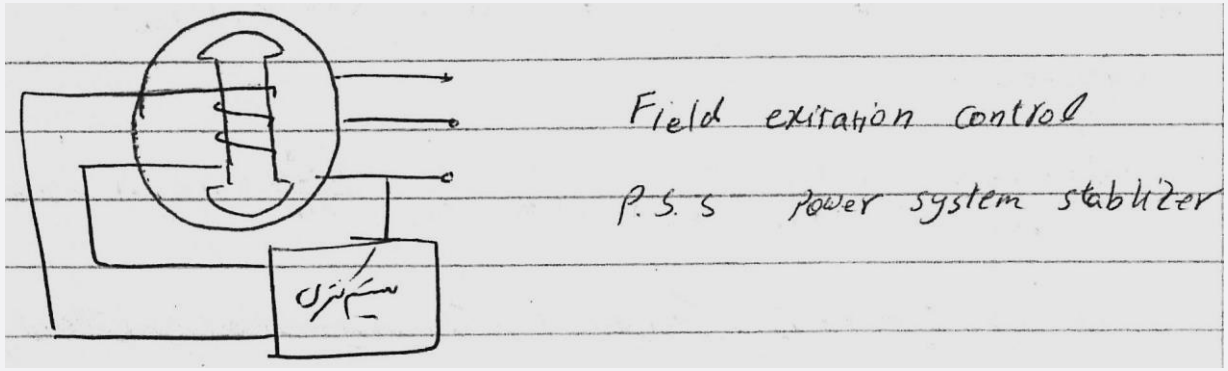
$$\Delta V = C_1\frac{d}{dt}(\delta_1 - \delta_0) = C_1\omega_{10}$$

$$\frac{d^2\delta_{10}}{dt^2} = -K_d\frac{d}{dt}\delta_{10} - A\delta_{10}$$

$$A = \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V^2}{X\omega_0}\cos(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0)$$

$$K_d = C_1\left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_O}\right)\frac{3V}{X\omega_0}\sin(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_0)$$

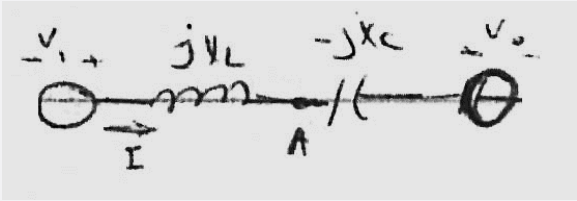
چگونگی ایجاد میرایی در سیستم



این سیستم، سیستم چندان خوبی نیست؛ زیرا اندوکتانس مدار تحریک بزرگ است در نتیجه ثابت زمانی مدار تحریک بزرگ می‌باشد و سیستم کنترل در مقابل نوسانات سیستم قدرت عکس العمل فوری نشان می‌دهد.

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

جبران‌سازی سری:



$$I = \frac{V_1 - V_0}{j\left(x_L - x_C\right)} \qquad V_1 = V\angle\delta_1 \qquad V_0 = V\angle\delta_0$$

$$\bar{V}_L = jx_L I = \left(V_1 - V_0\right)\frac{x_L}{x_L - x_C}$$

در حالتی که جبران‌کننده نباشد

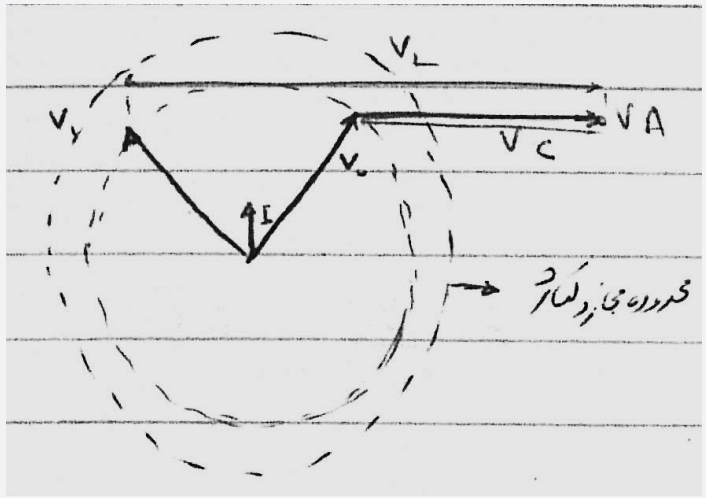
$$\bar{V}_c = -jx_C I = -jx_C\,\frac{V_1 - V_0}{j\left(x_L - x_C\right)} = -\frac{x_C}{x_L - x_C}\left(V_1 - V_0\right)$$

$$V_L = jx_L I = jx_L\,\frac{V_1 - V_0}{jx_L} = V_1 - V_0$$

$$V_L = \bar{V}_L + V_C$$

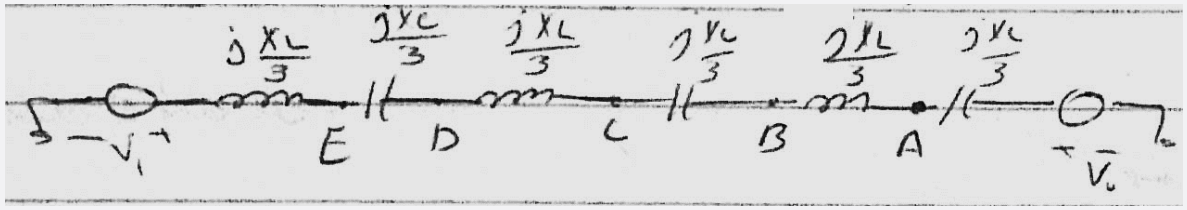
$$V_A = V_1 + \bar{V}_L \qquad V_A = V_0 + V_C$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

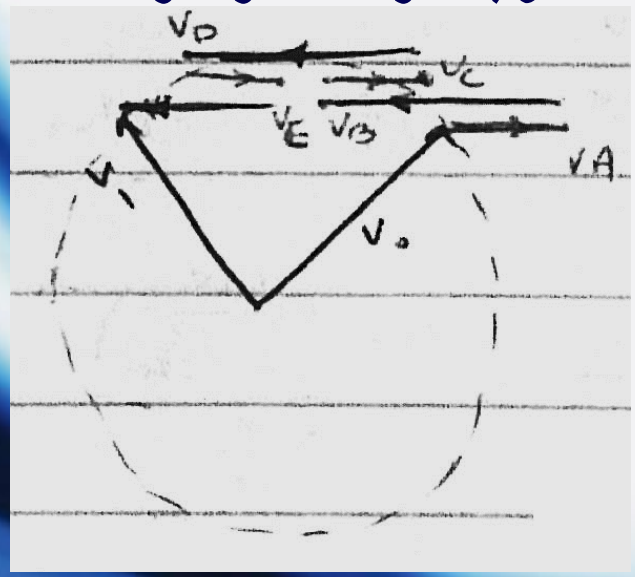


همانگونه که از شکل بر می‌آید در اثر استفاده خازن بصورت متمرکز امکان over voltage وجود خواهد داشت. از این رو جبران‌سازی سری را بصورت قسمت به قسمت (sectioning) انجام می‌دهند.

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها



با این تکنیک over voltage کاهش می‌یابد و می‌توان با انتخاب مناسب تعداد sectionها از افزایش ولتاژ خارج از حد استاندارد جلوگیری کرد. (لازم نیست قسمت‌ها مساوی باشند و قسمت سمت V_0 را می‌توان کوچکتر در نظر گرفت)



نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها

$$\frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{Ts_1}{M_1} - \frac{1}{M_1}\frac{3V^2}{X\omega_0}\sin\delta_1$$

$$\frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} = \frac{-3V^2}{M\left(X_L - X_C\right)\omega_0}\cos\bar{\delta}_1\Delta\delta_1$$

بعد از خطی سازی با فرض X و V ثابت

که در آن میرائی وجود نخواهد داشت

اگر فرض کنیم که $X=X_L-X_C$ دارای تغییرات باشد بعبارت دیگر $X_C=\bar{X}_C+\Delta X_C$

$$\frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} = \left(\frac{-3V^2}{M\left(\bar{X}_L - \bar{X}_C\right)}\cos\bar{\delta}_1\right)\Delta\delta_1 - \frac{3V^2\sin\delta_1}{M\omega_0\left(\bar{X}_L - \bar{X}_C\right)^2}\Delta X_c$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها

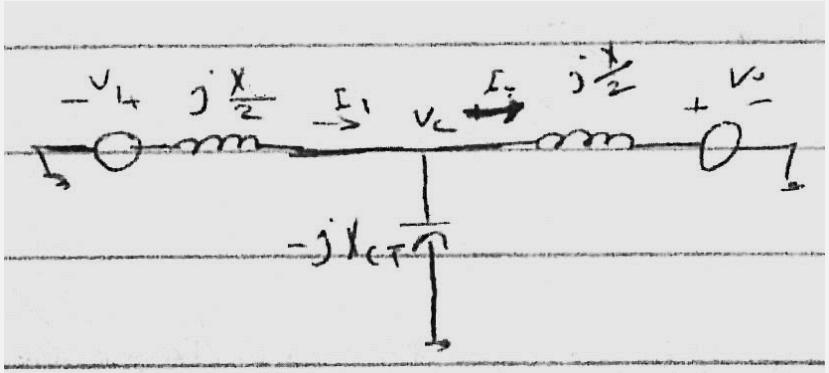
$$\Delta X_C = K_1 \frac{d\Delta\delta_1}{dt}$$

$$\frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} + K_d \frac{d\Delta\delta_1}{dt} = -A\Delta\delta_1$$

$$K_d = \frac{3V^2 \sin\bar{\delta}_1}{M\,\omega_0\left(\bar{X}_L - \bar{X}_C\right)} K_1 \qquad A = \frac{3V^2}{M\left(\bar{X}_L - \bar{X}_C\right)} \cos\bar{\delta}$$

روشن است که این مزیت توسط خازن‌هایی که با سوئیچ‌های الکترومکانیکی سوئیچ شوند قابل حصول نمی‌باشند و بایستی توسط ادوات FACTS به دست آید.

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها



جبران‌سازی موازی خازنی:

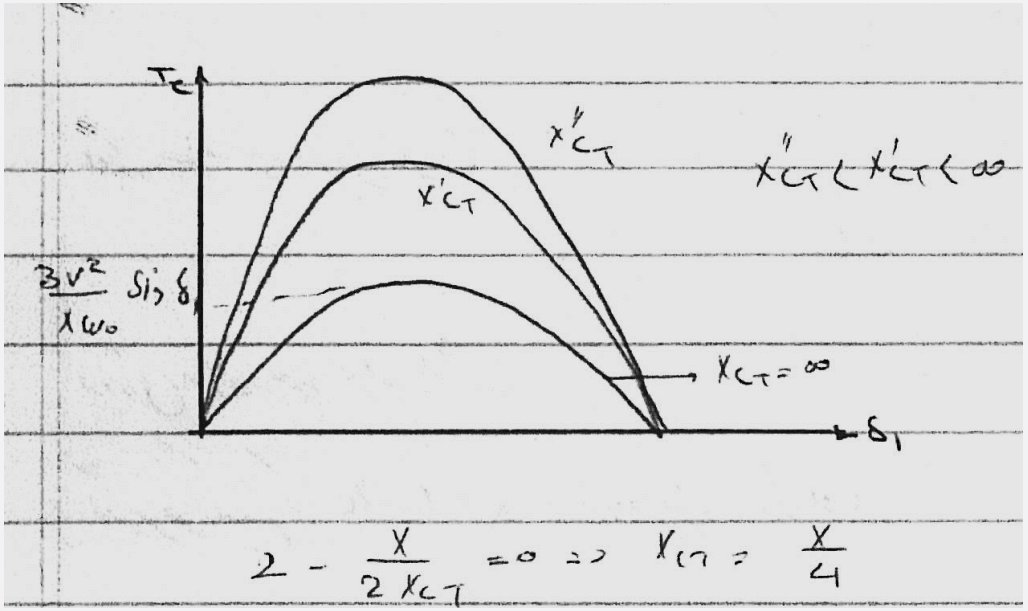
$$\frac{V_1 - V_c}{j\frac{x}{2}} + \frac{V_0 - V_c}{j\frac{x}{2}} = \frac{V_c}{-jx_{CT}}$$

$$V_c = \frac{V_1 + V_0}{2 - \frac{x}{2x_{CT}}} = \frac{V\cos\frac{\delta}{2}}{1 - \frac{x}{4x_{CT}}}$$

$$I_1 = \frac{V_1 - V_c}{j\frac{x}{2}} = \frac{V_1 - \frac{V_1 + V_0}{2 - \frac{x}{2x_{CT}}}}{j\frac{x}{2}}$$

$$P = 3\Re e\left[V_1 I_1^*\right] = \frac{3V^2}{\frac{x}{2}\left(2 - \frac{x}{2x_{CT}}\right)}\sin\delta_1 = T_e\omega_0$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها



اگر $X_{CT} < \frac{X}{4}$ باشد جهت توان در سیستم عوض می‌شود (sign change over).

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

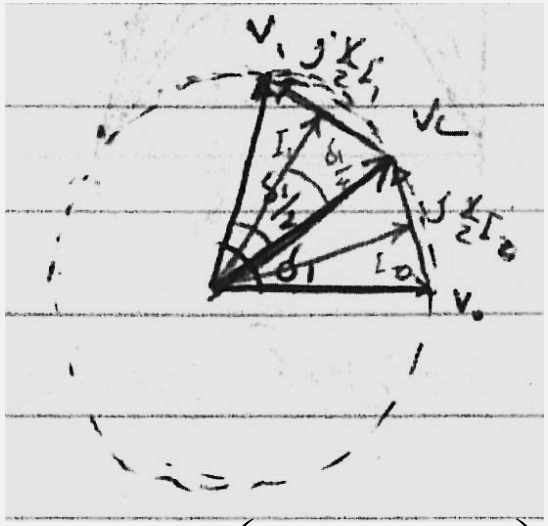
اگر X_{CT} به نحوی کنترل شود که V_C=1 $P.U$ و یا V_C=V (for all δ_1)

$$|V_C| = \left| \frac{V_1 + V_0}{2 - \frac{x}{2x_{CT}}} \right| = V$$

$$P = \frac{3V^2}{\frac{x}{2}} \sin\frac{\delta_1}{2}$$

$$\frac{x}{2}|I_0| = 2V \sin\frac{\delta_1}{4}$$

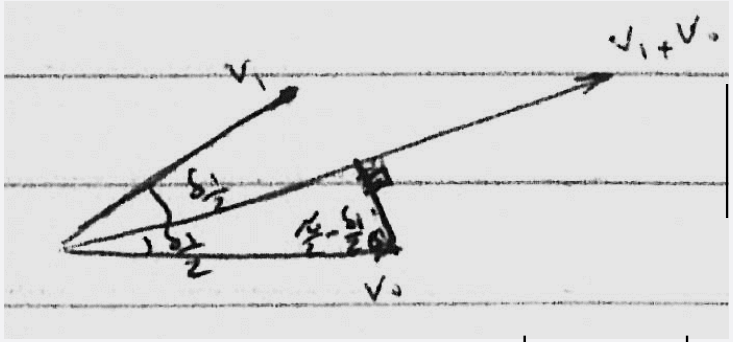
$$\frac{x}{2}|I_1| = 2V \sin\frac{\delta_1}{4}$$



$$I_c = I_1 - I_0 = 2V \sin\frac{\delta_1}{4}\left(e^{j\frac{3\delta_1}{4}} - e^{j\frac{\delta_1}{4}}\right) = 2V \sin\frac{\delta_1}{4}\left(e^{j\frac{\delta_1}{4}} - e^{j\frac{\delta_1}{4}}\right)e^{j\frac{\delta_1}{2}} =$$

$$= 4jVe^{j\frac{\delta_1}{2}}.\sin\frac{\delta_1}{4}\sin\frac{\delta_1}{4} = 4V \sin^2\frac{\delta_1}{4}e^{j\left(\frac{\pi}{2}+\frac{\delta_1}{2}\right)} \Rightarrow |I_C| = 4V \sin^2\frac{\delta_1}{4}$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها



$$\left|\frac{V_1+V_0}{2}\right| = V\cos\frac{\delta_1}{2} \Rightarrow |V_1+V_0| = 2V\cos\frac{\delta_1}{2}$$

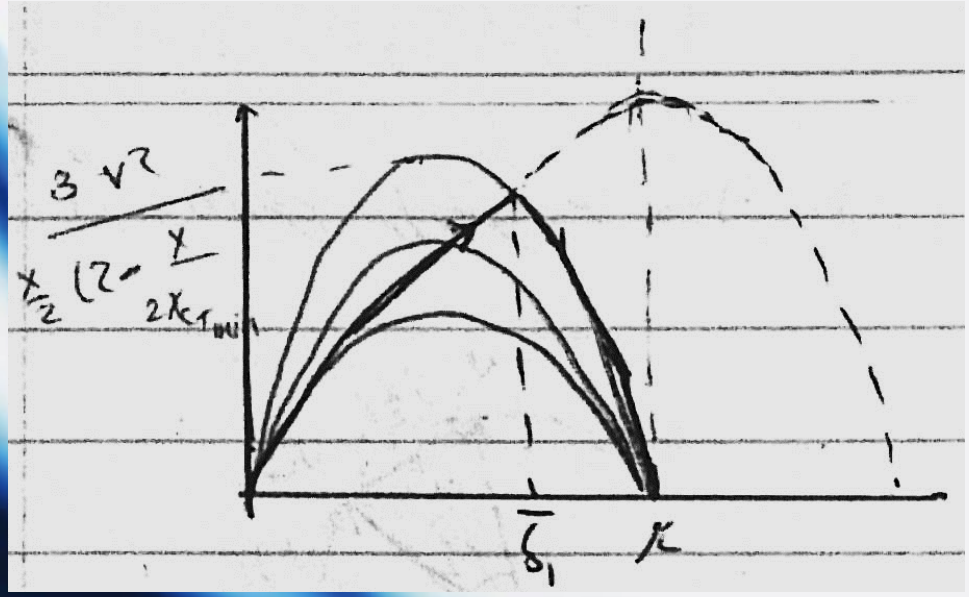
$$|V_C| = \frac{|V_1+V_0|}{2-\dfrac{x}{2x_{CT}}} = V \Rightarrow \frac{2V\cos\dfrac{\delta_1}{2}}{2-\dfrac{x}{2x_{CT}}} = V$$

$$2-\frac{x}{2x_{CT}} = 2\cos\frac{\delta_1}{2} \Rightarrow \frac{x}{2x_{CT}} = 2\left(1-\cos\frac{\delta_1}{2}\right) = 4\sin^2\frac{\delta_1}{4} \Rightarrow x_{CT} = \frac{x_l}{8\sin^2\dfrac{\delta_1}{4}}$$

مکانیزم کنترل X_{CT} بر حسب δ_1 برای تثبیت ولتاژ نقطه‌ی تعادل

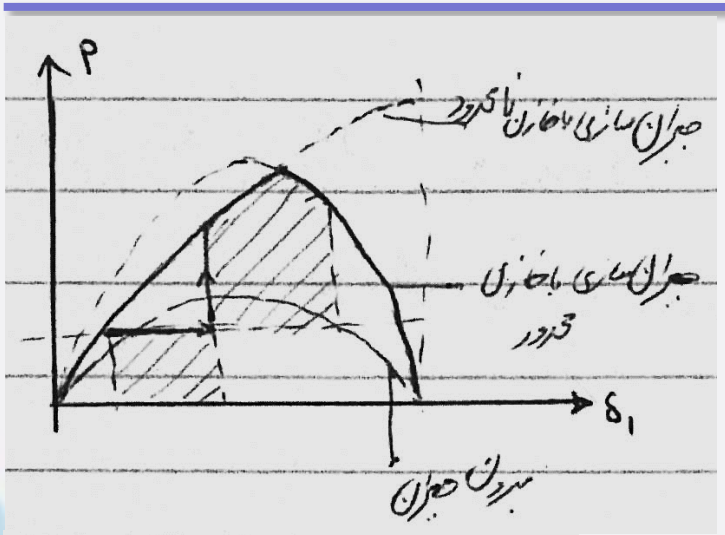
نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

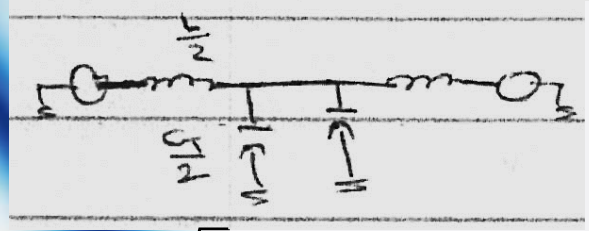
اگر δ_1 بزرگ شود X_{CT} بایستی کوچک شود و در نتیجه C بایستی بزرگ شود. اگر ماکزیمم خازن‌ها محدود باشد روابط به دست آمده تا $\delta_1 = \bar{\delta}_1$ که در آن از ماکزیمم ظرفیت خازن‌ها استفاده می‌شود معتبر خواهد بود و برای $\delta_1 > \bar{\delta}_1$ بایستی از روابط اولیه به دست آمده برای توان استفاده کرد.



از $\delta_1=0$ تا $\delta_1 = \bar{\delta}_1$ توان انتقالی از رابطه $\frac{3V^2}{\frac{X}{2}} \sin(\frac{\delta_1}{2})$ تبعیت می‌کند اما بعد از $\bar{\delta}_1$ به دلیل محدود بودن ظرفیت خازن‌ها منحنی توان به $\frac{3V^2}{\frac{X}{2}(2-\frac{X}{2XCTmin})}$ منتقل می‌شود

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها





$$x_{CT} = \frac{1}{8}\cdot\frac{x}{\sin^2\frac{\delta_1}{4}} \Rightarrow \frac{1}{\omega_0 C_T} = \frac{1}{8}\cdot\frac{\omega.l}{\sin^2\frac{\delta_1}{4}}$$

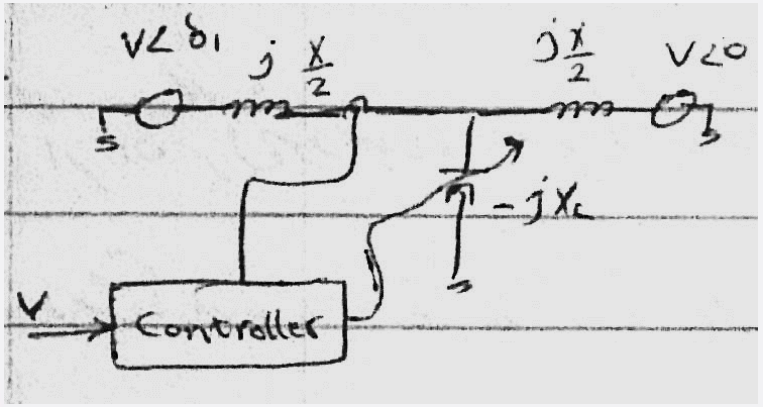
با توجه به تقارن موجود فرکانس تشدید از رابطه $\omega_r = \frac{1}{\sqrt{\frac{LC_T}{4}}}$ بدست می‌آید.

$$\omega_r = \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_0 \frac{1}{\sin\frac{\delta_1}{4}}$$

تشدید زمانی اتفاق می‌افتد که $\omega_r = \omega_0$ باشد یعنی $\delta_1 = \pi$ باشد.

اگر $\delta_1 < \pi$، $\omega_r > \omega_0$ می‌باشد یعنی اگر $\delta_1 < \pi$ باشد نوسانات زیر سنکرون وجود نخواهد داشت.

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

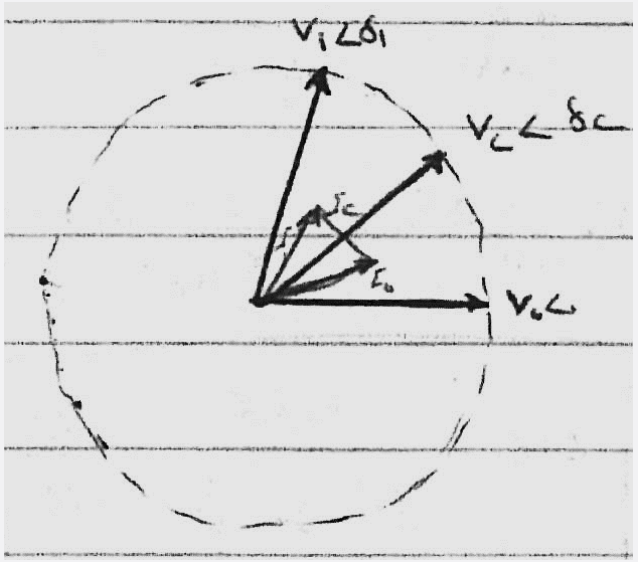


بلوک دیاگرام سیستم کنترل

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها

دینامیک سیستم برای تغییرات جزئی حول نقطه‌ی کار

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = Ts_1 - \frac{3V_1V_c}{\frac{x}{2}\omega_0}\sin\left(\delta_1 - \delta_c\right)$$



فرض کنید که نقطه‌ی کار $|V_c| = V$

$$\delta_1 = \bar{\delta}_1 + \Delta\delta_1 \qquad \delta_c = \bar{\delta}_c + \Delta\delta_c$$

در حالت تعادل $\dfrac{d^2\delta_1}{dt^2} = 0$

$$Ts_1 = \frac{3V_1V_c}{\frac{x}{2}\omega_0}\sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right) = \frac{3V^2}{\frac{x}{2}\omega_0}\sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right)$$

$$Ts_1 = \frac{3V^2}{\frac{x}{2}\omega_0}\sin\left(\bar{\delta}_c - 0\right) \Rightarrow \sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right) = \sin\bar{\delta}_c \Rightarrow \bar{\delta}_c = \frac{\bar{\delta}_1}{2}$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها

$$M_1 \frac{d^2\delta_1}{dt^2} = \frac{-3V^2}{\frac{x}{2}\omega_0} \cos\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right)\left(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_c\right)$$

$$\frac{3V_1V_c}{\frac{x}{2}} \sin\left(\delta_1 - \delta_c\right) = \frac{3V_cV_0}{\frac{x}{2}} \sin\delta_c$$

اصل بقای توان

$$\frac{3V^2}{\frac{x}{2}} \cos\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right)\left(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_c\right) = \frac{3V^2}{\frac{x}{2}} \cos\bar{\delta}_c . \Delta\delta_c$$

$$\bar{\delta}_1 = 2\bar{\delta}_c \Rightarrow \Delta\delta_1 - \Delta\delta_c = \Delta\delta_c \Rightarrow \Delta\delta_c = \frac{\Delta\delta_1}{2}$$

$$M_1 \frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} = \frac{-3V^2}{\frac{x}{2}\omega_0} \cos\frac{\bar{\delta}_1}{2}\left(\frac{\Delta\delta_1}{2}\right) \qquad M_1 \frac{d^2\Delta\delta_1}{dt^2} = \frac{-3V^2}{x\,\omega_0} \cos\frac{\bar{\delta}_1}{2}\Delta\delta_1$$

شرط پایداری

$$\cos\frac{\delta_1}{2} > 0 \Rightarrow \bar{\delta}_1 < \pi$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران‌کننده‌ها

نحوه‌ی ایجاد میرایی با کنترل X_C:

$$V_c = V + \Delta V_c$$

$$M_1 \frac{d^2 \Delta\delta_1}{dt^2} = \frac{-3VV_c}{\frac{x}{2}\omega_0} \cos\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right)\left(\Delta\delta_1 - \Delta\delta_c\right) - \frac{3V^2}{\frac{x}{2}\omega_0} \sin\left(\bar{\delta}_1 - \bar{\delta}_c\right)\Delta V_c$$

$$M_1 k_d \frac{d}{dt}\Delta\delta_1 = \frac{3V}{\frac{x}{2}\omega_0} \sin\frac{\bar{\delta}_1}{2}\Delta V_c$$

اگر رابطه روبرو برقرار باشد در سیستم میرایی ایجاد می‌شود

$$\Delta V_c = \frac{M_1 k_d}{\frac{3V}{\frac{x}{2}\omega_0}\sin\frac{\bar{\delta}_1}{2}} \cdot \frac{d\Delta\delta_1}{dt}$$

نحوه‌ی ایجاد میرایی توسط جبران کننده‌ها

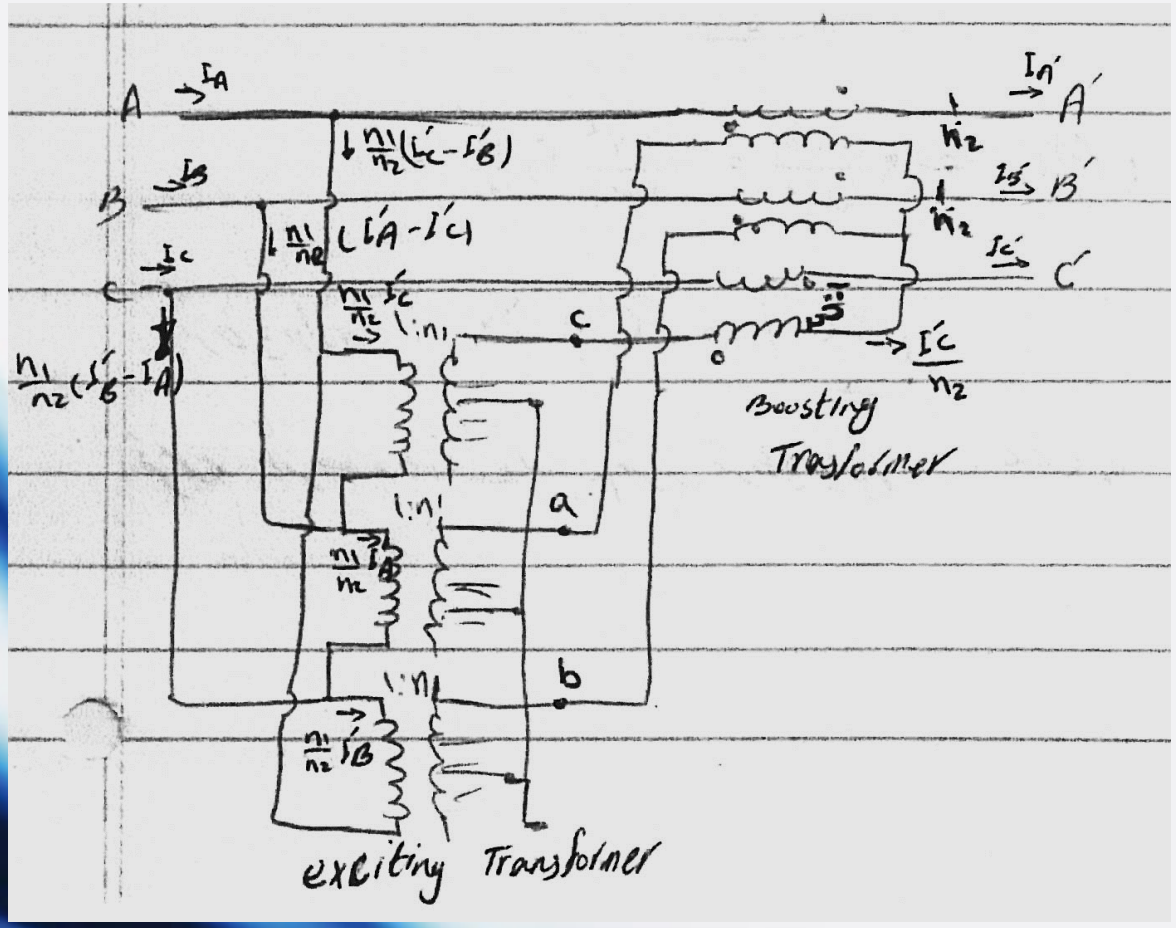
$$V_c = \frac{V_1 + V_0}{2 - \frac{x}{2x_{CT}}} = |V_C| e^{j\delta_c}$$

$$\Delta V_c = \frac{\partial V_C}{\partial x_{CT}} . \Delta x_{CT} = -\frac{V_1 + V_0}{\left(2 - \frac{x}{2x_{CT}}\right)^2} . \frac{-x}{2x_{CT}^2} . \Delta x_{CT}$$

$$\Delta V_c = V_C \left(\frac{x_l}{2x_{CT}}\right) . \frac{1}{2 - \frac{x_l}{2x_{CT}}} \Delta x_{CT}$$

نتیجه: ΔX_{CT} تنها دامنه X_C را تغییر می‌دهد و فاز X_C ثابت است.

Phase Shifters



Phase Shifters

$$V_{ABC} = \left[V_A \;\; V_B \;\; V_C\right]^T$$

$$V'_{ABC} = \left[V'_A \;\; V'_B \;\; V'_C\right]^T \qquad V_{abc} = \left[V_a \; V_b \; V_c\right]^T$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & n_1 & -n_1 \\ -n_1 & 0 & n_1 \\ n_1 & -n_1 & 0 \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \rightarrow V_{abc} = n_1 M V_{ABC} \qquad M = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$V'_{ABC} = V_{ABC} + \frac{n_1}{n_2} M V_{ABC}$$

$$I_{ABC} = \left[I_A \;\; I_B \;\; I_C\right]^T \qquad I'_{ABC} = \left[I'_A \;\; I'_B \;\; I'_C\right]^T$$

$$I'_A = I_A - \frac{n_1}{n_2}\left(I'_C - I'_B\right)$$

$$I'_{ABC} = I_{ABC} + \frac{n_1}{n_2} M I'_{ABC}$$

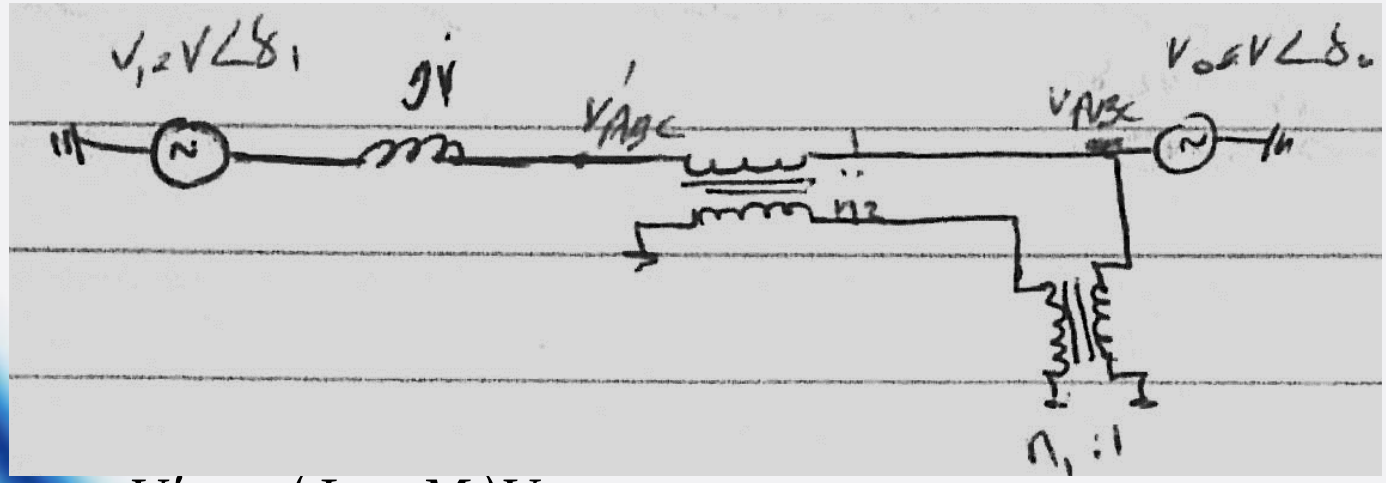
$$I'_B = I_B - \frac{n_1}{n_2}\left(I'_A - I'_C\right)$$

$$I'_C = I_C - \frac{n_1}{n_2}\left(I'_B - I'_A\right)$$

Phase Shifters

$$I_{ABC} = \left(I - \frac{n_1}{n_2} M \right) I'_{ABC}$$

$$V'_{ABC} = \left(I + \frac{n_1}{n_2} M \right) V_{ABC}$$



$$V'_{ABC} = \left(I + aM \right) V_{ABC}$$

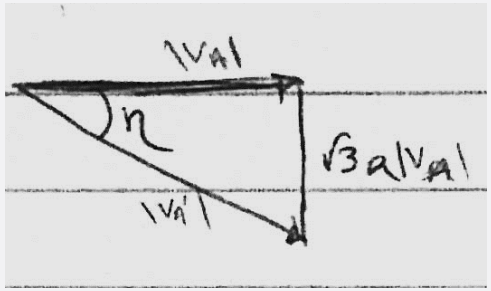
$$V'_{ABC} = \begin{bmatrix} 1 & a & -a \\ -a & 1 & a \\ a & -a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120} \\ e^{j120} \end{bmatrix} V e^{j\delta_0}$$

Phase Shifters

$$V_A' = Ve^{j\delta_0}\left(1 + ae^{-j120} - ae^{j120}\right) = Ve^{j\delta_0}\left(1 - \frac{a}{2} - j\frac{a\sqrt{3}}{2} + \frac{a}{2} - j\frac{a\sqrt{3}}{2}\right)$$

$$V_A' = Ve^{j\delta_0}\left(1 - ja\sqrt{3}\right) \Rightarrow \begin{cases} \left|V_A'\right| = \sqrt{1+3a^2}\left|V_A\right| \\ \angle V_A' = \angle\left[V_A - \tan^{-1}\left(a\sqrt{3}\right)\right] \end{cases}$$

$$V_A' = V\sqrt{1+3a^2}\,e^{j(\delta_0 - \eta)}$$

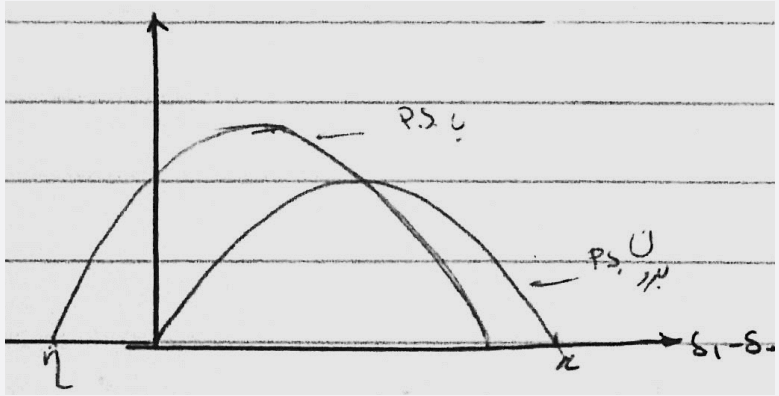


نتیجه:

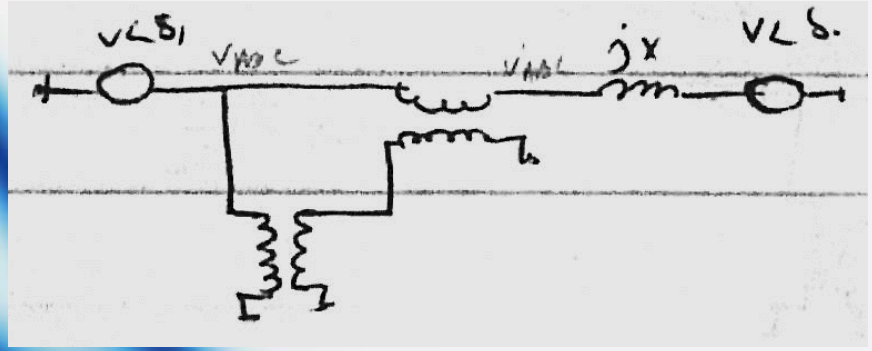
1. تغییر دامنه ولتاژ در دو طرف P.S.
2. ایجاد یک تغییر فاز بین ولتاژهای دو طرف P.S.

Phase Shifters

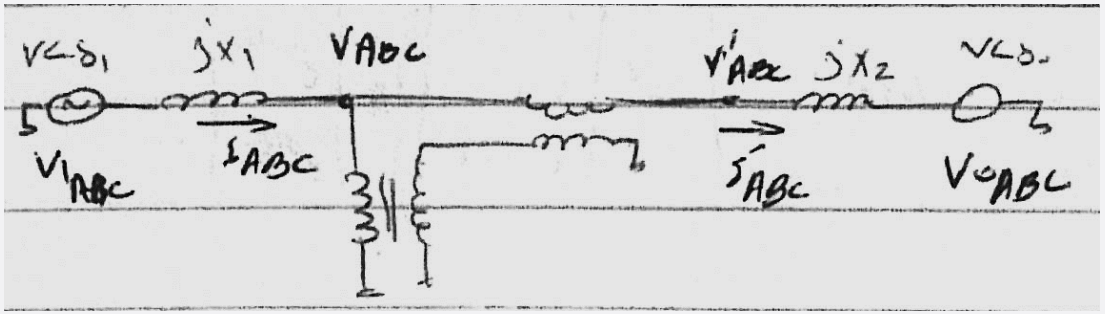
$$P = \frac{3V^2\sqrt{1+3a^2}}{X}\sin\left(\delta_1 - \delta_0 + \eta\right)$$



تمرین: برای حالتی که P.S. در فرستنده قرار گیرد روابط را بدست آورید.



P.S. وسط خط انتقال:



$$\frac{n_1}{n_2} \triangleq a$$

$$V_{1ABC} = Ve^{j\delta_1}\begin{bmatrix}1\\ e^{-j120}\\ e^{j120}\end{bmatrix} \qquad V_{ABC} = V_A\begin{bmatrix}1\\ e^{-j120}\\ e^{j120}\end{bmatrix} \qquad V'_{ABC} = V'_A\begin{bmatrix}1\\ e^{-j120}\\ e^{j120}\end{bmatrix}$$

$$I_{ABC} = I_A\begin{bmatrix}1\\ e^{-j120}\\ e^{j120}\end{bmatrix} \qquad I'_{ABC} = I'_A\begin{bmatrix}1\\ e^{-j120}\\ e^{j120}\end{bmatrix}$$

$$\boxed{1} \quad V_{ABC} = -jx_1 I_{ABC} + V_{1ABC}$$

$$\boxed{2} \quad V'_{ABC} = jx_2 I'_{ABC} + V_{0ABC}$$

$$k_1 = I + \frac{n_1}{n_2}M \qquad k_2 = I - \frac{n_1}{n_2}M$$

Phase Shifters

$$\boxed{1}\times k_1 \Rightarrow \left(I+\frac{n_1}{n_2}M\right)V_{ABC}=\left(I+\frac{n_1}{n_2}M\right)\left(-jx_1I_{ABC}\right)+\left(I+\frac{n_1}{n_2}M\right)V_{1ABC}$$

$$V'_{ABC}=k_1\left(-jx_1I_{ABC}\right)+k_1V_{1ABC}\Rightarrow k_1V_{1ABC}=V'_{ABC}+jx_1k_1I_{ABC} \qquad \boxed{3}$$

$$\boxed{2},\boxed{3}\rightarrow k_1V_{1ABC}-jx_1k_1I_{ABC}=jx_2I'_{ABC}+V_{0ABC}\Rightarrow$$

$$k_1V_{1ABC}=jx_1k_1k_2I'_{ABC}+jx_2I'_{ABC}+V_{0ABC}$$

$$k_1k_2=I-\left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2M^2 \qquad M^2=\begin{bmatrix}0&1&-1\\-1&0&1\\1&-1&0\end{bmatrix}^2=\begin{bmatrix}-2&1&1\\1&-2&1\\1&1&-2\end{bmatrix}=-3I+\begin{bmatrix}1&1&1\\1&1&1\\1&1&1\end{bmatrix}$$

$$k_1V_{1ABC}=j\left(x_1I-x_1a^2M^2+x_2I\right)I'_{ABC}+V_{0ABC}$$

Phase Shifters

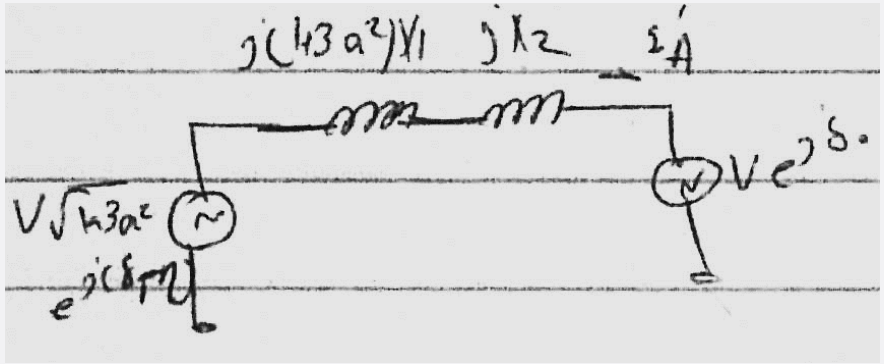
$$\begin{bmatrix} 1 & a & -a \\ -a & 1 & a \\ a & -a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120} \\ e^{j120} \end{bmatrix} V e^{j\delta_0} = jx_1 \left(\begin{bmatrix} 1+3a^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1+3a^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1+3a^2 \end{bmatrix} - a^2 \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right) I'_A \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120} \\ e^{j120} \end{bmatrix}$$

$$+ jx_2 I'_A \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120} \\ e^{j120} \end{bmatrix} + V_0 e^{j\delta_0} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j120} \\ e^{j120} \end{bmatrix}$$

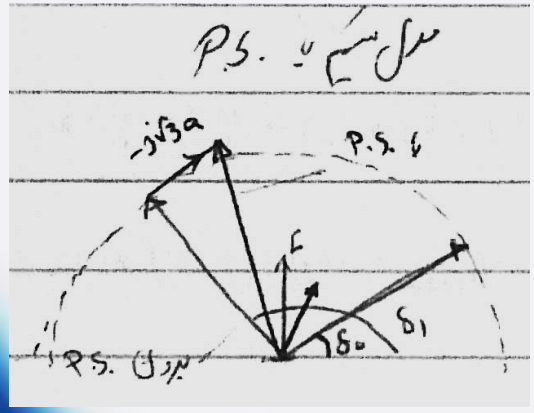
سطر اول

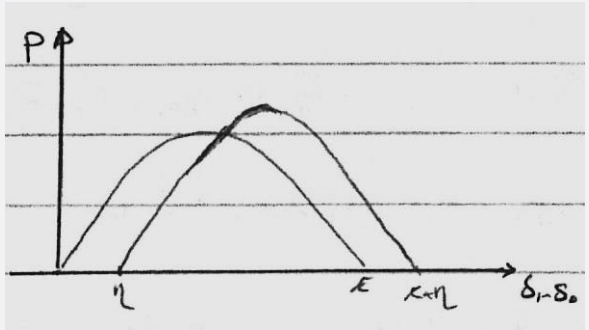
$$\left(1 - j\sqrt{3}a\right) V e^{j\delta_1} = j\left[x_1\left(1+3a^2\right) + x_2\right] I'_A + V e^{j\delta_1}$$

Phase Shifters

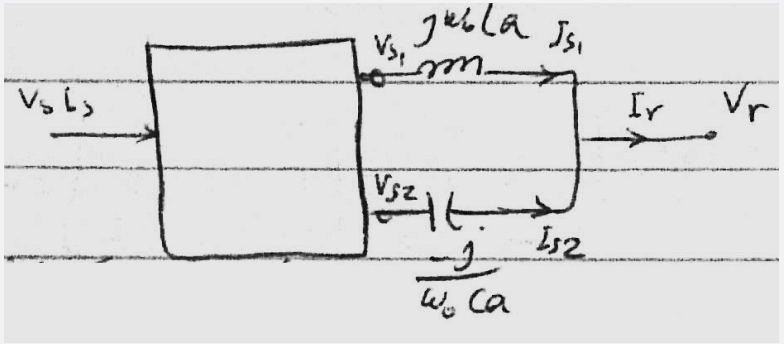


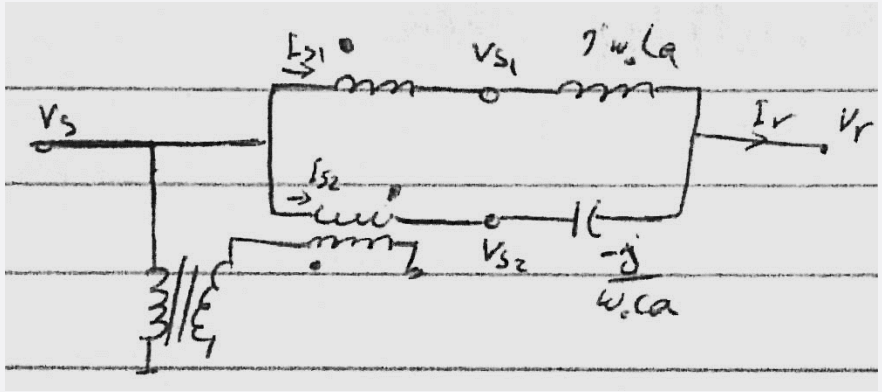
$$P = \frac{3V^2\sqrt{1+3a^2}}{\left(1+3a^2\right)x_1 + x_2}\sin\left(\delta_1 - \eta - \delta_0\right)$$





IPC (Interphase Power Controller)





ساختار یک IPC با ترانسفورماتورهای شیفت دهنده فاز

$$V_{s1} = V_s(1 + ja\sqrt{3})$$

$$V_{s2} = V_s(1 - ja\sqrt{3})$$

KVL: $V_{s1} = j\omega_0 La\, I_{s1} + V_r$

$$V_{s2} = \frac{-j}{\omega_0 Ca} I_{s2} + V_r$$

$$I_r = I_{s1} + I_{s2} = \frac{V_{s1} - V_r}{j\omega_0 La} + \frac{V_{s2} - V_r}{\frac{-j}{\omega_0 Ca}} = \frac{V_s(1 + ja\sqrt{3}) - V_r}{j\omega_0 La} + \frac{V_s(1 - ja\sqrt{3}) - V_r}{\frac{-j}{\omega_0 Ca}}$$

IPC (Interphase Power Controller)

اگر $\omega_0 L_a = \frac{1}{\omega_0 C_a}$ یا بعبارت دیگر مدار در حالت تشدید قرار گیرد

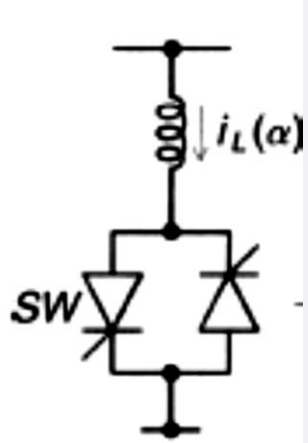
$$I_r = \frac{V_s(1+j\sqrt{3}a) - V_r - V_s(1-j\sqrt{3}a) + V_r}{j\omega_0 L_a} = \frac{2j\sqrt{3}aV_s}{j\omega_0 L_a} = \frac{2\sqrt{3}a}{\omega_0 L_a} V_s$$

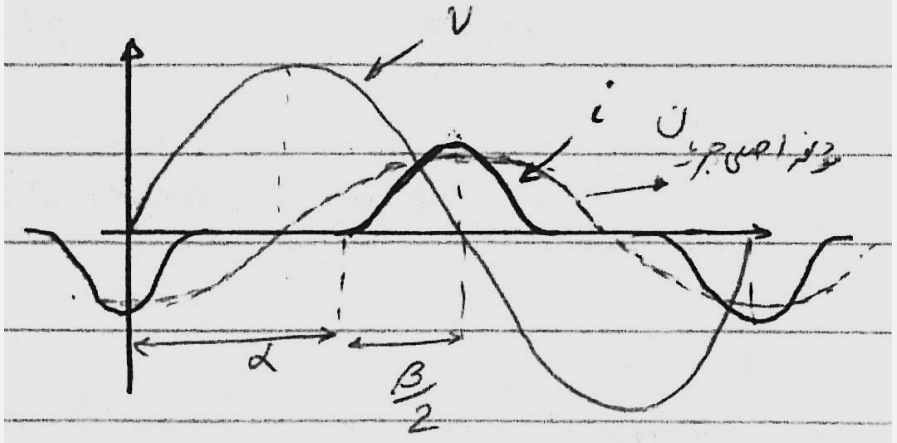
دو نتیجه گیری مهم:

1. I_r با V_s هم فاز است (بنابراین توان راکتیو منبع V_s صفر است)
2. جریان I_r بستگی به ولتاژ V_r ندارد.

بنابراین می‌توان IPC را با یک منبع جریان که دامنه و فاز آن ثابت است مدلسازی کرد.

TCR(Thyristor Controlled Reactor)



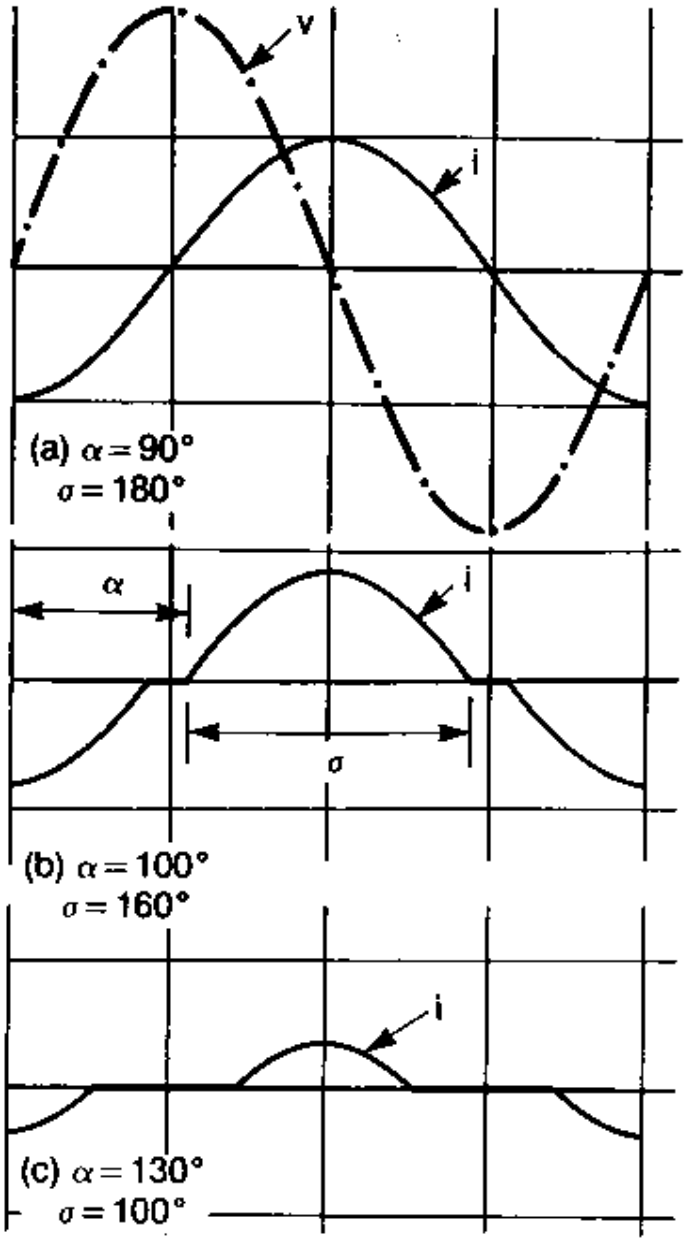


α : زاویه تأخیر (زاویه آتش)

β : زاویه هدایت

$$\alpha + \frac{\beta}{2} = 180$$

هرکدام از تریستورها در یک نیم سیکل ولتاژ آماده هدایت هستند اگر تریستورها دقیقاً در پیک ولتاژ روشن شوند جریان عبوری از سلف همان جریانی است که در غیاب تریستورها از سلف عبور می کند. جریان اصولاً راکتیو است و تقریباً به اندازه‌ی ۹۰ درجه نسبت به ولتاژ پس فاز است. این جریان دارای یک ترم کوچک هم فاز با ولتاژ بخاطر توان تلفاتی راکتور می‌باشد که معمولاً بین ۰/۵ تا ۲ درصد توان راکتیو است.


v
i
(a) α = 90°
σ = 180°
α
i
σ
(b) α = 100°
σ = 160°
i
(c) α = 130°
σ = 100°

TCR(Thyristor Controlled Reactor)

با افزایش زاویه α از ۹۰ درجه، مؤلفه‌ی اصلی جریان تضعیف می‌شود و این معادل افزایش راکتانس اندکتور است که منجر به کاهش جریان و در نتیجه کاهش توان راکتیو آن می‌شود. تا آنجا که مؤلفه‌ی اصلی مد نظر باشد، یک سوسپتانس متغیر بدست می‌دهد و در نتیجه می‌توان بعنوان یک جبران‌کننده مورد استفاده قرار گیرد.

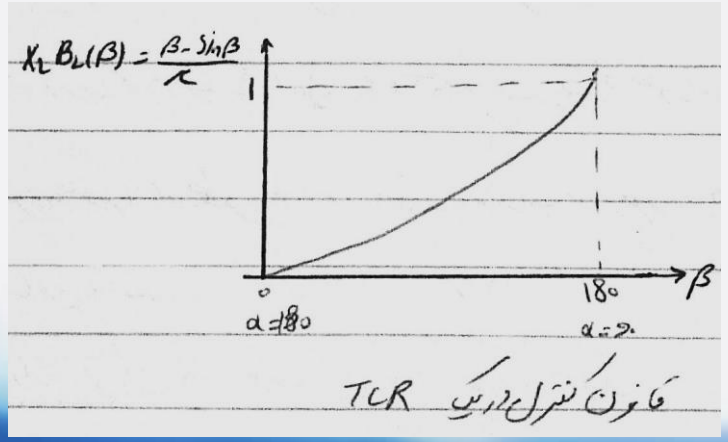
$$i(t)=\begin{cases}\dfrac{\sqrt{2}V}{x_l}\left(\cos\alpha-\cos\omega t\right) & \alpha<\omega t<\alpha+\beta\\ 0 & \alpha+\beta<\omega t<\alpha+\pi\end{cases}$$

مؤلفه‌ی اصلی این جریان از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود.

$$I_1=\frac{\beta-\sin\beta}{\pi x_l}V=B_l(\beta)V$$

$B_L(\beta)$سوپستانس کنترل شده با β می‌باشد.

$$B_l(\beta)=\frac{\beta-\sin\beta}{\pi x_l}$$

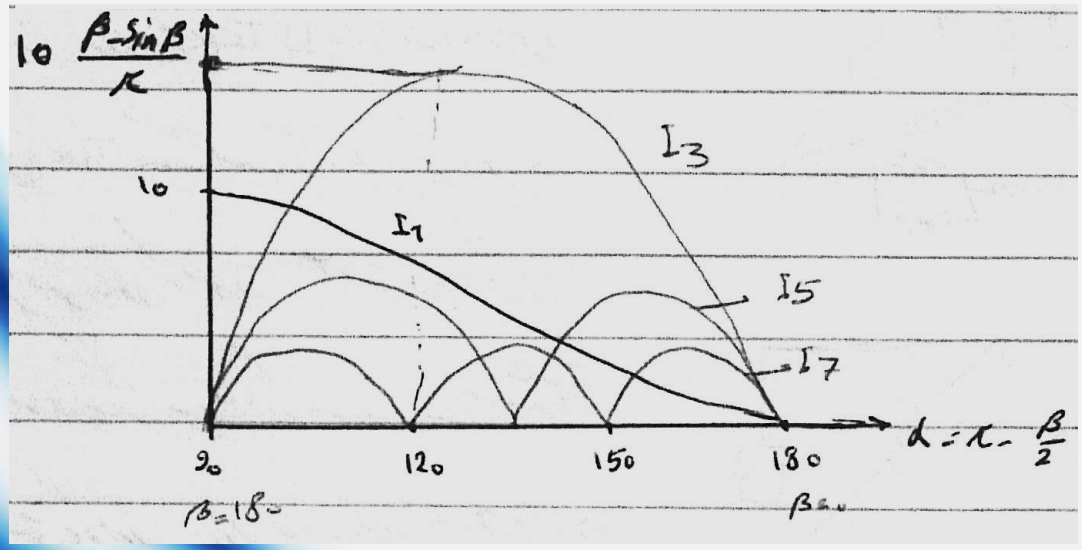


TCR(Thyristor Controlled Reactor)

هارمونیک‌ها

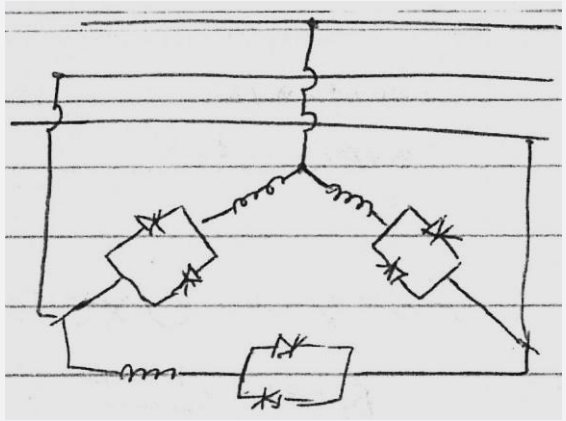
$$I_n = \frac{4}{\pi}\cdot\frac{V}{x_l}\left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha\frac{\sin\alpha}{n}\right]$$

اگر $f(x) = f(\pi - x)$ باشد (تقارن نیم موج) هارمونیک‌های زوج نخواهیم داشت بنابراین جریان هارمونیک‌های زوج ندارد.



اگر فازها متعادل باشند هارمونیک سوم مشکلی ایجاد نمی‌کند.

TCR(Thyristor Controlled Reactor)



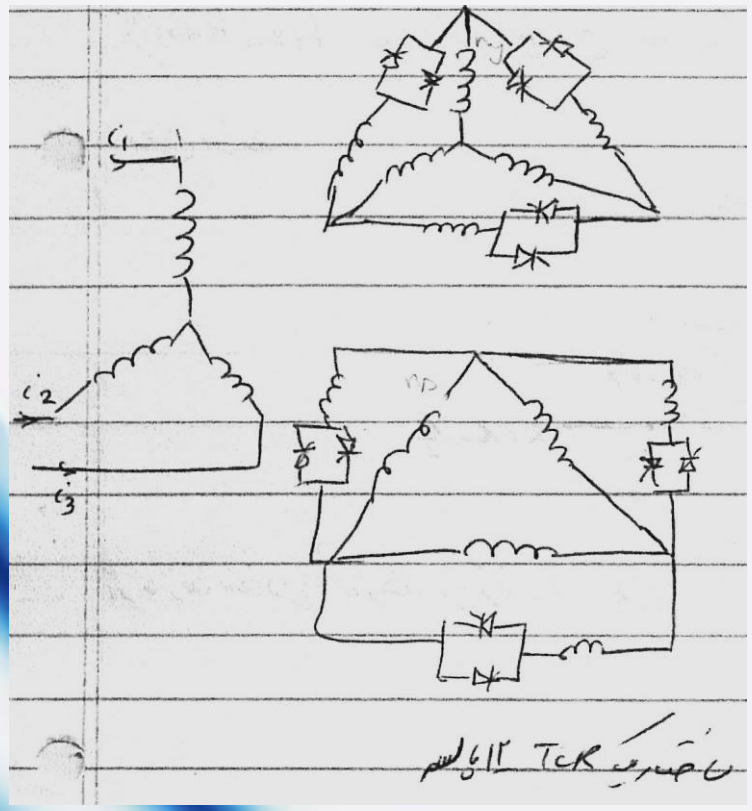
در یک سیستم سه فاز در حالت تعادل سه TCR تکفاز بکار می‌رود که عموماً بصورت مثلث بسته می‌شوند. هارمونیک‌های مرتبه ۳ داخل TCR های بسته شده بصورت Δ می‌چرخند و وارد سیستم قدرت نمی‌شوند.

برای جلوگیری از ظهور مقادیر DC و هارمونیک‌های زوج زاویه هدایت دو تریستور با قطب‌های مخالف بایستی مساوی باشند.

زاویه آتش تریستورها در هر فاز بایستی ۱۲۰ درجه با فاز دیگر اختلاف داشته باشند.

دامنه هارمونی‌ها را می‌توان به روش‌های گوناگون کنترل کرد.

TCR(Thyristor Controlled Reactor)



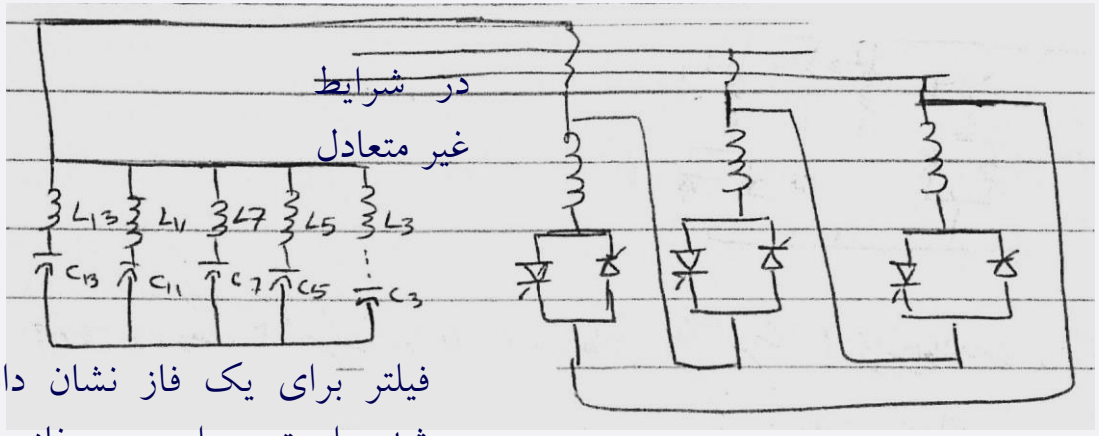
دامنه هارمونی‌ها را می‌توان به روش‌های گوناگون کنترل کرد.

سیستم‌های ۱۲ پالسه:

در این روش از TCR ۱۲ پالسه استفاده می‌شود. این TCR مثلث بسته شده یکی به یک ثانویه ترانسفورماتور که بصورت Y بسته شده و دیگری به ثانویه دیگر ترانسفورماتور که بصورت Δبسته شده است متصل می‌گردند. در اولیه هارمونی‌های ۵، ۷، ۱۷ و ۱۹ و در حالت کلی $6(2k-1)-1$ و $6(2k-1)+1$ حذف می‌شوند.

TCR(Thyristor Controlled Reactor)

استفاده از خازن پسیو

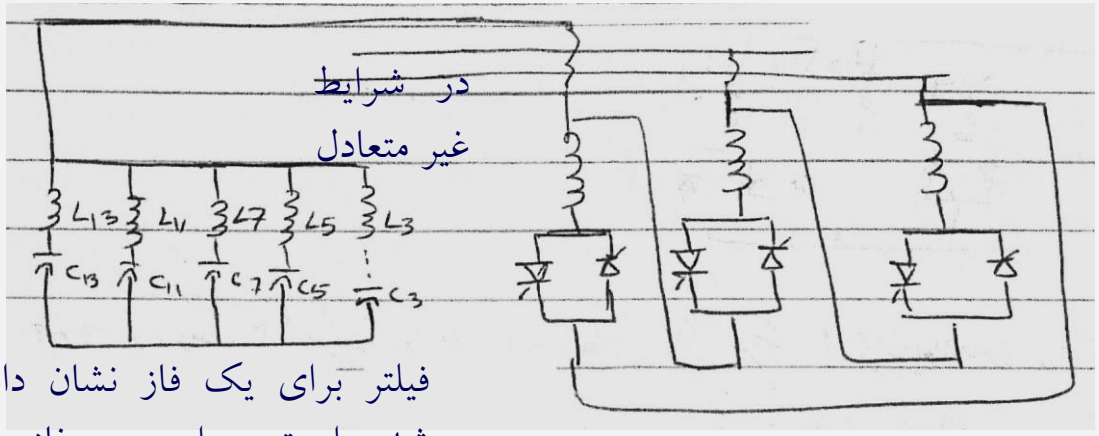


فیلتر برای یک فاز نشان داده شده است. برای سه فاز به صورت Y بسته می‌شوند.

$$\frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} = \omega_k$$

TCR(Thyristor Controlled Reactor)

استفاده از خازن پسیو

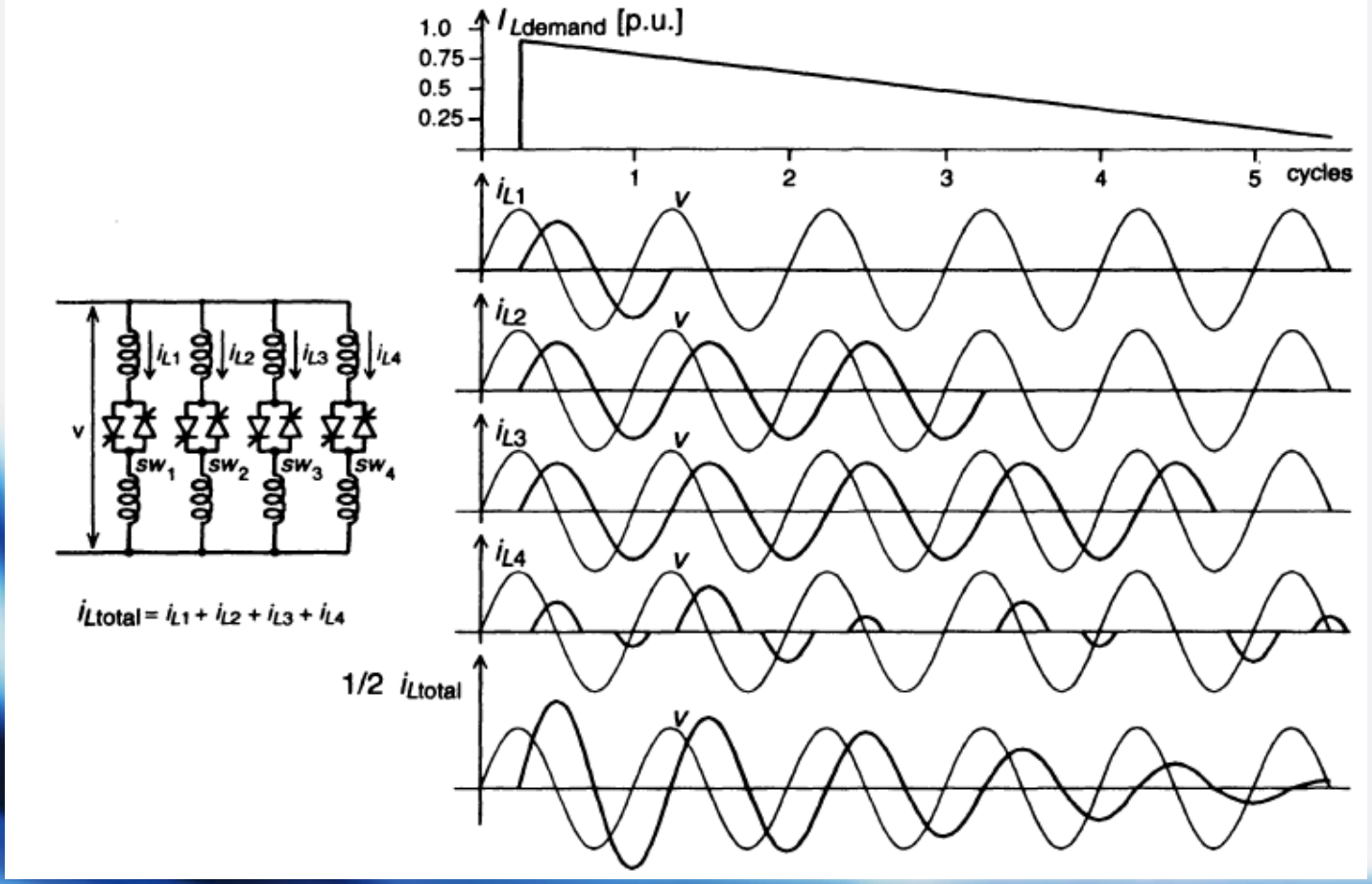


فیلتر برای یک فاز نشان داده شده است. برای سه فاز به صورت Y بسته می‌شوند.

$$\frac{1}{\sqrt{L_k C_k}} = \omega_k$$

TCR(Thyristor Controlled Reactor)

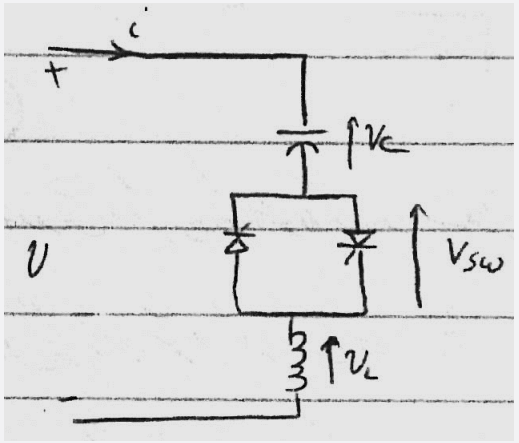
در روش دیگری که معمولاً در قدرت‌های بالا استفاده می‌شود از n، TCR که بصورت موازی متصل شده‌اند ($n \geq 2$) کمک گرفته می‌شود. در استفاده از n ، TCR می‌توان طوری عمل کرد که دامنه هارمونی‌ها نیز تضعیف شود. در این روش زاویه هدایت یکی از TCR ها بین صفر و ۱۸۰ درجه تغییر می‌کند و سایر TCR ها یا در هدایت کامل و یا در قطع کامل هستند.



TCR(Thyristor Controlled Reactor)

اگر یک TCR با ریتینگ ۴ برابر بکار رود دامنه هارمونی‌های منتجه تقریباً ۴ برابر خواهد بود. می‌توان گفت که با استفاده از این سیستم دامنه هارمونی‌ها به $\frac{1}{n}$ تقلیل می‌یابد که n تعداد TCR های بکار رفته است.

TSC(Thyristor Switched Capacitor)



وجود سلف کوچک بدلیل

- محدود کردن جریان در زمان سوئیچینگ مخصوصاً در مواردی که اشتباهی در عمل سوئیچینگ رخ دهد.
- جلوگیری از ایجاد رزونانس با امپدانس سیستم در فرکانس‌های خاص

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

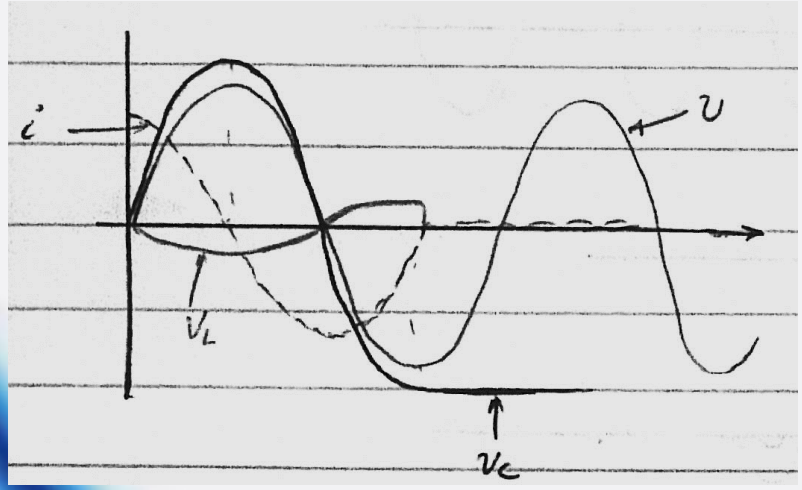
$$i(\mathrm{t}) = \mathrm{v}\frac{n^2}{n^2-1}\omega C \cos \omega t$$

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{x_c}{x_l}}$$

$$V_c = \frac{n^2}{n^2-1}V$$

TSC(Thyristor Switched Capacitor)

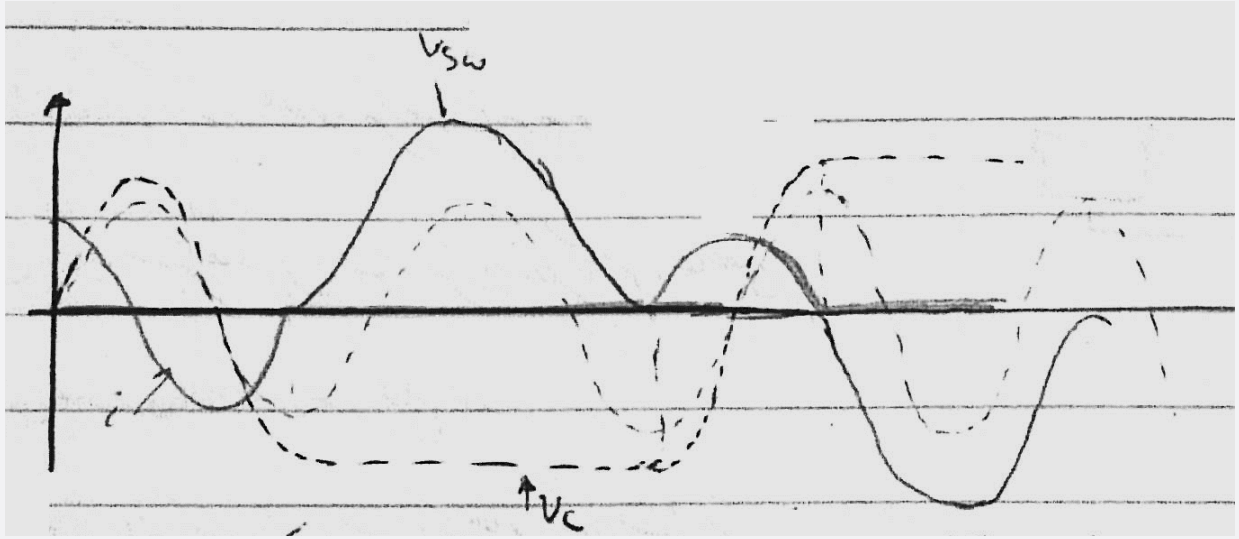
TSC می‌تواند در زمان صفر شدن جریان با حذف سیگنال‌های گیت تریستورها قطع گردد. در موقع عبور از صفر جریان ولتاژ خازن در ماکزیمم یا مینیمم مقدار خود است.



اگر فرض کنیم که خازن دشارژ نشود ولتاژ خازن در همان حد ماکزیمم و یا مینیمم باقی می‌ماند و ولتاژها دو سر سوئیچ بین صفر و دو برابر ماکزیمم ولتاژ ورودی تغییر می کند.

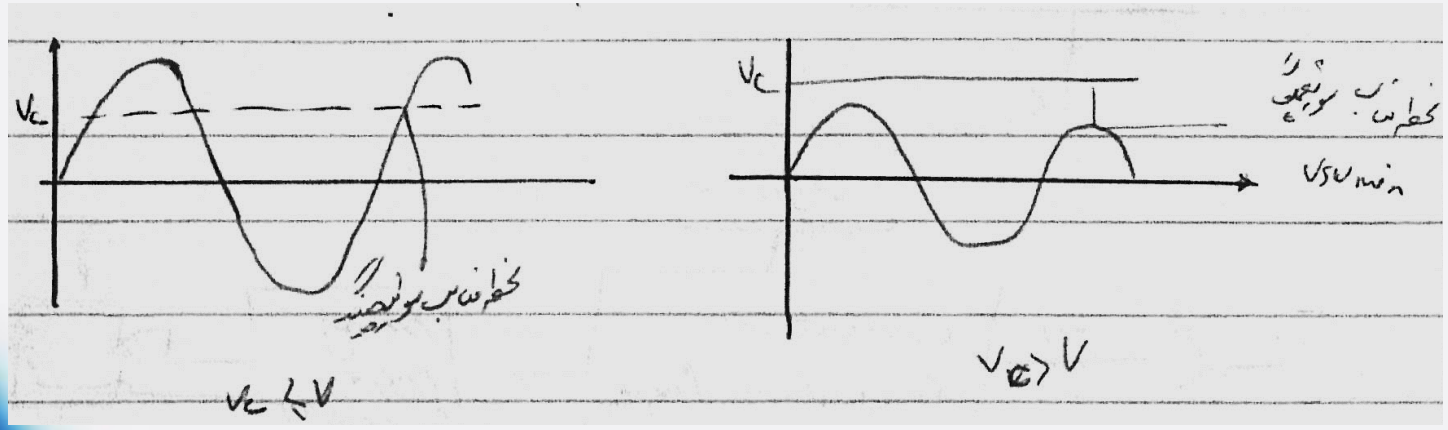
TSC(Thyristor Switched Capacitor)

اگر ولتاژ دو سر خازن تغییر نکند TSC مجدداً می‌تواند در پیک ولتاژ ورودی سوئیچ شود (پیک منفی برای داشتن کمترین حالت گذرا زیرا ولتاژ خازن با ولتاژ منبع تقریباً برابر است)



TSC(Thyristor Switched Capacitor)

در عمل بعد از قطع سوئیچ‌ها خازن شروع به تخلیه شدن می‌کند. بنابراین وصل مجدد خازن ممکن است در ولتاژ خازن بین صفر و $V\frac{n^2}{n^2-1}$ اتفاق بیفتد. این عمل وصل می‌تواند با کمترین حالت گذرا اتفاق افتد. اگر ولتاژ خازن با ولتاژ شبکه در لحظه وصل مجدد برابر باشند این معادل صفربودن ولتاژ دو سر سوئیچ‌ها در این لحظه است.

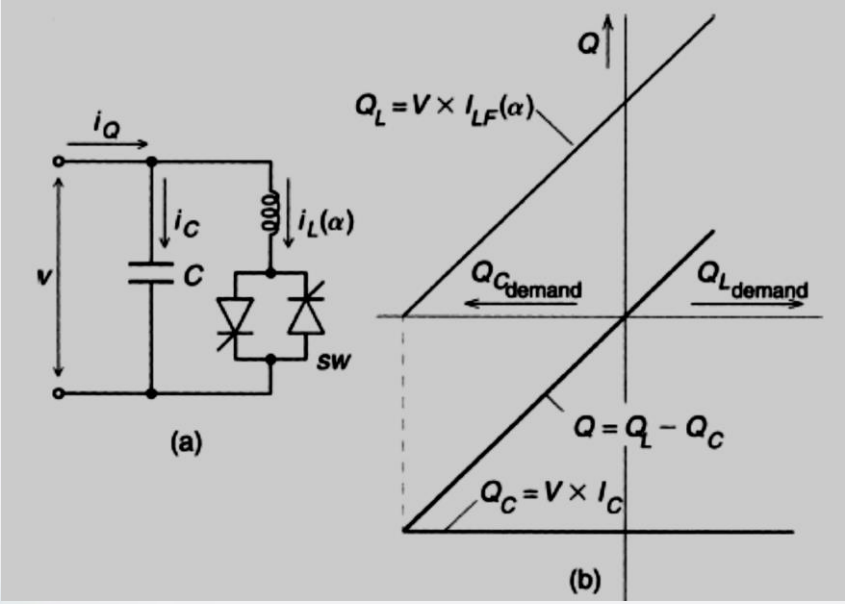


بنابراین می‌توان گفت حداکثر تأخیر در سوئیچینگ خازن‌ها یک سیکل است. به عبارت دیگر حداکثر زمانی که ممکن است لازم باشد تا شرایط حداقل شدن ولتاژ دو سر سوییچ‌ها تأمین گردد یک سیکل است.

FCTCR(Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor)

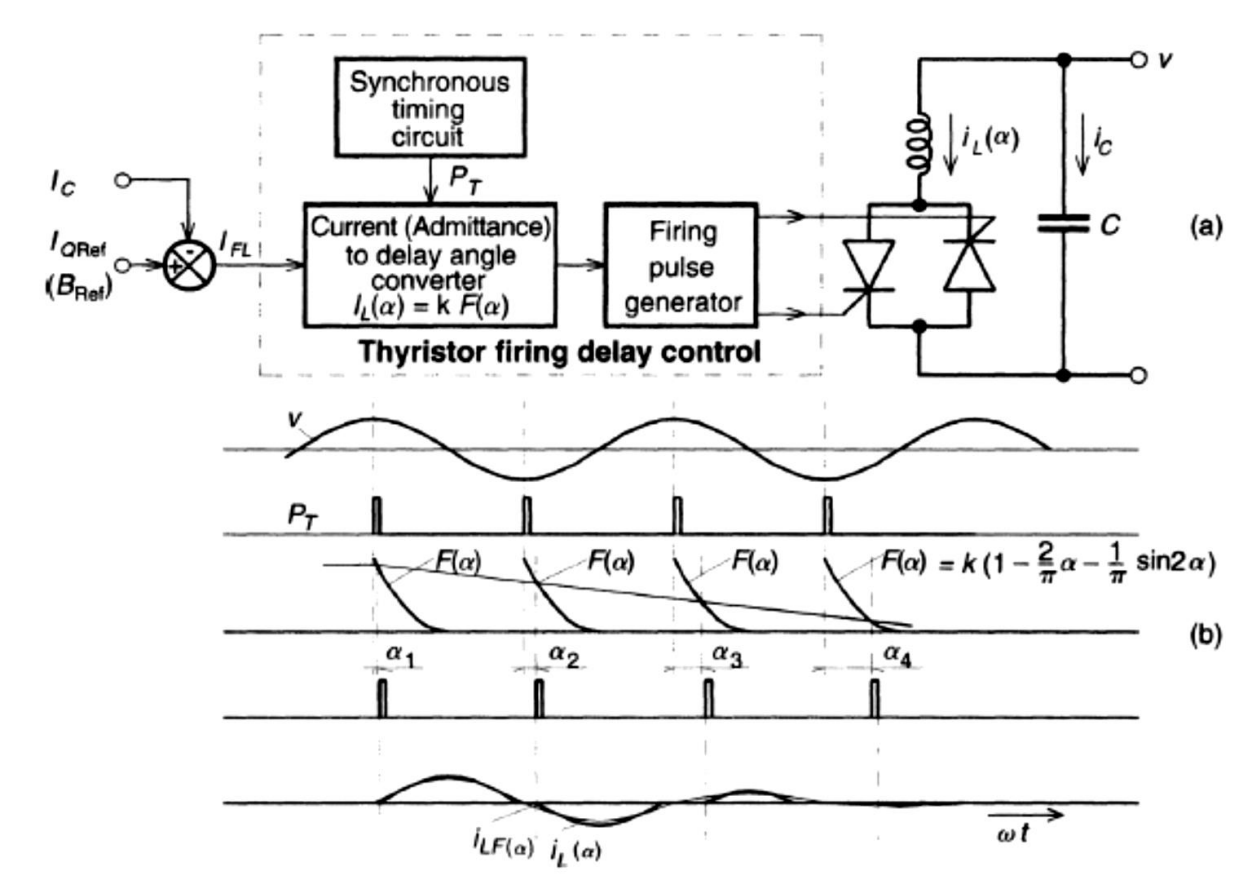
از خازن استفاده مضاعف می‌شود به این صورت که توان راکتیو لازم را تولید می‌کند و علاوه بر این اگر تمام یا بخشی از آن با یک فیلتر جایگزین شود می‌تواند در فرکانس خاصی در مقابل هارمونی‌ها مانند فیلتر عمل کند.

FCTCR: دارای یک راکتور متغیر و یک خازن ثابت است.



FCTCR(Fixed Capacitor Thyristor Controlled Reactor)

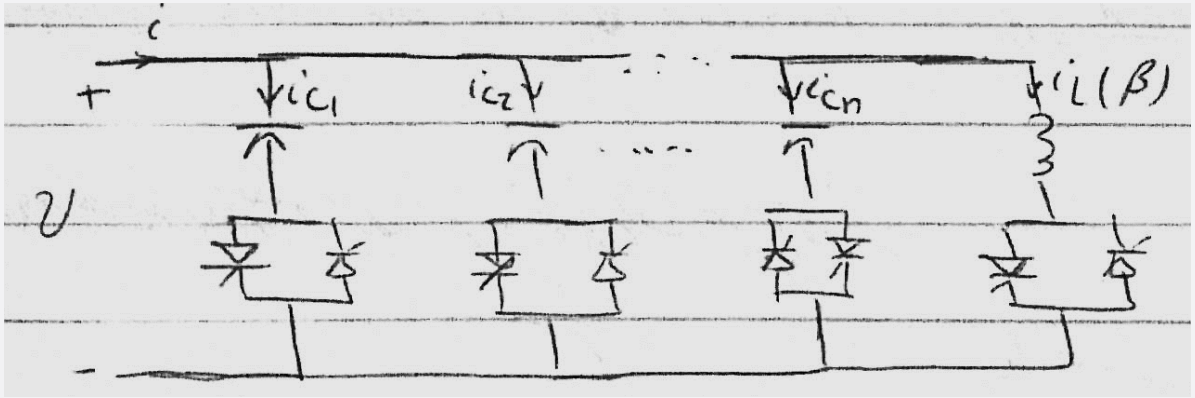
بلوک دیاگرام سیستم کنترل FCTCR



TSC-TCR

تلفات در مدار FCTCR:

- تلفات خازنی کوچک اما ثابت است.
- تلفات اهمی راکتور متناسب با مجذور جریان
- تلفات سوئیچ‌ها متناسب با جریان



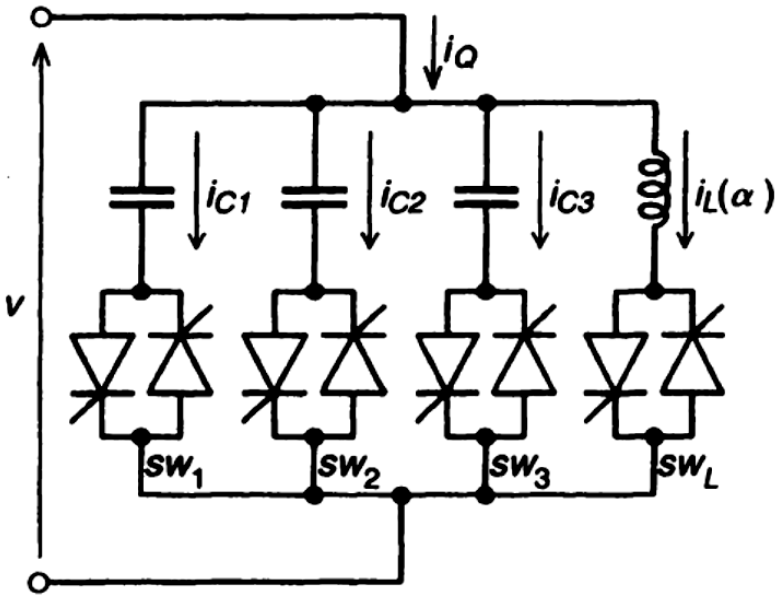
TSC-TCR

ماکزیمم تعداد شاخه‌ها بستگی به سطح ولتاژ نقطه کار VAR درخواستی، جریان نامی تایرستورها و هزینه‌ها دارد.

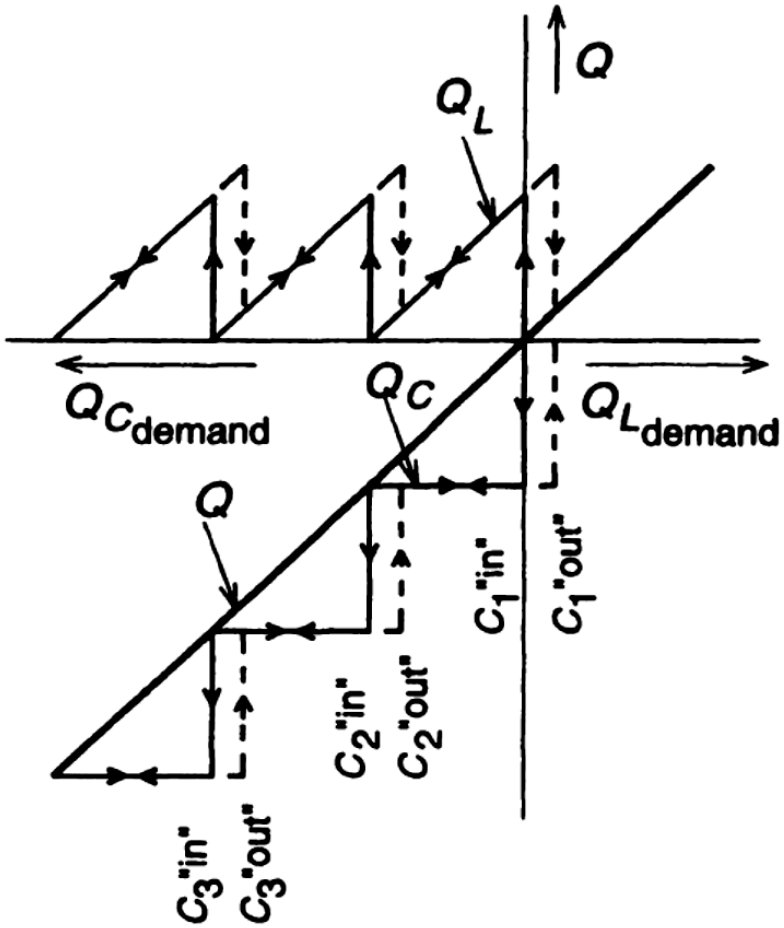
مجموع توان راکتیو خازن خازنی به n فاصله تقسیم می‌شود. در اولین فاصله Var خروجی بین صفر تا $\frac{Var_{max}}{n}$ کنترل می‌شود که Var_{max} مجموع توان راکنیو شاخه‌های خازنی است در این فاصله فقط یک خازن سوئیچ می‌شود و جریان راکتور با کنترل β طوری تنظیم می‌شود که Var مطلوب را بدست دهد.

در فواصل دوم، سوم و ... و nام به ترتیب توان راکتیو خروجی بین $\frac{Var_{max}}{n}$ ، $\frac{2Var_{max}}{n}$ و ... $\frac{(n-1)Var_{max}}{n}$ و Var_{max} با سوئیچ کردن خازن‌های دوم، سوم و ... و nام کنترل می‌شود.

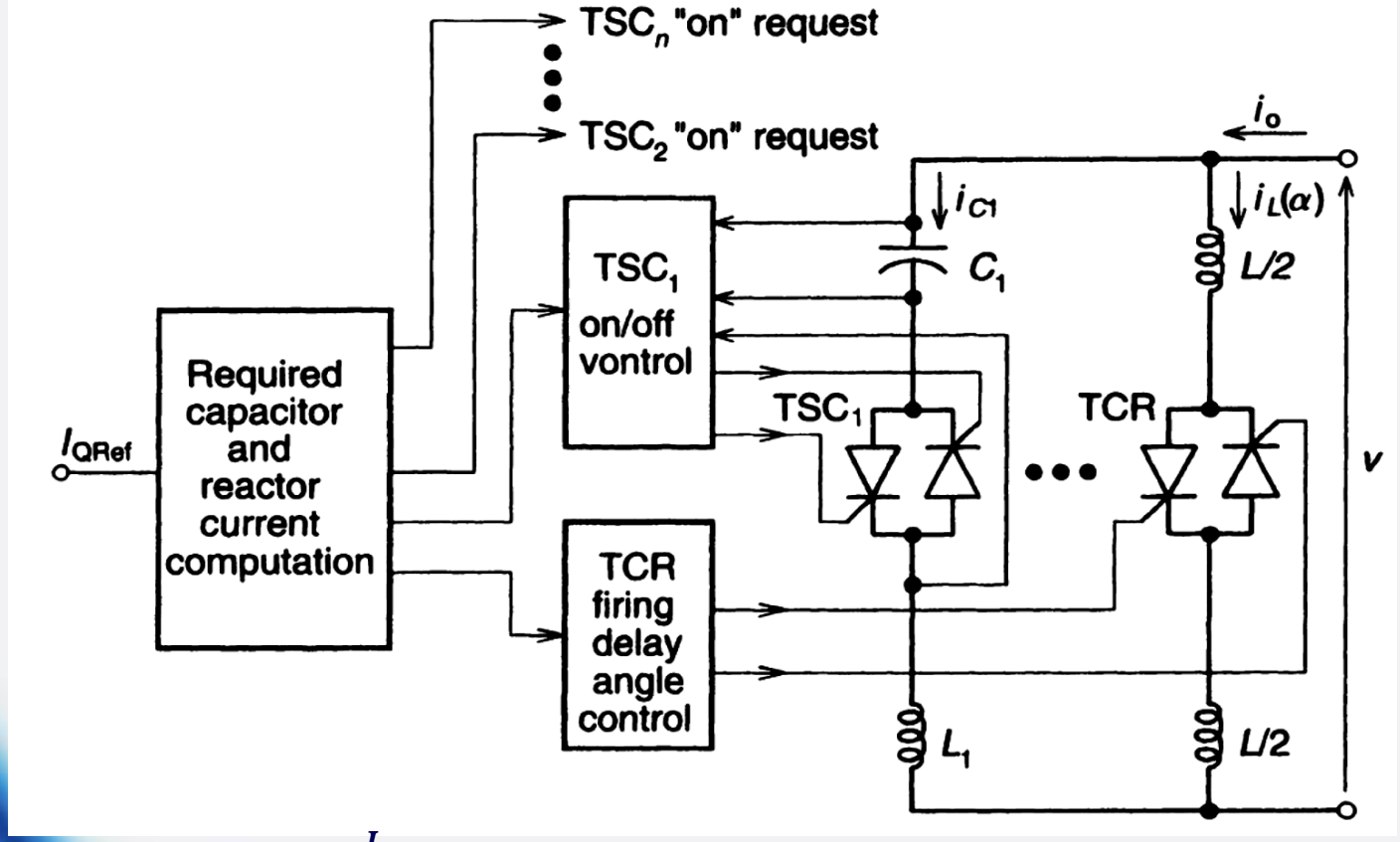
TSC-TCR



$$Q = V \times [I_{LF}(\alpha) - \Sigma I_{Cn}]$$



TSC-TCR



تعداد خازنهای روشن $=\frac{I_{demand}}{I_C}=n$ rounded up to the next integer

$$I_{Lref} = I_{demand} - nI_C$$

SVC(Static Var Compensator)

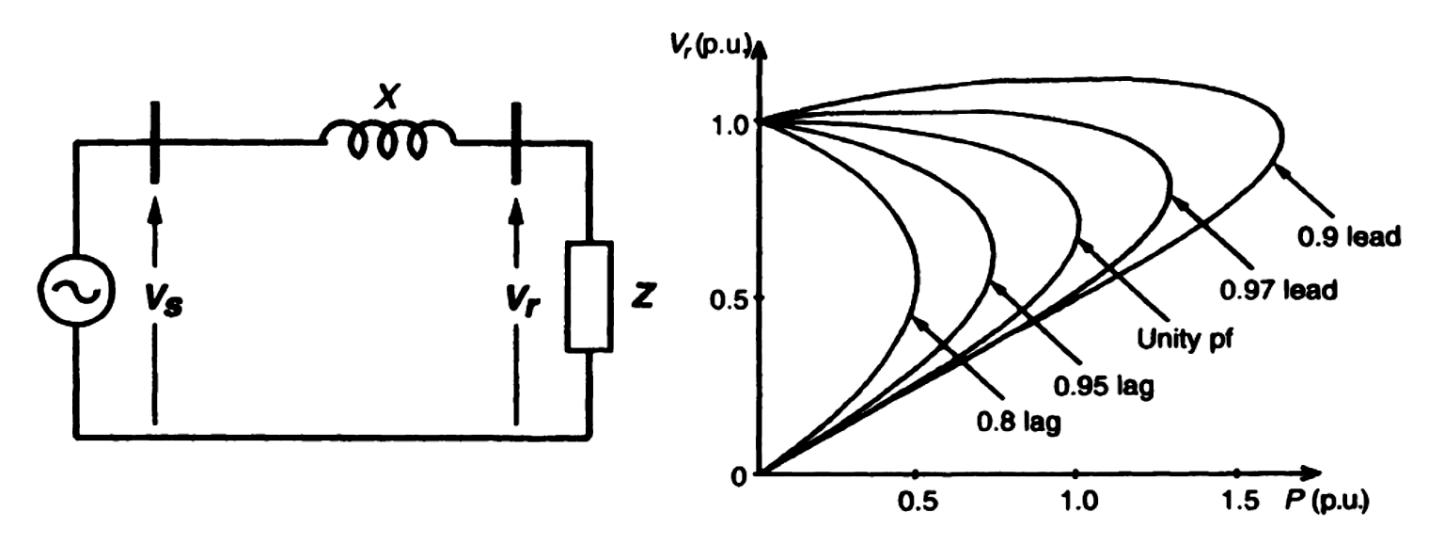
SVC یک ژنراتور استاتیکی وار است که خروجی آن در جهت تثبیت و یا کنترل پارامترهای مشخصی از سیستم قدرت بکار می‌رود. هدف اولیه استفاده از SVC افزایش توانایی انتقال خطوط نیرو بوده است. از آنجا که SVC توان راکتیو تولید و یا جذب میکند انتقال قدرت در سیستم بطور غیر مستقیم توسط کنترل ولتاژ SVC انجام می‌شود. بدان معنا که توان راکتیو تولیدی یا جذب شده توسط SVC طوری کنترل می‌شود تا ولتاژ ترمینال‌های خاصی را کنترل کند.

هدف‌های اصلی کنترل ولتاژ :

- کنترل ولتاژ جهت جلوگیری از ناپایداری ولتاژ
- بهبود پایداری گذرا و دینامیکی
- افزایش توان انتقالی
- جبران بار

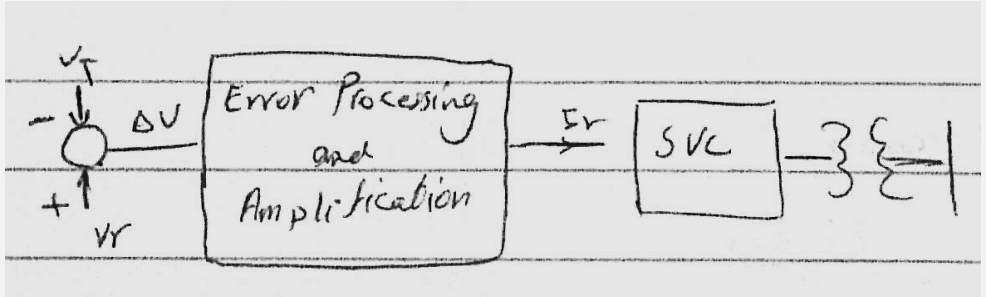
SVC(Static Var Compensator)

مدل سیستم قدرتی که به یک بار متصل شده است
با افزایش P ولتاژ کاهش می‌یابد تا به نوک دماغ منحنی مربوط برسد بعد از این نقطه اگر توان بخواهد افزایش یابد مسأله‌ی ناپایداری ولتاژ اتفاق می‌افتد و ولتاژ بطور ناگهانی کاهش می‌یابد (Voltage Collapse) با افزایش ضریب قدرت بار از حالت پس فاز به حالت پیش فاز نوک دماغ این منحنی‌ها بزرگتر می‌شود و پایداری ولتاژ بیشتر است.
عیب: اضافه ولتاژ

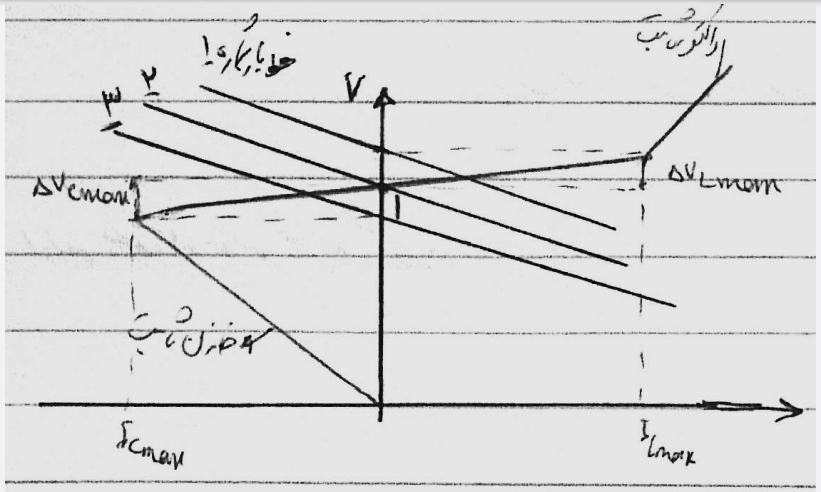


SVC(Static Var Compensator)

تغییرات زیاد ولتاژ اصولاً در سیستم‌های قدرت مجاز نیست. کاهش ولتاژ باعث افت عملکرد بار می‌شود (مخصوصاً موتورهای القایی) و افزایش ولتاژ باعث اشباع موتورها و ترانسفورماتورها و در نتیجه ایجاد هارمونیک‌ها و احتمالاً مسائل عایق‌بندی می‌شود. برای یک سیستم قدرت ضعیف، تغییرات بار می‌تواند منجر به فروپاشی ولتاژ می‌شود.
بنابراین به کمک یک SVC می‌توان ولتاژ طرف گیرنده را تثبیت کرد.



SVC(Static Var Compensator)



هنگامیکه یک خازن حداکثر می‌شود(Q_{Cmax}،I_{Cmax}) اگر Q درخواستی کمی زیاد شود ولتاژ ترمینال افت پیدا می‌کند در نتیجه Q_C افت پیدا می‌کند و به همین ترتیب ولتاژ افت شدیدی پیدا می‌کند (قسمت شیب منفی منحنی)

SVC(Static Var Compensator)

SVC در عمل یک تنظیم کننده ایده‌آل نیست بلکه ولتاژ ترمینال آن با تغییر جریان جبران و بطور خطی با آن تغییر می‌کند. دلایل زیادی برای این وجود دارد.

- رنج خطی جبران کننده با ماکزیمم rating سلفی و خازنی مساوی می‌تواند با اضافه کردن یک regulation droop (شیب منحنی) افزایش یابد.
- تنظیم عالی ولتاژ به معنای شیب صفر و در نتیجه بروز مشکلاتی در تعریف نقطه کار سیستم است. همچنین امکان بروز نوساناتی در حالتی که امپدانس سیستم یک قسمت صاف را در رنج فرکانس سیستم بپوشاند (امپدانس کم).
- regulation droop امکان ایجاد load sharing را بین SVC و سایر دستگاه‌ها ایجاد می‌کند.

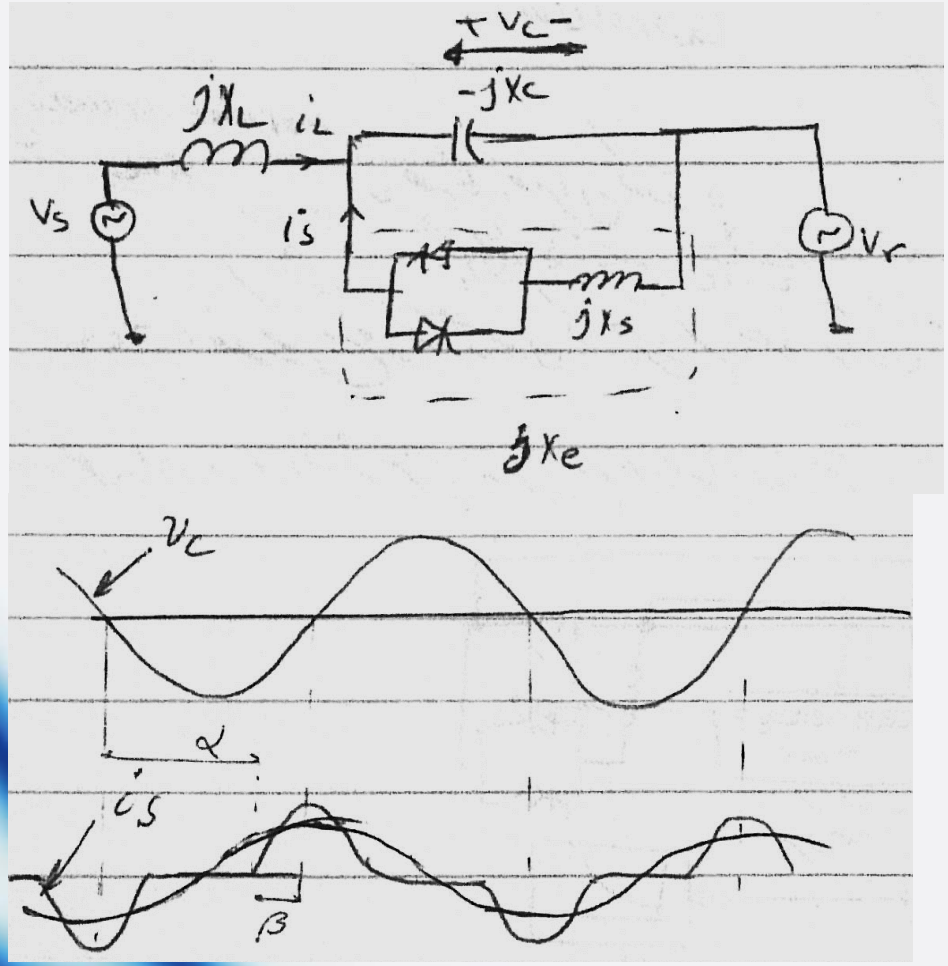
$$V_r^* = V_r + KI_{comp}$$

$$k = \frac{\Delta V_{c\max}}{I_{c\max}} = \frac{\Delta V_{l\max}}{I_{l\max}}$$

ΔV_{cmax}: افزایش ولتاژ از مقدار نامی در ماکزیمم جریان خازنی

ΔV_{Lmax} سلفی

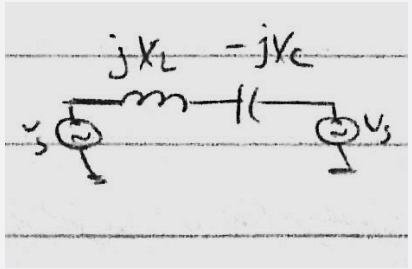
Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)



$$jX_T = j\left[X_l - \frac{X_e . X_c}{X_e - X_c}\right]$$

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

Mode 1:



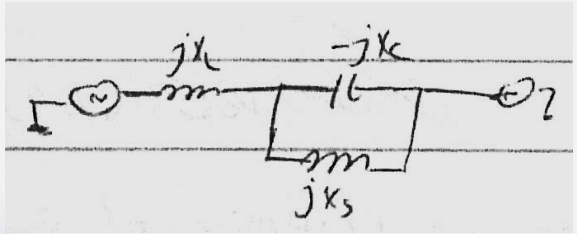
هیچ کدام از تریستورها هدایت نمی کنند

$$\alpha = 180 \quad \text{یا} \quad \beta = 0 \rightarrow X_e = \infty \ , \quad X_{TCSC} = X_c$$

Mode 2:

Thyristor Fully Conducting

$$\alpha = 90, \quad \beta = 90 \Rightarrow X_e = X_s \Rightarrow X_{TCSC} = \frac{X_C}{1 - \frac{X_C}{X_S}}$$

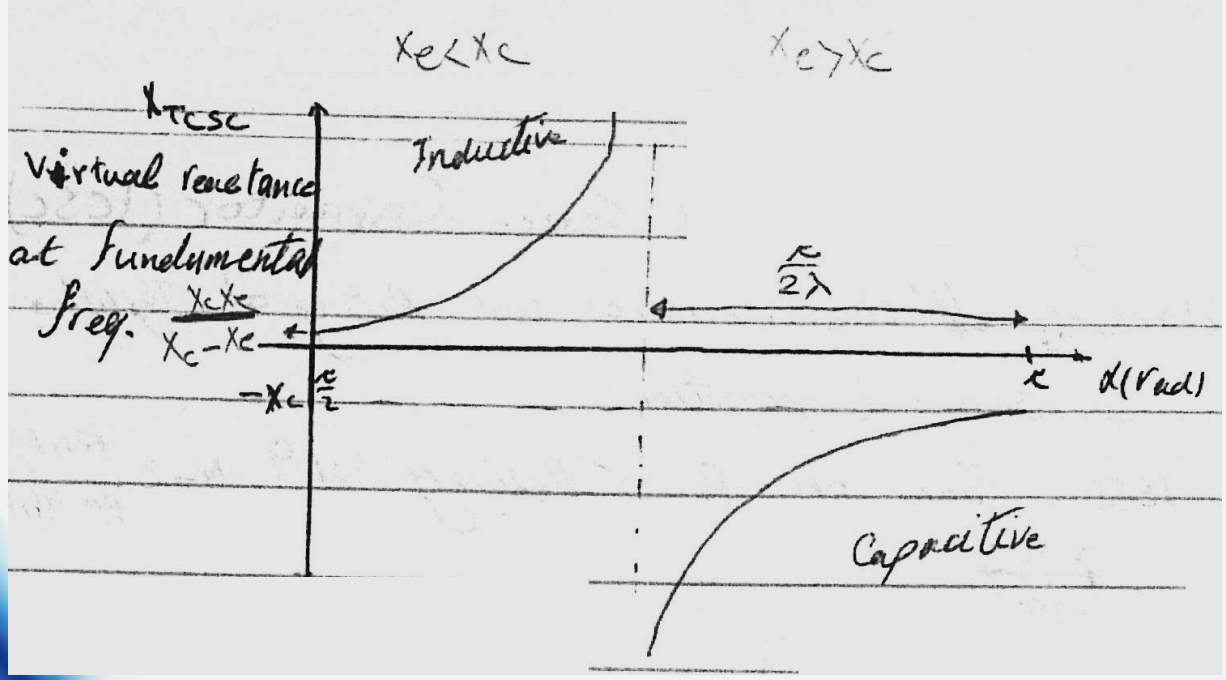


$$jX_T = j\left(X_L - \frac{X_C . X_S}{X_S - X_C}\right)$$

Mode 3: Verinier Mode

$$jX_T = j\left(X_L - \frac{X_c . X_e}{X_e - X_c}\right) \qquad 90 < \alpha < 180, \quad 0 < \beta < 90 \qquad X_{TCSC} = \frac{X_C}{1 - \frac{X_C}{X_e}}$$

Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)



λ معرف نسبت تشدید مدار LC، TCSC به فرکانس نامی سیستم است.

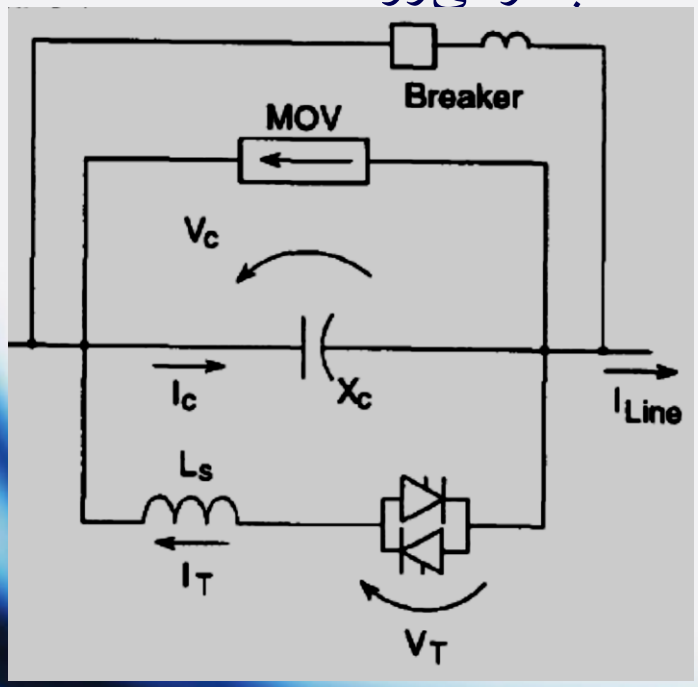
TCSC مانند یک منبع ولتاژ سری که جریان خط بر آن است عمود عمل می کند.

مطالعات نشان داده است که امپدانس بدست آمده از TCSC در رنج فرکانس‌های زیر سنکرون بطور قابل ملاحظه‌ای از امپدانس بدست آمده از یک خازن متفاوت است و بنابراین بررسی SSR آن متفاوت است.

MOV: یک محدودکننده ولتاژ است و معمولاً یک مدار clipper دیودی است.

by pass breaker: برای جلوگیری از اختلالات SSR بکار می‌رود.

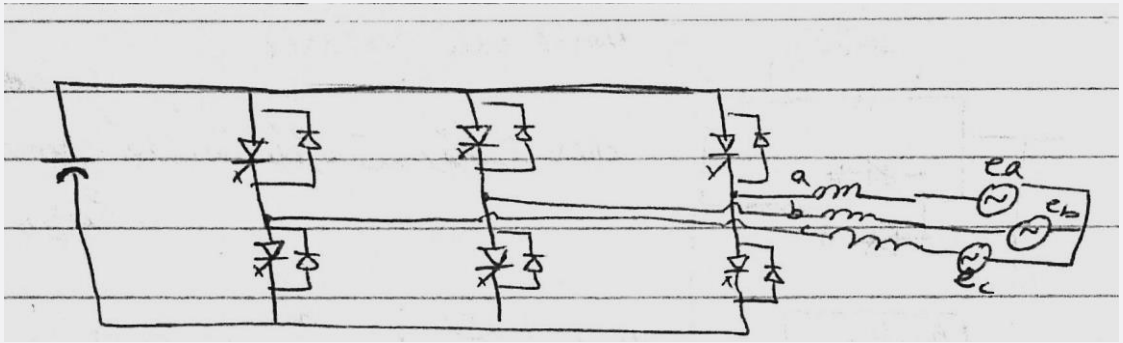
Metal oxid varistor

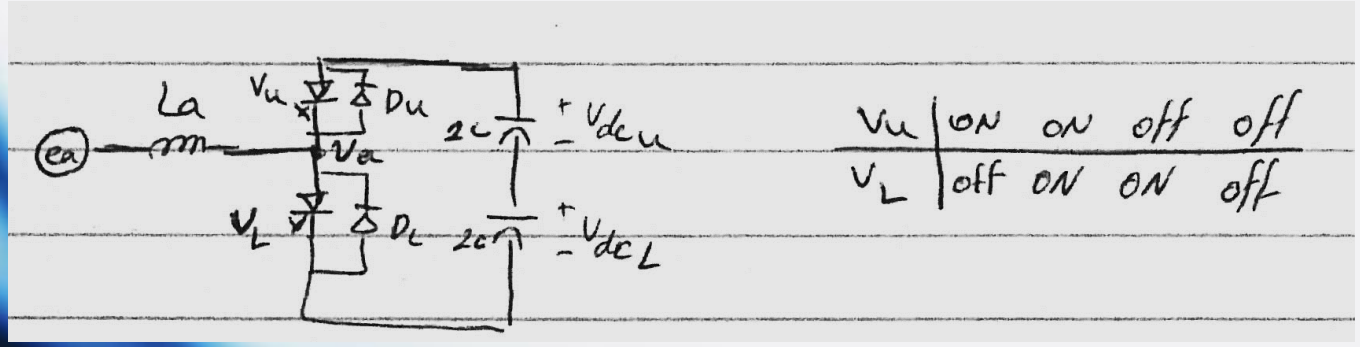


ساختار یک VSI (Voltage Source Inverter)

دیودها برای تضمین وجود مسیر برای جریان

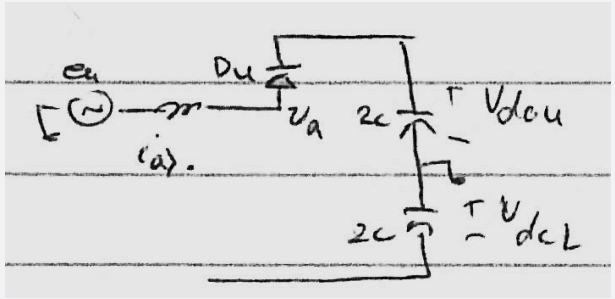
هدایت سوئیچ با روشن بودن آن در مفهوم متفاوت هستند.





$$case1: \begin{cases} V_u : \text{ON} \\ V_l : OFF \end{cases}$$

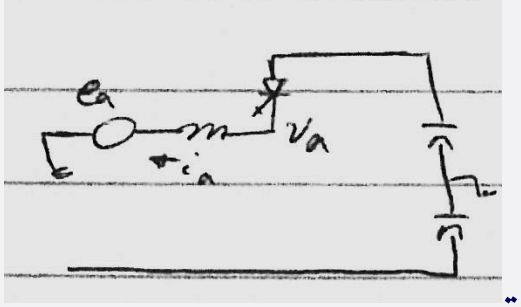
$i_a > 0$



$$L\frac{di_u}{dt} = e_a - V_{dcu}$$

$$2c\frac{dV_{dcu}}{dt} = i_{dcu} = i_a$$

$i_a < 0$

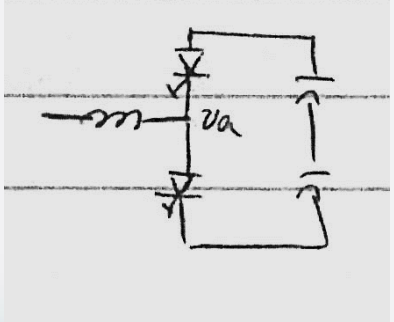


دیود پایین بایاس معکوس است و هدایت نمی کند.

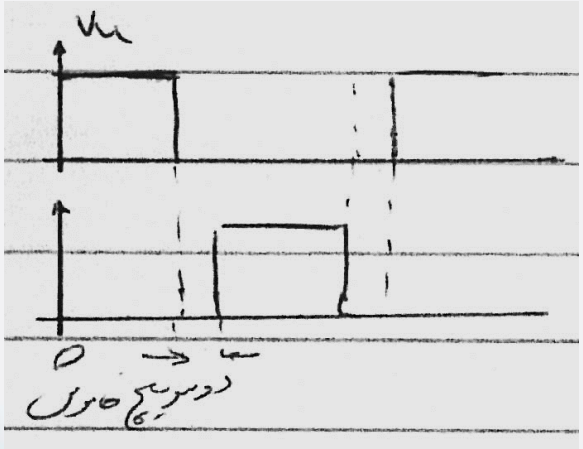
دو سر منبع اتصال کوتاه شده است و این حالت مجاز نیست

این حالت به shoot-through معروف است و بایستی از وقوع آن احتراز شود.

$$case2: \begin{cases} V_u : \text{ON} \\ V_l : \text{ON} \end{cases}$$

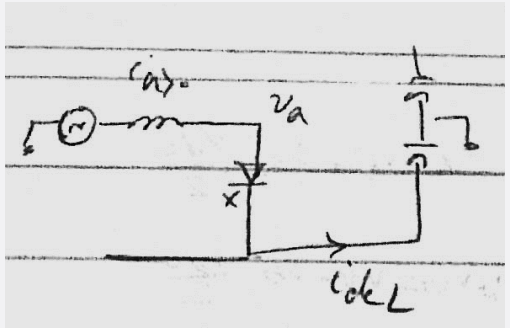


جهت جلوگیری از وقوع shoot-through روشن شدن سوئیچ پایین با یک تأخیر نسبت به خاموش شدن سوئیچ بالایی انجام می‌گیرد و بالعکس.



$$case3: \begin{cases} V_u : \text{OFF} \\ V_l : \text{ON} \end{cases}$$

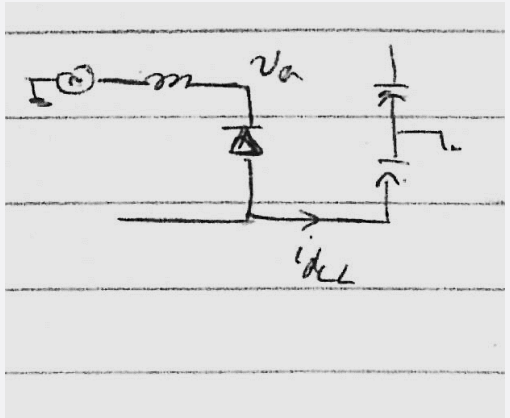
$$i_a > 0$$



$$L\frac{di_a}{dt} = e_a - \left(-V_{dcl}\right)$$

$$2c\frac{dV_{cl}}{dt} = -i_a = -i_{dcl}$$

$$i_a < 0$$



$$-e_a - L\frac{di_a}{dt} - V_{dcl} = 0$$

$$L_a\frac{di_a}{dt} = e_a - V_{dcl}$$

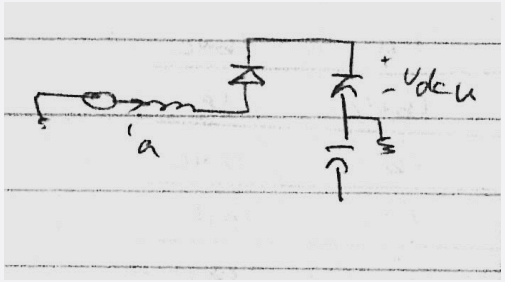
$$2c\frac{dV_c}{dt} = i_a = -i_{dcl}$$

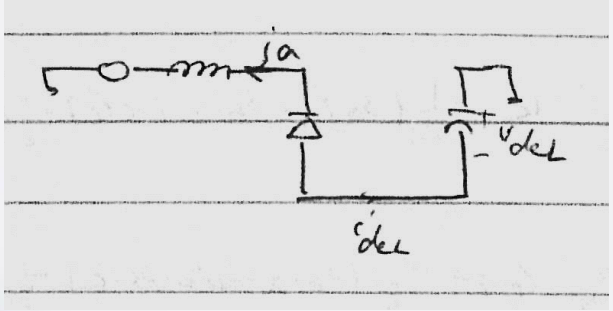
$$case\,4: \begin{cases} V_u : \text{OFF} \\ V_l : \text{OFF} \end{cases}$$

$$-e_a + L_a \frac{di_a}{dt} + V_{dcu} = 0$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = e_a - V_{dcu}$$

$$i_a = i_{dcu} = 2c \frac{dv_{cu}}{dt}$$





$$i_a < 0$$

$$-e_a - L_a \frac{di_a}{dt} - V_{dcl} = 0$$

$$L_a \frac{di_a}{dt} = -e_a - V_{dcl}$$

$$i_a = -i_{dcl} = -\left(-2c \frac{dv_{cl}}{dt}\right)$$

Switching Function

یک منطق سوئچینگ تعریف کنید. سوئیچ خاموش S_a=-1 و سوئیچ روشن S_a=1

$S_a=1$		$S_a=-1$	
ON	ON	off	off
off	ON	off	ON
$V_a = S_a V_{dcU}$			$V_a = S_a V_{dcL}$
$i'_{dcU} = S_a i_a$			$i'_{dcL} = -S_a i_a$
$i'_{dcL} = 0 = \frac{(S_a-1)}{2} i_a$			$i'_{dcU} = 0 = \frac{S_a+1}{2} i_a$

Switching Function

$$s_a = \pm 1 \qquad V_a = V_N + S_a \frac{V_{dc}}{2}$$

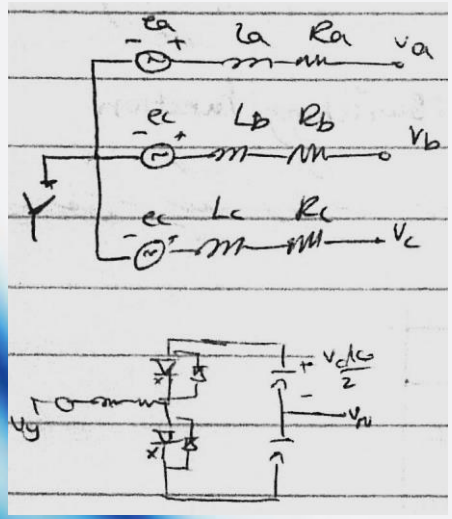
$$s_b = \pm 1 \qquad V_b = V_N + S_b \frac{V_{dc}}{2}$$

$$s_c = \pm 1 \qquad V_c = V_N + S_c \frac{V_{dc}}{2}$$

S_a	S_b	S_c	i_{dcu}	i_{dcL}
		1	$i_a+i_b+i_c$	0
	1	-1	i_b+i_a	i_c
1		1	i_a+i_c	i_b
	-1	-1	i_a	i_b+i_c
		1	i_b+i_c	i_a
	1			
-1		-1	i_b	i_a+i_c
		1	i_c	i_a+i_b
	-1		0	
		-1		$i_a+i_b+i_c$

$$i_{dcu} = \frac{S_a+1}{2} i_a + \frac{S_b+1}{2} i_b + \frac{S_c+1}{2} i_c = \frac{1}{2}\left(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c\right) + \frac{1}{2}\left(i_a + i_b + i_c\right)$$

$$i_{dcl} = -\left(\frac{S_a-1}{2} i_a + \frac{S_b-1}{2} i_b + \frac{S_c-1}{2} i_c\right) = -\frac{1}{2}\left(S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c\right) - \frac{1}{2}\left(i_a + i_b + i_c\right)$$



$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a = e_a + V_y - V_a = e_a + V_y - \left(V_N + s_a \frac{V_{dc}}{2}\right)$$

$$L_b \frac{di_b}{dt} + R_b i_b = e_b + V_y - V_b = e_b + V_y - \left(V_N + s_b \frac{V_{dc}}{2}\right)$$

$$L_c \frac{di_c}{dt} + R_c i_c = e_c + V_y - V_c = e_c + V_y - \left(V_N + s_c \frac{V_{dc}}{2}\right)$$

$$if \quad L_a = L_b = L_c = L \quad R_a = R_b = R_c = R$$

$$\underline{1},\underline{2},\underline{3} \Rightarrow L\frac{d}{dt}\left(i_a + i_b + i_c\right) + R\left(i_a + i_b + i_c\right) = e_a + e_b + e_c + 3\left(V_y - V_N\right) - \left(s_a + s_b + s_c\right)$$

اگر مرکز ستاره به نقطه وسط خازنها وصل شده باشد.

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

$$V_y - V_N = \frac{s_a + s_b + s_c}{3} \cdot \frac{V_{dc}}{2} - \frac{e_a + e_b + e_c}{3}$$

با جایگذاری در روابط فاز k

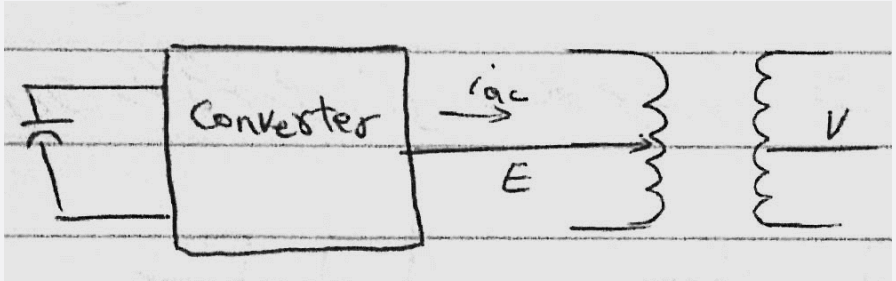
$$L\frac{di_k}{dt} + Ri_k = e_k - \frac{1}{3}(s_a + s_b + s_c)\frac{V_{dc}}{2} - \frac{1}{3}(\mathrm{e}_a + \mathrm{e}_b + \mathrm{e}_c) - \mathrm{S}_k\frac{V_{dc}}{2}$$

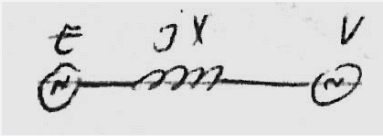
توان ورودی به مبدل

$$i_a V_a + i_b V_b + i_c V_c = i_a \left(V_N + s_a \frac{V_{dc}}{2} \right) + i_b \left(V_N + s_b \frac{V_{dc}}{2} \right) + i_c \left(V_N + s_c \frac{V_{dc}}{2} \right)$$

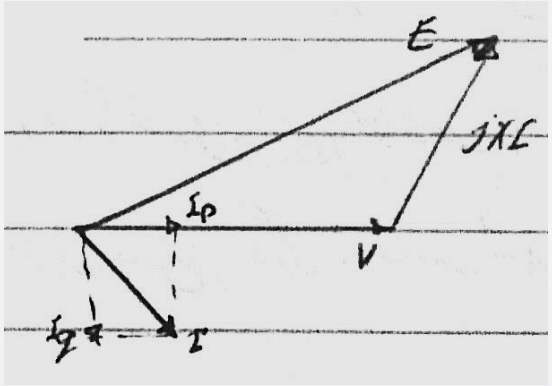
$$= \left(i_a + i_b + i_c \right) V_N + \frac{s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c}{2} V_{dc} = I_{dcu} \times V_{dc}$$

$$c \frac{dV_c}{dt} = i_{dcu} = \frac{s_a i_a + s_b i_b + s_c i_c}{2}$$





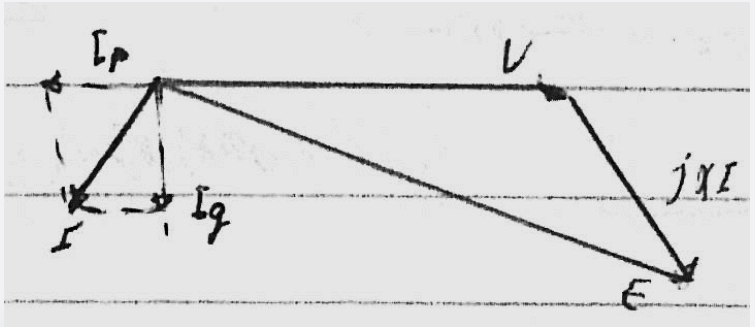
فرض: E مؤلفه‌ی اصلی خروجی مبدل ولتاژ باشد.



منبع:

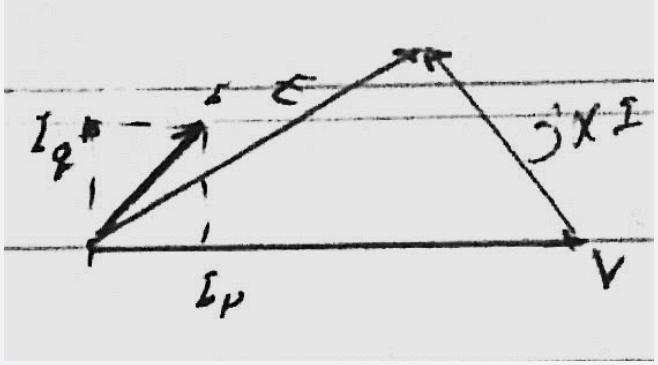
$I_p>0$ توان اکتیو تولید می کند

$I_q<0$ توان راکتیو تحویل می‌دهد



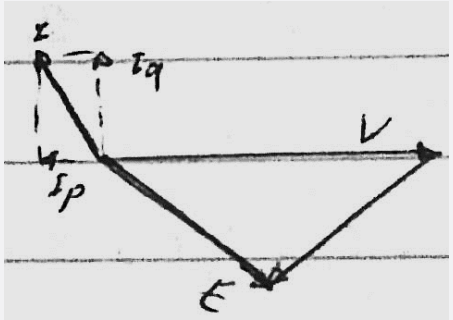
توان اکتیو تحویل می گیرد

توان راکتیو تولید می کند



$I_p>0$ توان اکتیو تولید می کند

$I_q<0$ توان راکتیو تحویل می گیرد



$I_P<0$ توان اکتیو تحویل می گیرد

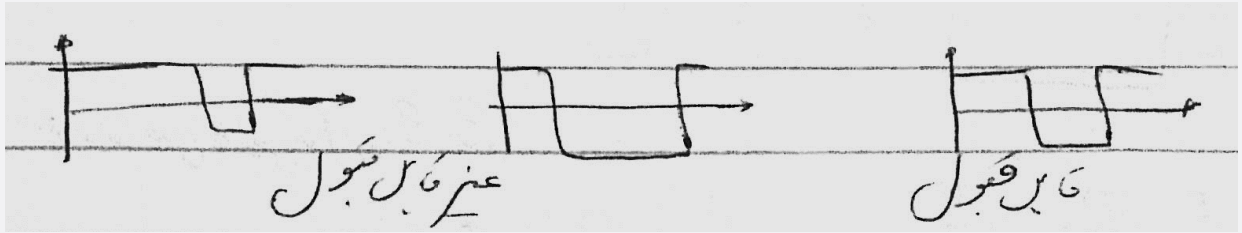
$I_q>0$ توان راکتیو تحویل می گیرد

در مقایسه با کندانسورهای سنکرون:

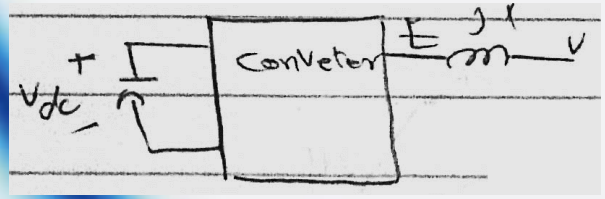
- این مبدل سرعت بسیار بالاتری دارد
- فاقد دینامیک داخلی است بنابراین از ایجاد رزونانس با شبکه جلوگیری می‌شود
- اگر خازن با یک منبع DC جایگزین شود و یا خازن به مبدل دیگری متصل شود می‌تواند توان اکتیو با شبکه مبادله کند

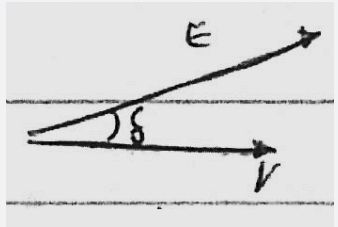
در ساختار نشان داده شده از مبدل تنها به عنوان جبران‌کننده توان راکتیو استفاده می‌شود.

با دو سوئیچ روی یک بازوی مبدل در یک سیکل فقط می‌توان آنها را بصورت متقارن سوئیچ کرد در غیر اینصورت ولتاژ خروجی دارای مؤلفه DC خواهد بود که باعث اشباع ترانسفورماتورها می‌شود.

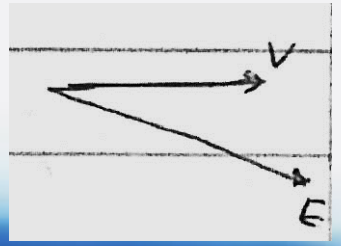


برای جبران تلفات مبدل و تثبیت (کنترل) ولتاژ خازن بایستی اختلاف زاویه کوچکی بین E و V وجود داشته باشد تا توان اکتیو لازم جهت جبران تلفات مبدل از شبکه دریافت شود.

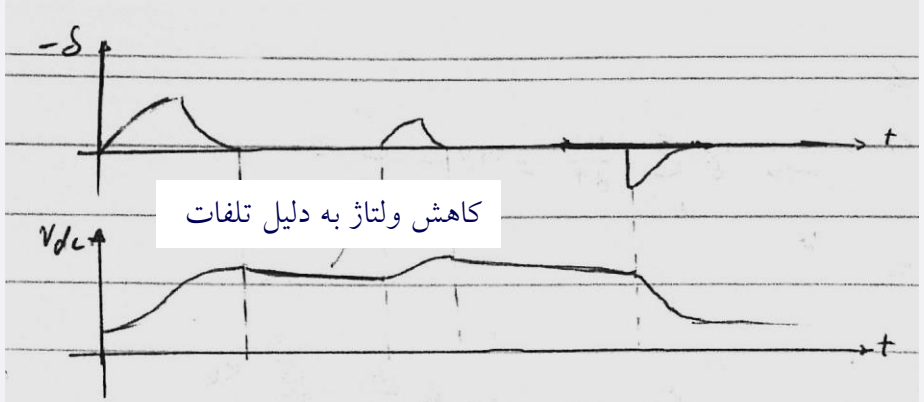




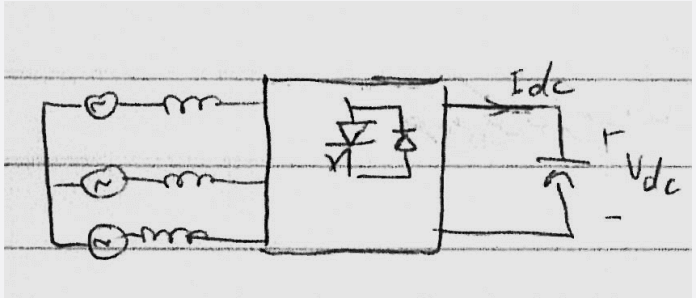
توان به شبکه تحویل داده می‌شود (کاهش ولتاژ خازن)



توان از شبکه تحویل می‌گیرد (افزایش ولتاژ خازن)



کاهش ولتاژ به دلیل تلفات



$$c\frac{dV_{dc}}{dt} = I_{dc} \qquad cV_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} = V_{dc}I_{dc} = P_{dc} = P_{ac}$$

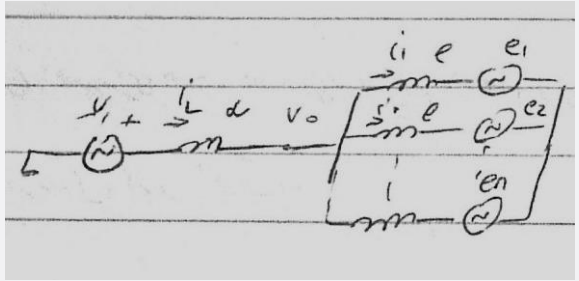
$$\frac{d}{dt}\left(\frac{1}{2}cV_{dc}^2\right) = P_{ac} \Rightarrow \frac{1}{2}cV_{dc}^2 - \frac{1}{2}cV_{dc}^2(0) = \int_0^t P_{ac}(\tau)\,d\tau$$

$$V_{dc}(t) = \sqrt{V^2{}_{dc}(0) + \frac{2}{c}\int_0^t P_{ac}(\tau)\,d\tau}$$

رابطه ولتاژ خازن با توان AC

$$P_{ac} = \frac{3V\mathrm{E}}{X}\sin\delta$$

کاهش هارمونیک‌ها توسط شیفت فاز:

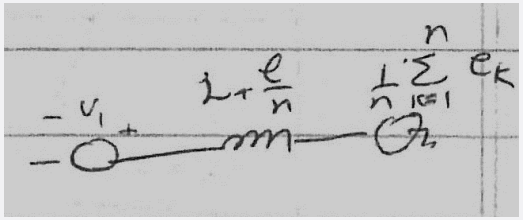


$$L\frac{di_L}{dt}=V_1-V_0$$

$$\left.\begin{aligned} l\frac{di_1}{dt}&=V_0-e_1\\ l\frac{di_2}{dt}&=V_0-e_2\\ &\vdots\\ l\frac{di_n}{dt}&=V_0-e_n \end{aligned}\right\}\Rightarrow l\sum_{k=1}^{n}\frac{di_k}{dt}=nV_0-\sum_{k=1}^{n}e_k\Rightarrow l\frac{di_L}{dt}=nV_0-\sum_{k=1}^{n}e_k\Rightarrow V_0=\frac{l}{n}\frac{di_L}{dt}+\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}e_k$$

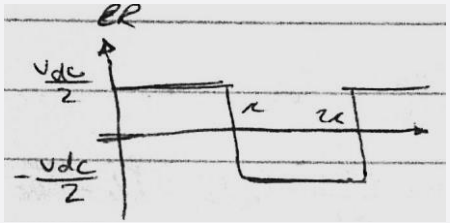
$$L\frac{di_L}{dt}=V_1-\frac{l}{n}\frac{di_L}{dt}-\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}e_k$$

$$\left(L+\frac{l}{n}\right)\frac{di_L}{dt}=V_1-\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}e_k$$



می‌توان گفت که به کمک موارد فوق می‌توان ولتاژ خروجی چند مبدل را با هم جمع کرد اگر ولتاژ خروجی این مبدل‌ها بصورت مناسبی شیفت داده شوند آنگاه می‌توان بعضی از مؤلفه‌های هارمونیکی نامطلوب را حذف کرد.

مثال:حذف هارمونیک‌ها به کمک مبدل‌های شش پالسه:



خروجی یک فاز یک مبدل شش پالسه

$$e_R = \frac{V_{dc}}{2}.\frac{4}{\pi}\left(\sin\omega t + \frac{1}{3}\sin 3\omega t + \frac{1}{5}\sin 5\omega t + ...\right)$$

هارمونی مرتبه سوم اهمیت ندارد زیرا در حلقه Δ سیرکوله می‌شود.

$$e_R\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) = \frac{V_{dc}}{2}.\frac{4}{\pi}\left(\sin\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + \frac{1}{3}\sin 3\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + \frac{1}{5}\sin 5\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + ...\right) =$$

$$= \frac{v_{dc}}{2}.\frac{4}{\pi}\left(\sin\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + \frac{1}{3}\sin\left(3\theta - \frac{3\pi}{5}\right) + \frac{1}{5}\sin(5\theta - \pi) + \frac{1}{7}\sin\left(7\theta - \frac{7\pi}{5}\right) + ...\right)$$

هارمونی پنجم حذف می‌شود. دو مبدل لازم است. $e_R + e_R\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right)$

نشان دهید برای حذف هارمونی‌های پنجم و هفتم چهار مبدل لازم است.

$$e_R(\theta) + e_R\left(\theta - \frac{\pi}{7}\right) + e_R\left(\theta - \frac{\pi}{5}\right) + e_R\left(\theta - \frac{\pi}{5} - \frac{\pi}{7}\right)$$

معایب:

- تعداد زیاد مبدل‌ها
- تضعیف مؤلفه اصلی خروجی به دلیل شیفت فازها

$$\sin\left(\theta_r\right)+\sin\left(\theta_r-\frac{\pi}{5}\right)<2\sin\left(\theta_r\right)$$

مزیت: سادگی روش مخصوصاً برای حذف تعداد کم هارمونیک‌ها

انواع مبدل‌ها:

- مبدل‌های با قدرت کم و متوسط

در این مبدل‌ها کنترل ولتاژ و حذف هارمونیک‌های مرتبه پایین عموماً بوسیله روش‌های مختلف PWM مانند SPWM (PWM سینوسی)، SVM (مدولاسیون بردار فضایی)، SHE (حذف انتخابی هارمونیک‌ها) انجام می‌شود. فرکانس سوئیچینگ در این مبدل‌ها معمولاً بالاست. بنابراین بایستی از سوئیچ‌های سریع با تلفات سوئیچینگ کم استفاده کرد.

- مبدل‌های با توان بالا:

باید دارای راندمان بالا باشند. راندمان بالا باعث می‌شود که هم هزینه‌های اولیه و هم هزینه‌های استفاده‌ی مبدل‌ها کاهش یابد.

توصیه‌های IEEE، THD کمتری برای توان‌های بالا نسبت به کاربردهای توان متوسط پیشنهاد می کند.

این محدودیت‌ها به همراه محدودیت‌های سوئیچ‌های قدرت (سرعت کم، تلفات بالای سوئیچینگ) منجر به ارائه ساختارها و بکارگیری روش‌های خاص PWM در این مبدل‌ها شده است.

از میان این مبدلها می‌توان به مبدلهای چند واحدی (Multi-Module Converter) یا مبدلهای چند سطحی (Multi-Level converter)

ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

در جهت افزایش قدرت مبدل در یک مبدل معمولی پل، سوئیچ‌های قدرت باید بطور موازی و سری قرار گیرند (نوعاً برای مبدل‌های با توان بالاتر از MVA ۱۰۰) به جای سری و موازی کردن سوئیچ‌ها می‌توان بدون افزایش قابل ملاحظه‌ی هزینه، مبدل‌ها را سری یا موازی کرد. این تکنیک باعث می‌شود که بتوان هارمونیک‌ها را تا حد قابل ملاحظه‌ای کاهش داد و یا در بعضی روش‌ها حذف کرد.

در این روش فرکانس سوئیچینگ هر مبدل پایین است در حالیکه ولتاژ خروجی کل از THD خوبی برخوردار است. دقت کنید که اصولاً سوئیچ‌های قدرت بالا را نمی‌توان با فرکانس بالا سوئیچ کرد بنابراین با تکنولوژی حاضر استفاده از یک مبدل به تنهایی منتفی است.

ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

مبدل‌های چند واحدی Multi-Module Topologies

در این روش از ساختارهای مختلف و روش‌های سوئیچینگ متفاوت استفاده می‌شود. با این وجود در تمامی این روش‌ها به نوعی از این اصل بهره گرفته می‌شود که مؤلفه‌های اصلی خروجی مبدل‌های مختلف حتی‌الامکان هم فاز باشند و مبدل‌ها اختلاف‌های فاز مناسب در مؤلفه‌های هارمونیک خروجی مبدل‌های مختلف ایجاد کند بطوریکه وقتی این مؤلفه‌ها با هم جمع می‌شوند مؤلفه اصلی تقویت و مؤلفه‌های هارمونیک‌ها حذف و یا کاهش یابند. از بین این مبدل‌ها می‌توان به مبدل‌های چند پالسه (Multi-Pulse Inverter) و مبدل‌های چند واحدی PWM (Multi-Module PWM Inverter) اشاره کرد.

ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

Multi-Pulse Inverter :خصوصیت منحصر به فرد این مبدل‌ها اینست که:

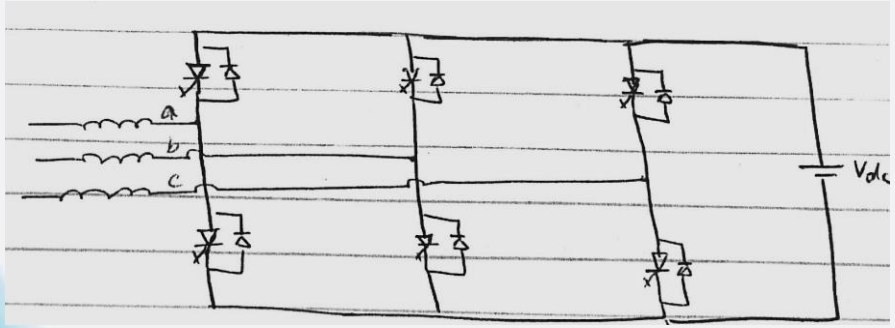
- در کمترین فرکانس سوئیچینگ ممکن کار می کند.
- حذف هارمونیک‌ها در این مبدل‌ها بطور کامل انجام می‌شود.

عیوب اصلی این مبدل‌ها:

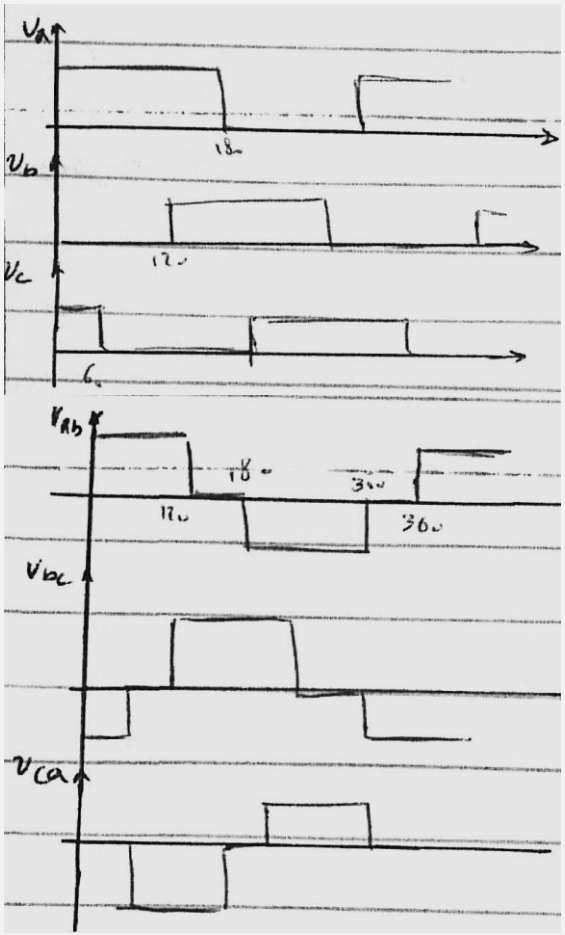
- خطی نبودن کنترل
- هزینه ساخت بالا
- MVA پنالتی نسبتاً زیاد

در حال حاضر این مبدل‌ها متداولترین نوع در سیستم‌های قدرت هستند ولتاژ خروجی مبدل از ترکیب ولتاژهای شیفت یافته n مبدل ۶ پالسه ابتدایی در یک واسط الکترومغناطیسی شکل می گیرد. فرکانس هارمونیک‌های موجود در خروجی مبدل (ولتاژ خط) $(6nk \pm 1)\, f$ و در جریان ورودی این مبدل‌ها $6nkf$ می‌باشد که n تعداد مبدل‌های ۶ پالسه بکار گرفته شده و $k = 1,2.3, \ldots.$ می‌باشد.

ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:



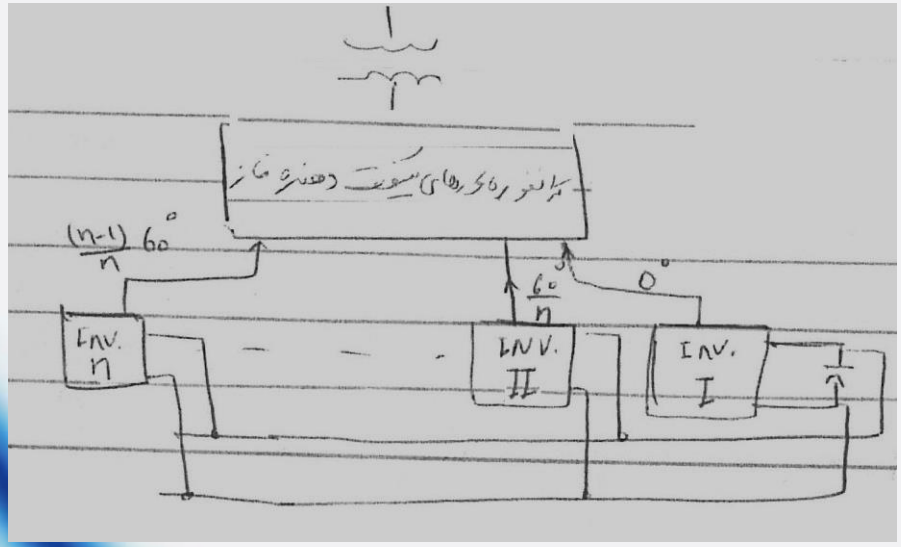
مبدل ۶ پالسه ابتدایی

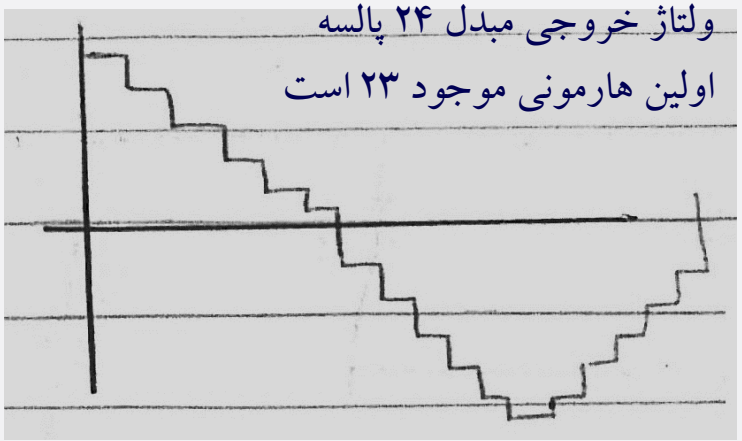


ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

فرکانس سوئیچینگ مبدل = ۱ pu = ۵۰Hz (در فرکانس خط)

وظیفه phase shifting electro magnetic interface هم فاز کردن مؤلفه اصلی n مبدل ۶ پالسه و مخالف فاز کردن مؤلفه‌های هارمونیکی است که باید حذف شوند.



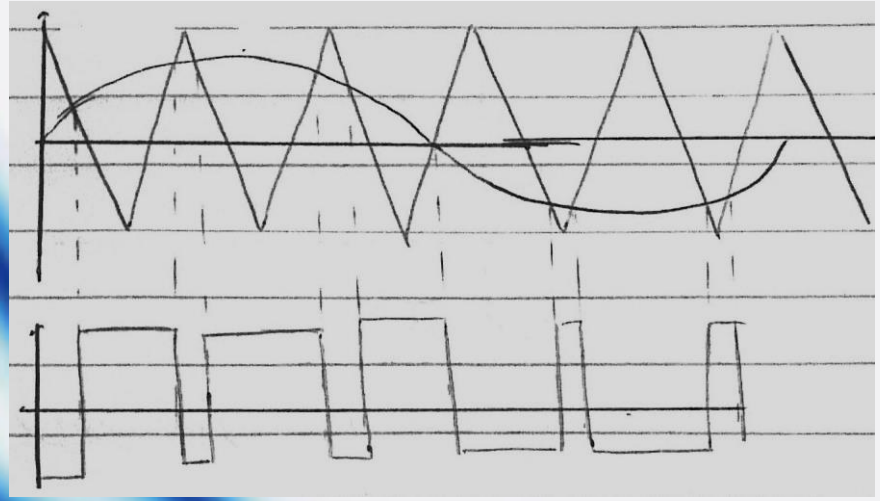


ولتاژ خروجی در مبدل‌های چند پالسه تنها می‌تواند از طریق کنترل ولتاژ باس dc انجام گیرد که در این حالت کنترل غیرخطی و نسبتاً دشوار است.

ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

مبدل‌های PWM:

در روش SPWM لحظات سوئیچینگ سوئیچ‌های هر فاز از مقایسه‌ی یک موج مثلثی با فرکانس f_s موسوم به موج حامل (carrier) و یک موج سینوسی مرجع با فرکانس f_0 موسوم به موج کنترل بدست می‌آید.



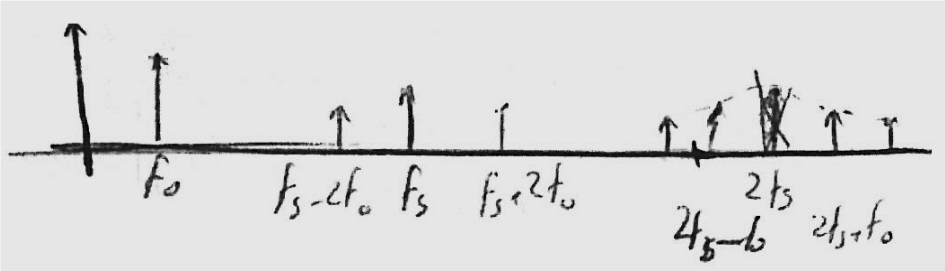
ساختمان مبدل و روش‌های سوئیچینگ:

طیف هارمونیکی ولتاژ خط خروجی بصورت زیر است و هارمونیک‌ها در فرکانس‌های $kf_s \pm pf_0$ ظاهر می‌شوند.

مضارب زوج وجود ندارند

k فرد ← p زوج

k زوج ← p فرد



$$m_f = \frac{f_s}{f_0}$$

m_f باید فرد باشد و برای سیستم سه فاز مضرب ۳ باشد (دامنه هارمونی سوم‌ها برابر باشند و در ولتاژ خط حذف شود)(این روش PWM سنکرون است)

برای مبدل‌های فرکانس بالا $m_f \geq 21$

اگر m_f مضرب فرد ۳ باشد، آنگاه ضرایب فرد m_f نیز حذف می‌شود.

m_f فرد: حذف هارمونیک‌های زوج

m_f مضرب ۳: حذف فرکانس کریر از ولتاژ خط به خط به نوترال ترانس و مضارب فرد آن

اگر از روش‌های PWM معمول استفاده شود، فرکانس سوئیچینگ هر واحد مبدل حداقل ۲۱ pu است. که برای مبدل‌های توان خیلی زیاد قابل قبول نمی‌باشد.

بررسی با فرکانس کریر کم:

m_f زوج: مؤلفه DC – تداخل با مؤلفه اصلی و هارمونی‌های زوج

$m_f = 4 \quad k = 1: 4f_0 \pm 2f_0$

$k = 2: 8f_0 \pm (2l + 1)f_0$ تداخل با مؤلفه اصلی $(l = 3)$

$m_f = 3 \quad 3kf_0 \pm pf_0$

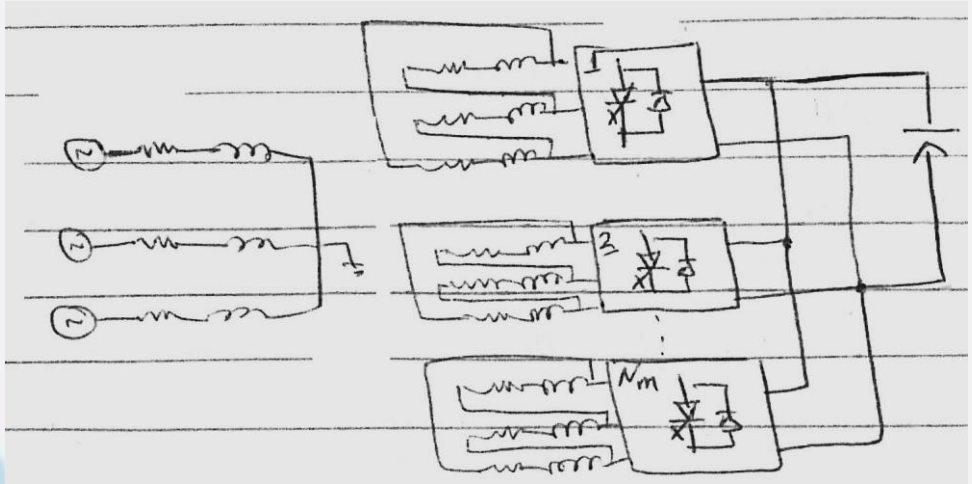
تداخل با مؤلفه اصلی $(k = 1, p = 2)$

$m_f = 5 \quad 5kf_0 \pm pf_0$ تداخل ناچیز با مؤلفه اصلی

side bandها با افزایش p دامنه کمتری خواهند داشت

هرچند برای $m_f = 5$ و یا حتی $m_f = 3$ تداخل هارمونیک‌ها در مؤلفه اصلی بوجود می‌آید اما از آنجا که هارمونی‌های زوج و مقدار DC تولید نمی‌شود این مقادیر قابل قبول هستند.

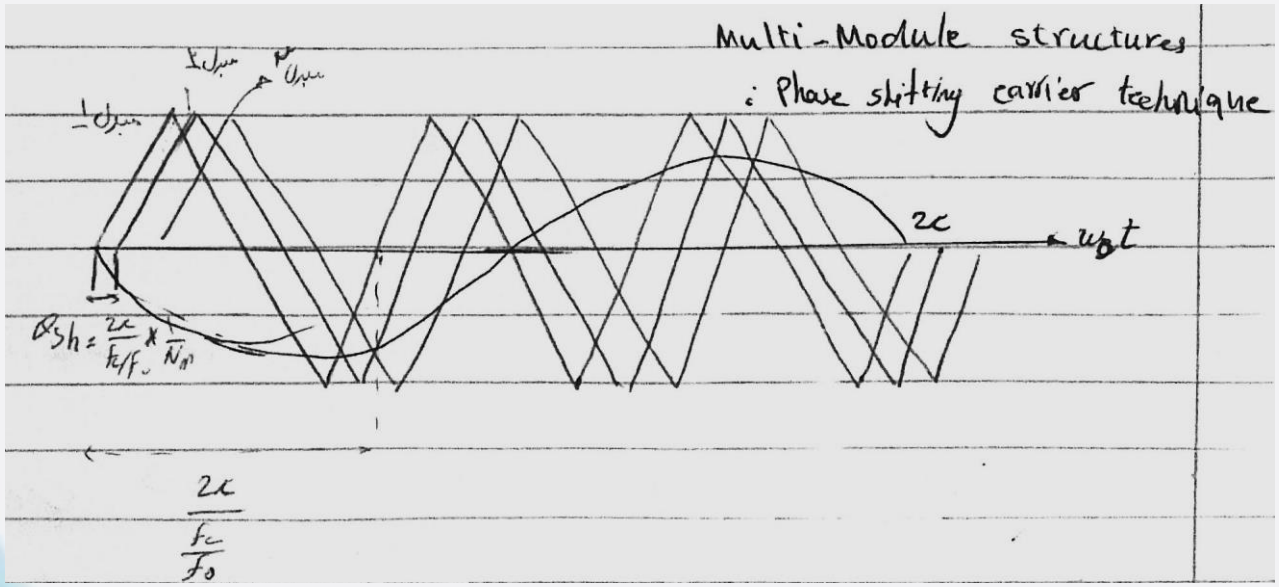
Multi-module PWM Converter



اگر تمام مبدل‌ها بصورت یکسان سوئیچ شوند مؤلفه‌های اصلی و هارمونیک‌ها همفاز هستند. بنابراین در خروجی مؤلفه اصلی و هارمونی‌ها به یک نسبت تقویت می‌شوند و هیچگونه حذف و یا تضعیف هارمونیکی بدلیل ساختار چند واحدی صورت نمی گیرد.

تنها ریتینگ مبدل افزایش یافته است و برای داشتن یک خروجی قابل قبول بایستی m_f حداقل ۲۱ باشد که برای مبدل قدرت مناسب نیست.

Multi-module PWM Converter

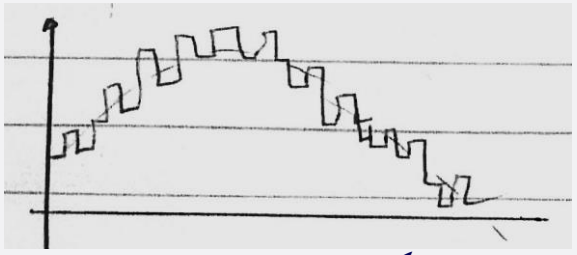


اگر N_m تعداد مبدل‌ها باشد

در این روش از N_m مبدل جداگانه استفاده می‌شود و موج مثلثی حامل در همه مبدل‌ها از نظر اندازه و فرکانس یکسان است هرچند که از یک مبدل به مبدل بعدی به اندازه θsh شیفت داده می‌شود. ولتاژهای خروجی مبدلها را از طریق یک واسطه الکترومغناطیسی که می‌تواند یک ترانسفورماتور سه فاز ساده با N_m ثانویه باشد با هم جمع می‌شوند.

می‌توان نشان داد که طیف هارمونیکی این مبدل با حامل‌های شیفت داده شده تقریباً مشابه طیف هارمونیکی یک مبدل SPWM تک واحدی با فرکانس حامل $N_m f_c$ کار می کند.

Multi-module PWM Converter



شکل موج خروجی یک مبدل با حامل‌های شیفت داده شده

مزایای این مبدل نسبت به ساختار چند سطحی:

- خطی بودن مشخصه کنترلی: $v_{1(\omega t)} \propto ma = \frac{\text{دامنه موج سینوسی مرجع}}{\text{دامنه موج مثلثی حامل}}$
- سادگی مدار قدرت: احتیاجی به ترانسفورماتورهای پیچیده شیفت دهنده فاز ندارد

معایب:

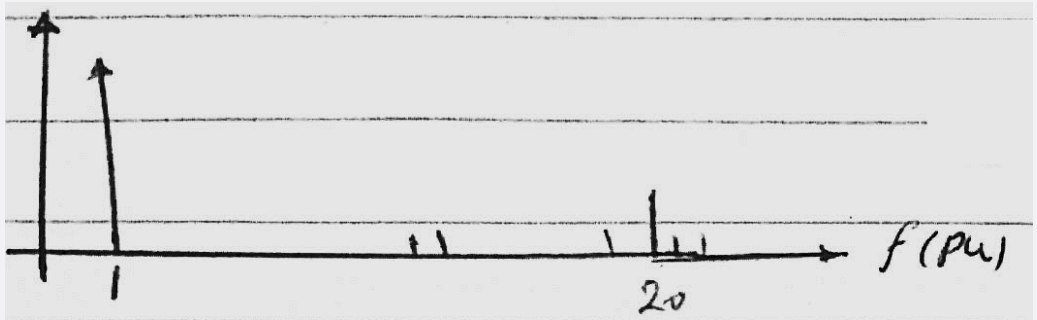
- فرکانس سوئیچینگ بالاتر
- بهره ولتاژ کمتر (تضعیف مؤلفه اصلی بدلیل همفاز نبودن مؤلفه‌های اصلی)

در جهت عدم تداخل مرلفه‌های هارمونیکی با مؤلفه اصلی در هر واحد معمولاً $\frac{f_c}{f_0} > 5$ اختیار می‌شود بنابراین فرکانس سوئیچینگ این مبدل‌ها حداقل ۵pu می‌باشد. در صورتیکه فرکانس سوئیچینگ مبدل چندپالسه ۱pu است.

Multi-module PWM Converter

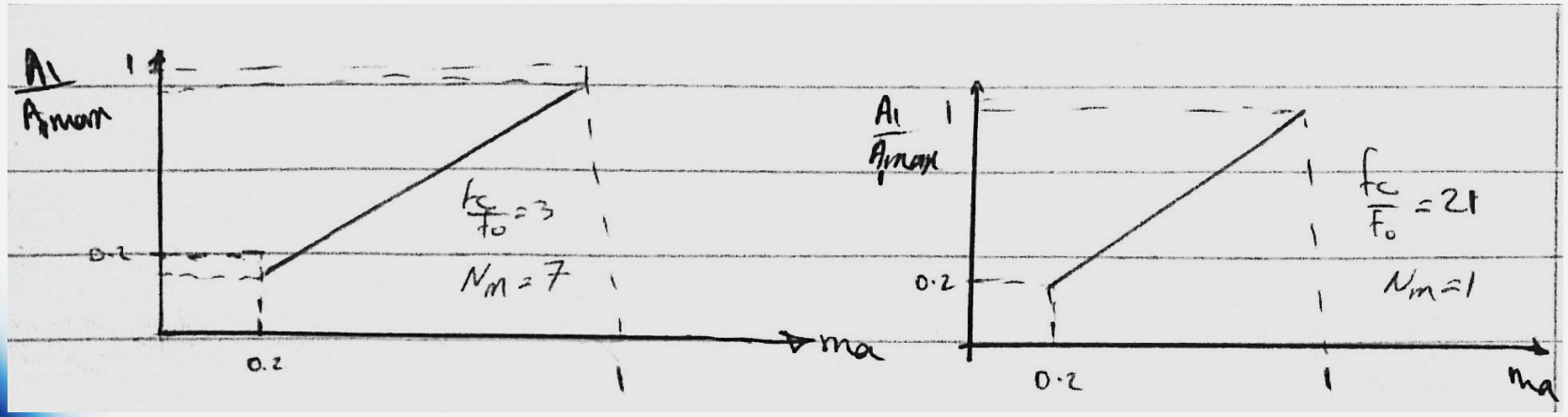
مؤلفه‌های اصلی خروجی مبدل‌های گوناگون همفاز نیستند بنابراین وقتی با هم جمع می‌شوند مؤلفه اصلی خروجی کمتر از حالتی که شیفت فاز وجود نداشته باشد. همچنین بهره ولتاژ یک مبدل SPWM نسبت به بهره ولتاژ یک مبدل ۶ پالسه بسیار کمتر است و بنابراین بهره ولتاز مبدل‌های چند واحدی SPWM کمتر از مبدل‌های چند پالسه است.

طیف هارمونیکی خروجی یک مبدل ۷ واحدی با $\frac{f_c}{f_0} = 3$



Multi-module PWM Converter

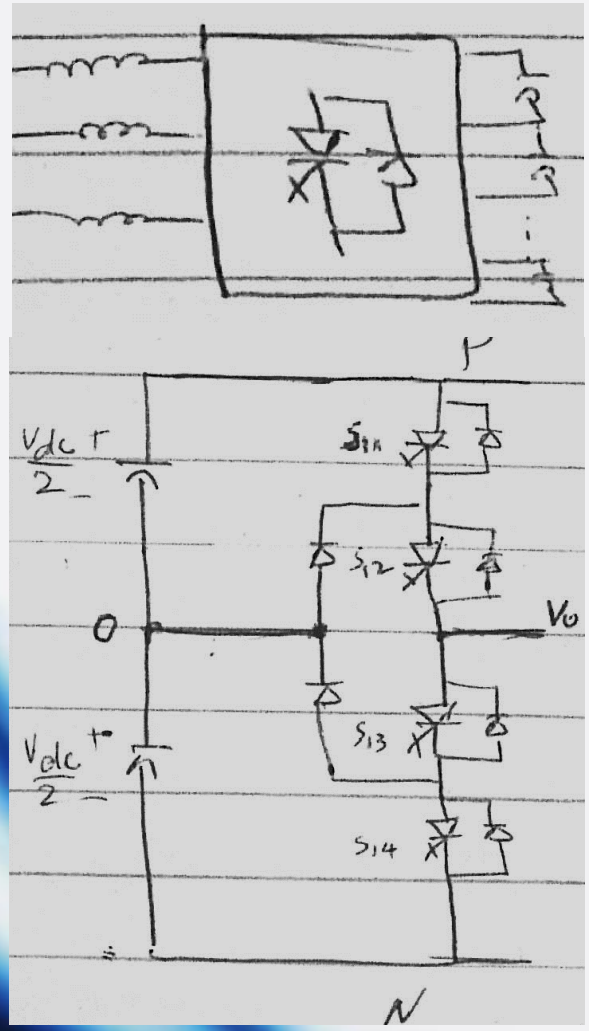
A_{1max} دامنه مؤلفه خروجی در یک مبدل یک واحدی با فرکانس $\frac{f_c}{f_0} = 21$
با افزایش تعداد مبدل‌ها می‌توان به $THD < 5\%$ مطلوب دست یافت.



ساختارهای چند سطحی

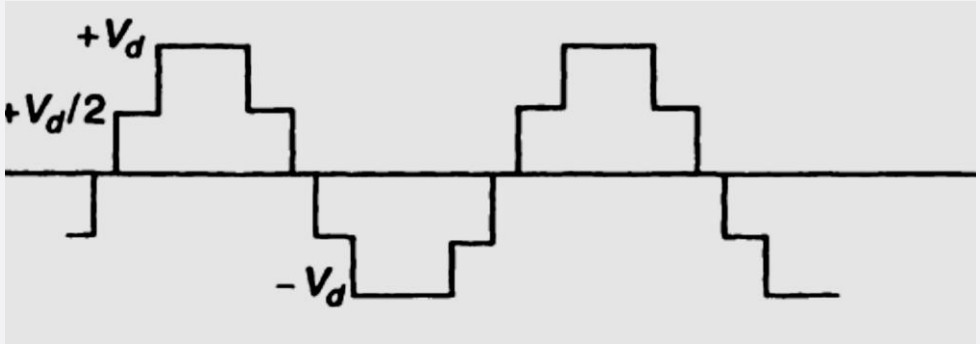
شماتیک یک مبدل چند سطحی

مبدل سه سطحی دارای سه سطح ولتاژ خروجی فاز است.



یک بازوی یک مبدل سه سطحی

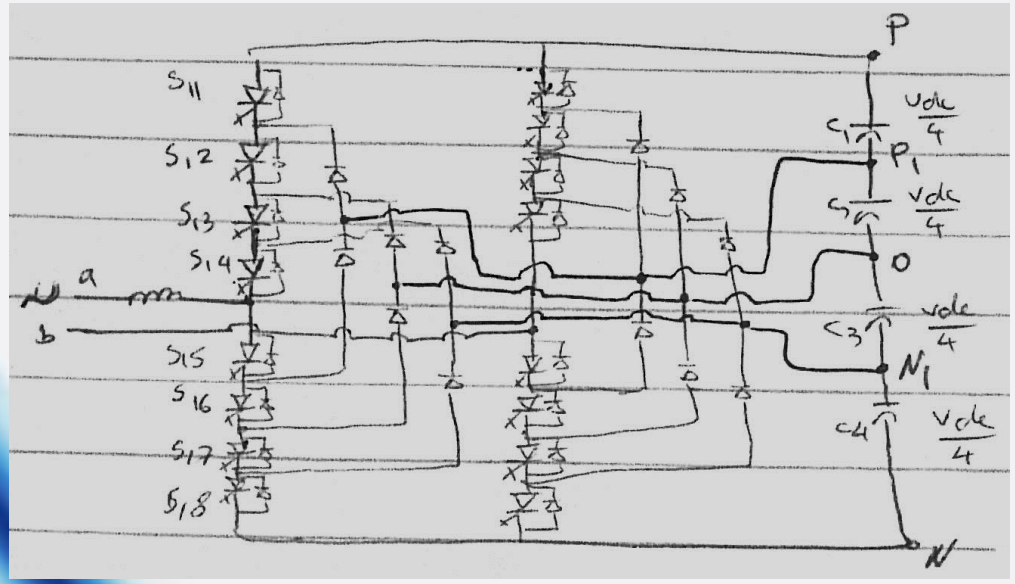
	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	V_o
P	1	1	0	0	Vdc
O	0	1	1	0	Vdc/2
N	0	0	1	1	0

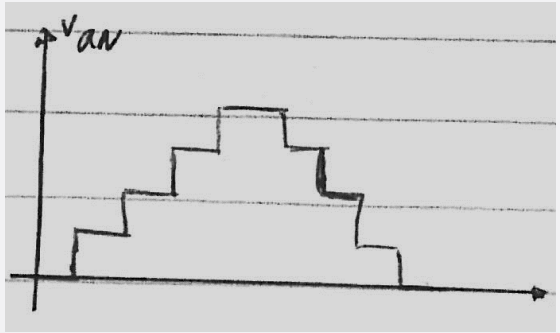


ساختارهای چند سطحی

ساختار یک مبدل ۵ سطحی تکفاز

شکل موج خروجی برای مبدل تک پالسه (فرکانس سوئیچینگ ۱ pu)





	S_{11}	S_{12}	S_{13}	S_{14}	S_{15}	S_{16}	S_{17}	S_{18}	V_a
P	1	1	1	1	0	0	0	0	V_{dc}
P_1	0	1	1	1	1	0	0	0	$\frac{3V_{dc}}{4}$
O	0	0	1	1	1	1	0	0	$\frac{V_{dc}}{2}$
N_1	0	0	0	1	1	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{4}$
N	0	0	0	0	1	1	1	1	0

ساختارهای چند سطحی

$$\neq of\ diodes\ per\ phase = 4m - 6$$
$$\neq of\ switch\ per\ phase = 2(m-1)$$
$$\neq of\ capacitor = m - 1$$

ماکزیمم ولتاژ معکوس هر سوئیچ $\frac{V_{dc}}{m-1}$

در V_{dc} مساوی، ولتاژ معکوس سوئیچ‌ها در مبدل ۲ سطحی $(m-1)$ برابر ولتاژ معکوس سوئیچ‌ها در مبدل m سطحی است.

مزیت مهم مبدلهای چند سطحی نسبت به مبدلهای چند واحدی عدم نیاز آن به واسطه الکترومغناطیسی است که خروجی مبدلهای گوناگون را با هم جمع کند.

- مشکل مهم مبدلهای چند سطحی متعادل سازی ولتاژهای باس dc است

ساختارهای چند سطحی

اگر اختلاف فاز ولتاژ و جریان ۹۰ درجه نباشد طول مدت شارژ و دشارژ خازنها در یک سیکل مساوی نخواهد بود و بنابراین اگر عدم تعادلی در شارژ و دشارژ خازن در یک نیم سیکل بوجود آید در نیم سیکل بعدی قابل جبران بصورت کامل نخواهد بود.

اما اگر اختلاف فاز جریان و ولتاژ ۹۰ درجه باشد در یک نیم سیکل خازنها شارژ و در نیم سیکل دیگر به مقدار مساوی دشارژ می شوند.

این مسأله کاربرد این مبدلها در کنترل توان راکتیو را برجسته می سازد.

ادوات *FACTS* بر پایه مبدل منبع ولتاژ

عمده‌ترین کنترل کننده‌های *FACTS* که از مبدل منابع ولتاژ در ساختار خود استفاده می‌کنند عبارتند از:

الف -*STATCOM* : یا جبران کننده‌ی سنکرون ایستا که به‌صورت موازی به شبکه نصب شده و ولتاژ خط انتقال را در محل اتصال به‌وسیله‌ی جبران موازی کنترل می‌کند.

ب -*SSSC* : یا جبران کننده‌ی سری سنکرون ایستا که جبران‌سازی سری را با کنترل ولتاژ تزریقی به خط انتقال کنترل نموده و بنابراین می‌تواند سیلان توان را کنترل نماید.

Static Synchoronus Compensator
Static Synchrcnous Series Compensator

ادوات *FACTS* بر پایه مبدل منبع ولتاژ

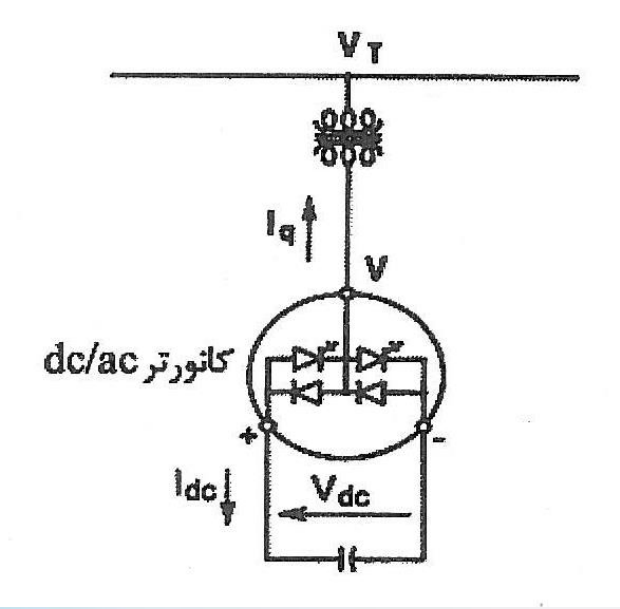
ج -*UPFC* : یا کنترل کننده‌ی یک‌پارچه‌ی توان که می‌تواند به‌طور جداگانه یا به‌صورت ترکیبی، هر سه پارامتر انتقال (ولتاژ، امپدانس و زاویه‌ی فاز) را کنترل نماید توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خط انتقال نیز مستقل از یک‌دیگر توسط این عنصر قابل کنترل‌اند.

د – *IPFC* : یا کنترل کننده‌ی بین خطی توان که قادر است توان اکتیو و راکتیو را بین دو یا چند خط مدیریت نماید.

Unified Power Flow Controller
Interline Power Flow Controller

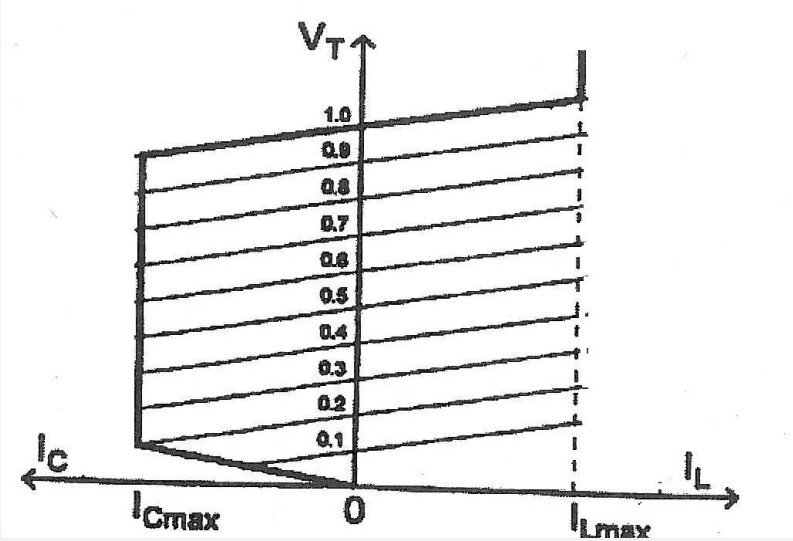
ادوات *STATCOM*

در این حالت، مبدل خازن را شارژ کرده و در سطح ولتاژ مورد نیاز نگه می‌دارد. مبدل از سیستم *AC* مقداری توان اکتیو جذب و مصرف می‌کند تا بتواند تلفات داخلی را تأمین کرده و ولتاژ خازن را در سطح ولتاژ مورد نظر نگه دارد. این کار با تأخیر کم زاویه‌ی فاز ولتاژ خروجی مبدل *(V)* نسبت به ولتاژ سیستم *AC* (V_T) انجام می‌شود. مشخصه‌ی ولتاژ جریان *STATCOM* به‌صورت شکل است.



ادوات *STATCOM*

اگر ولتاژ تولیدی *STATCOM* از ولتاژ سیستم کمتر باشد *STATCOM* به‌عنوان یک بار سلفی عمل کرده و توان راکتیو از سیستم جذب می‌کند. اگر *STATCOM* بخواهد به‌عنوان خازن موازی عمل کند، و توان راکتیو به سیستم تزریق کند ولتاژ آن باید بیشتر از ولتاژ سیستم باشد.

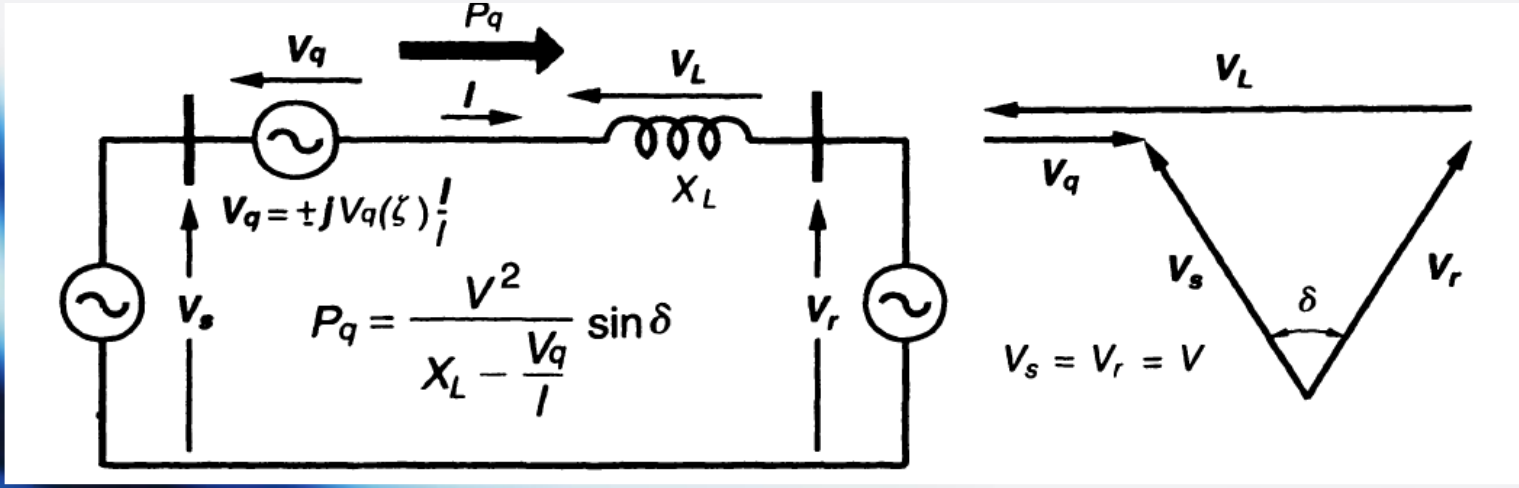


جبران‌ساز SSSC

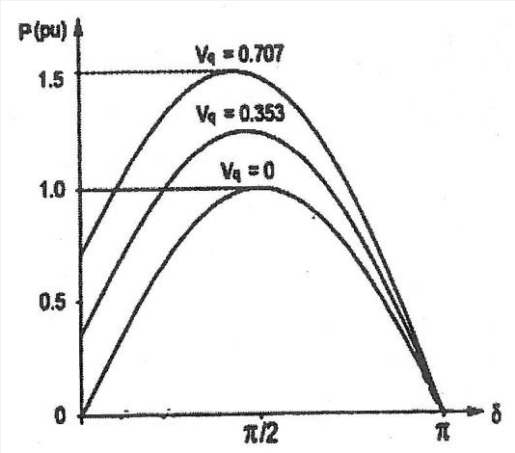
تفـاوت عمـده‌ی

مبدل منبع ولتاژ با خازن سری و نیز با *TCSC* آن اسـت کـه در ایـن وسـایل ولتـاژ تزریق شده با جریان خط متناسـب اسـت، در حـالی کـه *SSSC* قـادر اسـت ولتـاژ دلخواهی را به‌ازای هر جریان عبوری از خط ایجاد کند، یعنی دامنه‌ی ولتـاژ تزریـق شده را مستقل از دامنه‌ی جریان کنترل کند

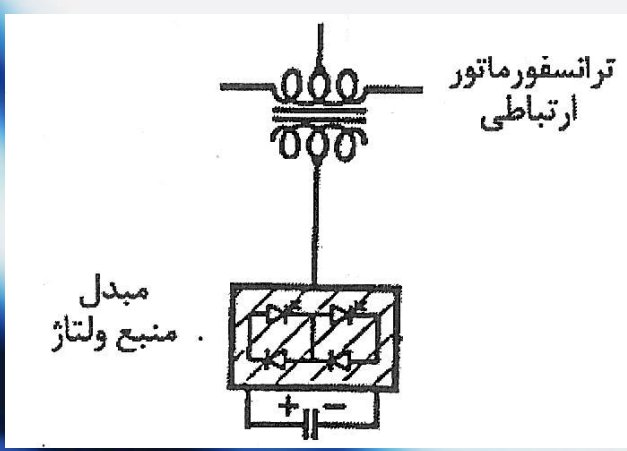
$$P = \frac{V^2}{X} Sin\delta + \frac{V}{X} V_q Cos\frac{\delta}{2}$$



جبران‌ساز SSSC

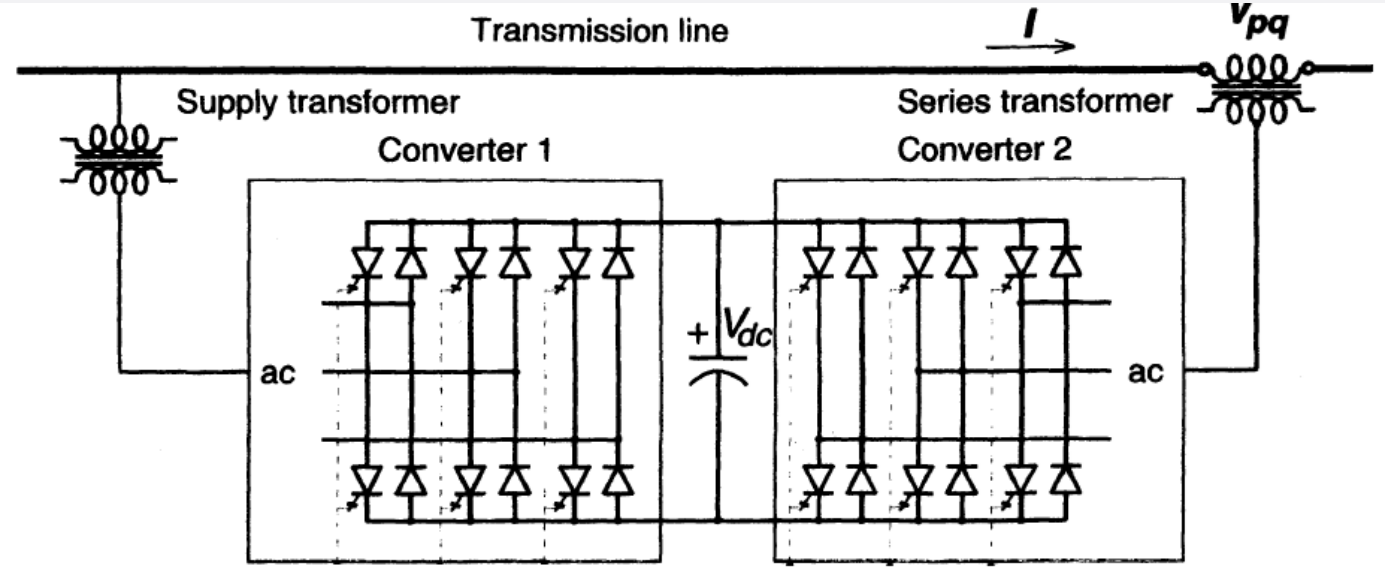


در مقایسه با منحنی مربوط به خازن سری،
مشخص است که در این حالت با تغییر V_q، محدوده‌ی کنترل گسترده‌تری برای توان خصوصاً برای δهای کوچک بدست می‌آید.



وجود ترانسفورماتور سری در مقایسه با $TCSC$ یک عیب
محسوب می‌شود. وجود این ترانسفورماتور علاوه بر افزایش هزینه، با اضافه کردن یک راکتانس اضافی، کارآیی $SSSC$ را کم می‌کند.

UPFC



مبدل سری وظیفه‌ی اصلی *UPFC* را که تزریـق

یک ولتاژ سری با دامنه و زاویه‌ی فاز قابل کنترل می‌باشد؛ برعهـده دارد.

وظیفه‌ی اصلی مبدل موازی تغذیه یا جـذب تقاضـای

توان اکتیو مورد نیاز مبدل سری می‌باشد که در لینک *DC* پدیدار شـده

دو مبدل، توان راکتیو مورد تقاضای ترمینال *AC* خود را به‌طور مستقل و بدون نیـاز بـه عناصر ذخیره کننده‌ی انرژی تولید می‌نمایند.

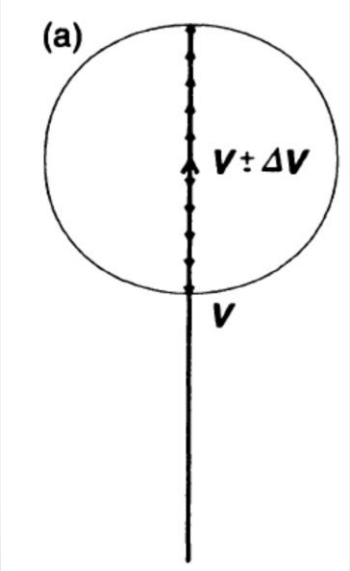
فرض نمایید که *UPFC* قـادر بـه تزریـق ولتـاژی بـا انـدازه‌ی قابـل کنتـرل در محدوده‌ی زیر باشد:

$$0 < V_{pq} < V_{pq}^{\max}$$

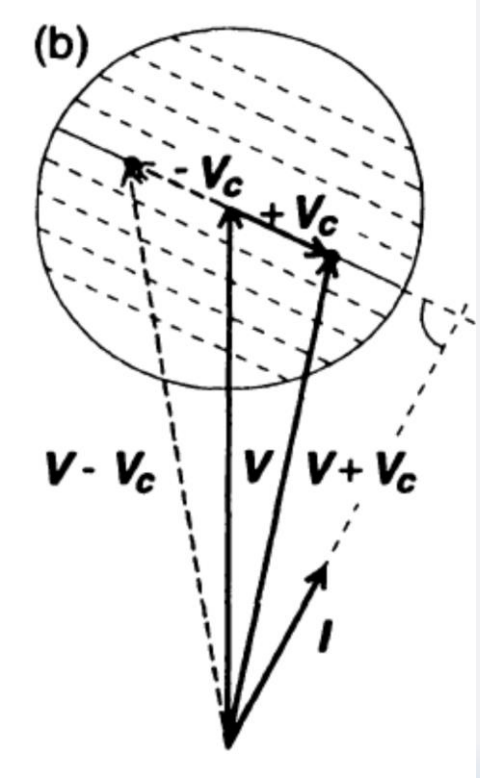
با قـرار دادن $V_{pq} = \pm\Delta V$ و نیز $P=0$

یک تنظیم کننده‌ی ولتاژ با تغییرات پیوسته حاصل شده است

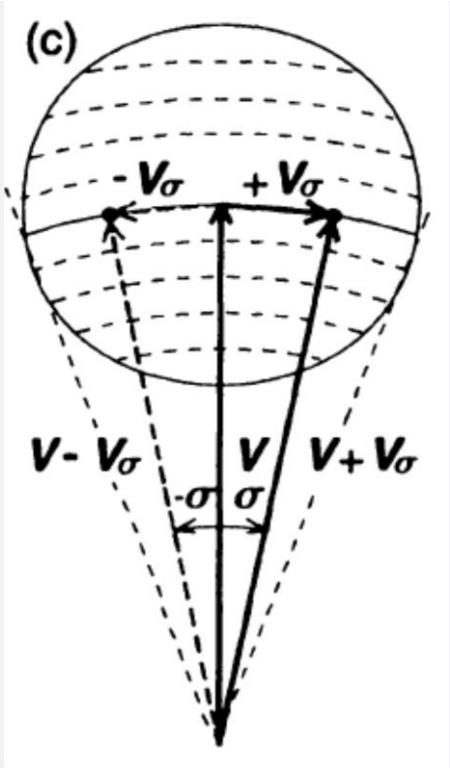
UPFC در این شرایط نقش یک تنظیم کننده‌ی طولی ولتاژ را ایفا می‌کند.



با تزریق $V_{pq}=Vc$ به‌طور عمود بر جریان خط انتقال یک جبـران‌کننده سری حاصل شده است که به لحاظ رفتاری شبیه یک خازن سری کنترل شده می‌باشد. توجه کنید که در این جا ولتاژ جبران‌سازی به‌طور مـستقل از جریـان خـط کنترل می‌شود،

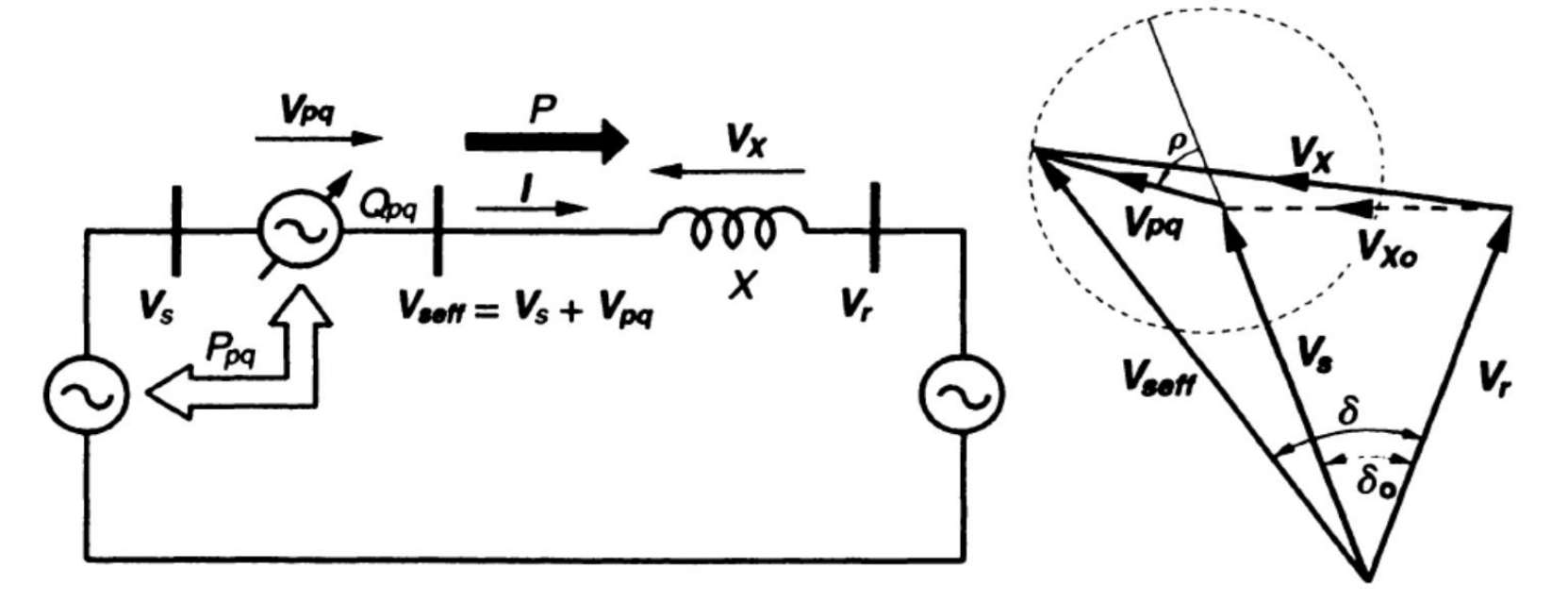


با تزریق $V_{pq}=V_{\alpha}$ به‌گونه‌ای که در اندازه ولتاژ خط انتقال تغییری حاصل نشود، یک تنظیم کننده عرضی ولتاژ حاصل شده است که به لحاظ رفتاری شبیه یک ترانسفورماتور جابه‌جاکننده فاز می‌باشد.



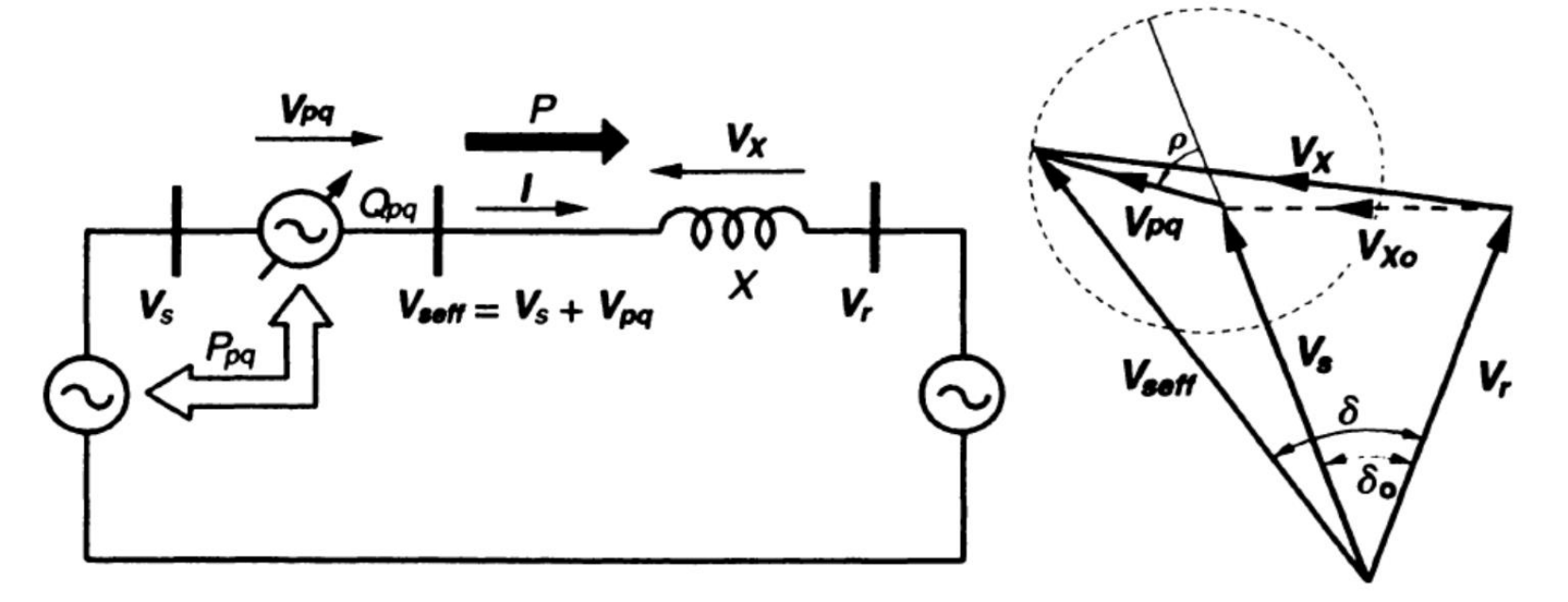
UPFC

با تزریق ولتاژ $V_{pq} = \Delta V + V_C + V_\alpha$ یک کنترل کننده‌ی توان چند تابعی حاصل شده است که به‌طور همزمان به تنظیم ولتاژ، جبران‌سازی سری و تغییر فاز می‌پردازد.



UPFC

با تزریق ولتاژ $V_{pq} = \Delta V + V_C + V_\alpha$ یک کنترل کننده‌ی توان چند تابعی حاصل شده است که به‌طور همزمان به تنظیم ولتاژ، جبران‌سازی سری و تغییر فاز می‌پردازد.



در سمت گیرنده داریم:

$$P - jQ = V_r\left(\frac{V_s + V_{pq} - V_r}{jX}\right)^* = V_r\left(\frac{V_s - V_r}{jX}\right)^* + \frac{V_r V_{pq}^*}{-jX}$$

$$V_S = V < \frac{\delta}{2} = V\left(Cos\frac{\delta}{2} + jSin\frac{\delta}{2}\right)$$

$$V_r = V < -\frac{\delta}{2} = V\left(Cos\frac{\delta}{2} - jSin\frac{\delta}{2}\right)$$

$$V_{pq} < \left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) = V_{Pq}\left(Cos\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right) + jSin\left(\frac{\delta}{2} + \rho\right)\right)$$

$$P = P_0(\delta) + P_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X}Sin\delta + \frac{VV_{pq}}{X}Sin(\delta + \rho)$$

$$Q = Q_{or}(\delta) + Q_{pq}(\rho) = \frac{V^2}{X}(1 - Cos\delta) - \frac{VV_{pq}}{X}Cos(\delta + \rho)$$

$$P_o(\delta) = \frac{V^2}{X}Sin\delta$$

$$Q_0(\delta) = \frac{V^2}{X}(1 - Cos\delta)$$

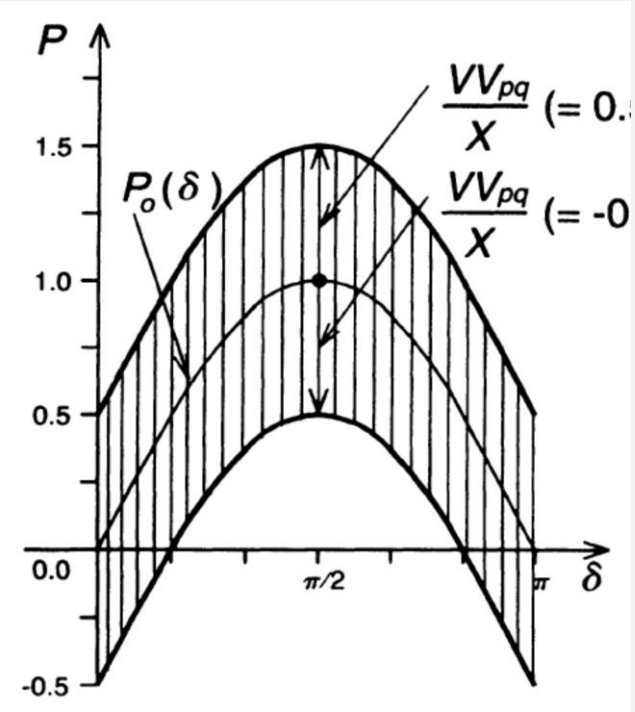
چون ρ بین صفر تا 2π قابل کنترل است، بنابراین $P_{pq}(\rho)$ بین $\frac{-VV_{pq}}{X}$ و $\frac{VV_{pq}}{X}$ مستقل از δ قابل کنترل است:

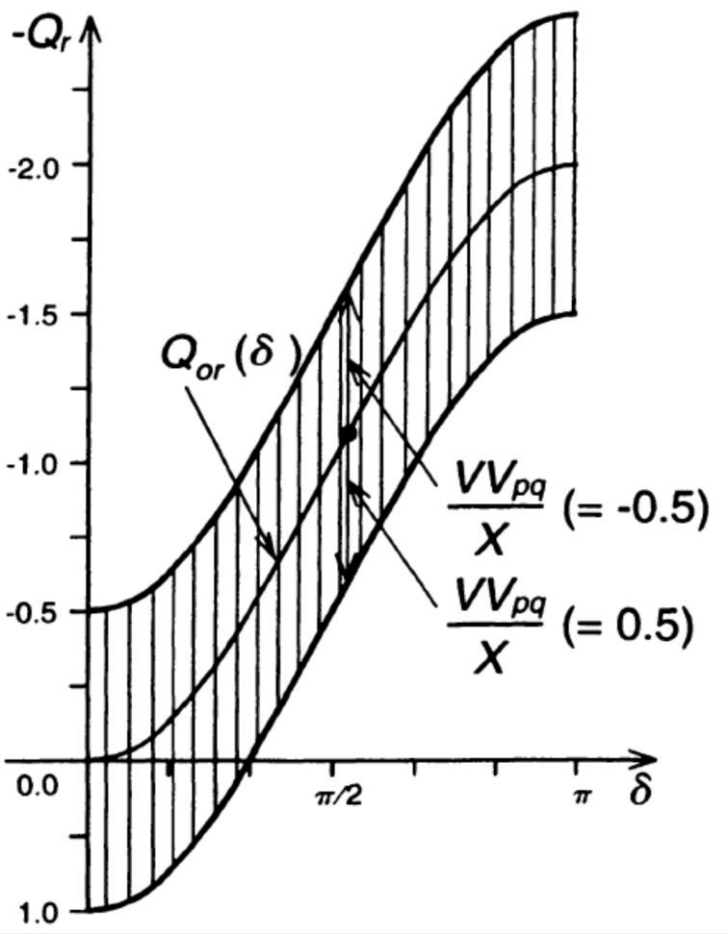
$$P_o(\delta)-\frac{VV_{pq}}{X}\le P\le P_0(\delta)+\frac{VV_{pq}}{X}$$

همچنین Q بین مقادیر زیر قابل کنترل است:

$$Q_0(\delta)-\frac{VV_{pq}}{X}\le Q\le Q_0(\delta)+\frac{VV_{pq}}{X}$$

UPFC


P
1.5
1.0
0.5
0.0
-0.5
$P_o(\delta)$
$\frac{VV_{pq}}{X}$ (= 0.
$\frac{VV_{pq}}{X}$ (= -0
π/2
π
δ


$-Q_r$
-2.0
-1.5
-1.0
-0.5
0.0
1.0
$Q_{or}(\delta)$
$\frac{VV_{pq}}{X}$ (= -0.5)
$\frac{VV_{pq}}{X}$ (= 0.5)
π/2
π
δ

کاربرد ادوات FACTS در بهبود کیفیت توان

بازیابنده دینامیکی ولتاژ

DYNAMIC VOLTAGE RESTORER (DVR)

بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

ادوات الکترونیک قدرت در انتقال: FACTS

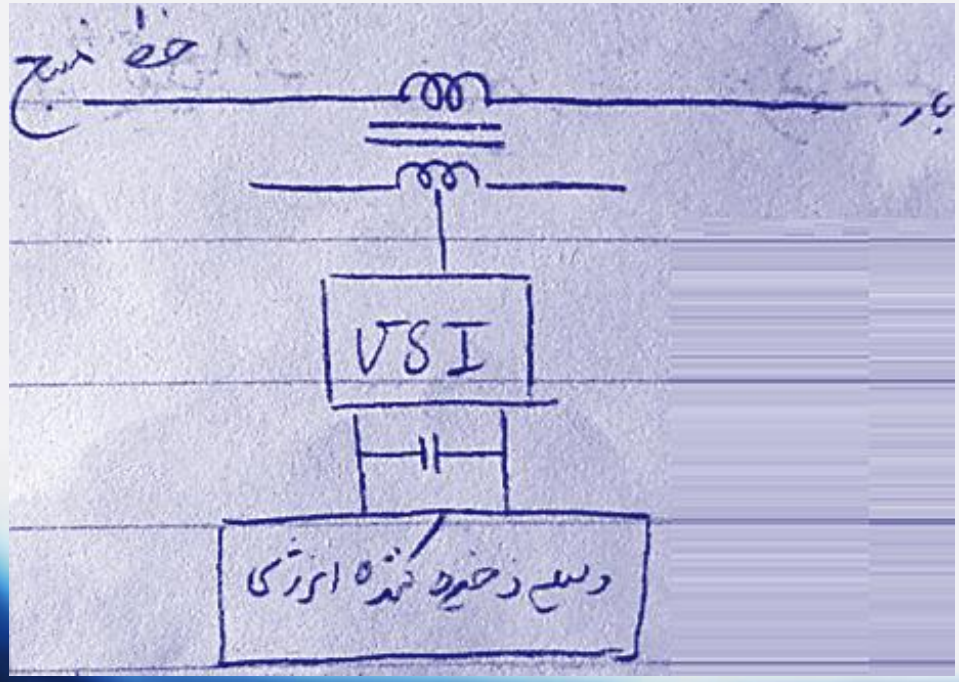
ادوات الکترونیک قدرت در توزیع: Costume Power

بهترین وسیله برای کمبود ولتاژ در بحث DVR :Costume Power

بهترین وسیله جهت استفاده در شرکت برق.

جمع یک ولتاژ بهنگام اضطراری وارد عمل می‌شود.

تشخیص کمبود ولتاژ ← تشخیص ویژگی آن ← تعیین مقدار ولتاژ مورد نیاز جهت سری شدن



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

DVR یک مبدل DC به AC است که ترمینال ورودی آن به یک منبع انرژی یا یک وسیله ذخیره کننده انرژی با ظرفیت مناسب متصل می‌شود. خروجی اینورتر بوسیله سه ترانسفورمر سری به شبکه متصل می‌شود و ولتاژ بارهای حساس را توسط تزریق سه ولتاژ تکفاز حفظ می‌کند. دامنه و فاز این ولتاژهای تزریق متناسب با نوع کمبود ولتاژ تغییر می‌کند و بصورت سنکرون با ولتاژ سیستم توزیع به شبکه تزریق می‌گردند. بنابراین DVR قادر به تولید یا جذب مستقل و قابل کنترل توان حقیقی و راکتیو در سیستم قدرت می‌باشد. توان راکتیو مبادله شده بین DVR و سیستم توزیع بدون نیاز به استفاده از عناصر راکتیو پسیو یعنی سلف و خازن تولید می‌شود. چون DVR در طی کمبود ولتاژ توان مورد نیاز بار را تأمین می‌کند لذا لازم است یک وسیله ذخیره کننده انرژی بطرف DC اینورتر منبع ولتاژ متصل گردد.

(DVR) Dynamic Voltage Restorer

عضو ذخیره‌کننده انرژی می‌تواند باطری یا چرخ طیار یا SMES و یا یک دیزل ژنراتور یا PV(منبع خورشیدی) و یا انواع منابع دیگر باشد.

DVRبه دلیل سوئیچ‌های سریعش، بسیار سریع است (حدود نیم سیکل)

سه ترانس داریم و در هر فاز بطور جداگانه توسط سه VSI کنترل صورت می گیرد.

می‌توان از یک پست دیگر یا از همان خط (کمبود رخ داده) بعنوان ورودی در طرف DC، VSI در نظر گرفت.

حسن DVR نسبت به UPS در دادن توان کمتر از نامی بهنگام کمبود است. یعنی همیشه علاوه بر Stand by بودن تنها میزان کمبود را جبران می کند.

بحث همفازی و سنکرون شدن با خط وجود دارد.

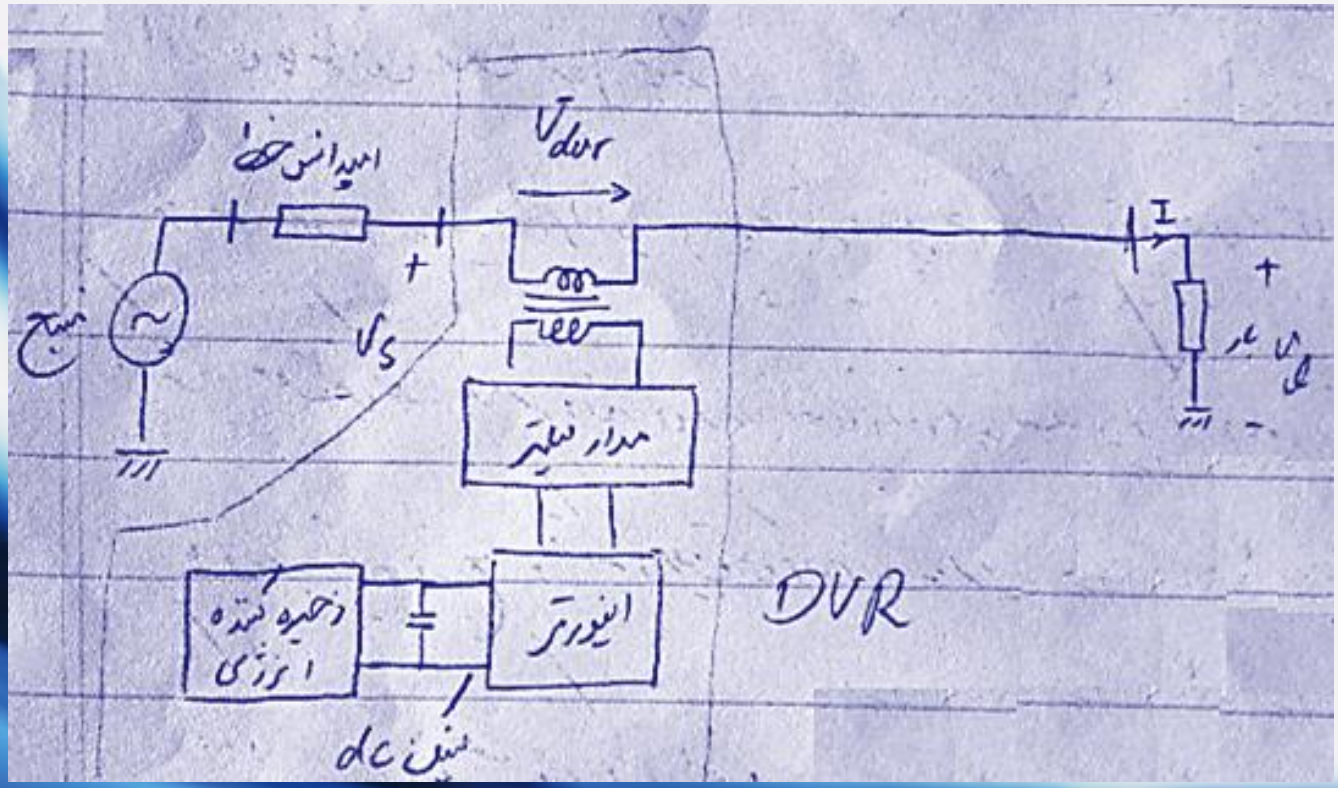
بحث اینکه اگر در شرایط نامتعادل توالی صفر را بخواهیم کنترل کنیم می‌توانیم از یک VSI سه فاز و اگر توالی صفر هم مهم باشد باید از سه تکفاز بهره بریم.

(DVR) Dynamic Voltage Restorer

ترسیم کاملتر DVR:

DVR فقط برای کمبود ولتاژ ساخته شده است.

اقتصادی بودن، سرعت پاسخ زیاد، روش‌های کنترل برای ولتاژ بطور دلخواه ← بهترین وسیله DVR است. ضمناً قطعی‌ها بسیار کمتر از کمبودها هستند پس DVR کفاف می‌دهد.



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

مقدار انرژی که باید در لینک DC ذخیره شود به عوامل زیر بستگی دارد:

- مگاولت آمپر بار نصب شده
- ضریب توان بار (هرچه به یک نزدیکتر، بیشتر)
- حداکثر افت ولتاژ در کمبود ولتاژ سه فاز
- مدت تداوم کمبود ولتاژ (بدترین حالت کمبود ولتاژ)
- ولتاژ نامی لینک DC توسط ولتاژ مجاز کلیدهای اینورتر انتخاب می‌شود.

بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

معیارهای طراحی مقدار نامی و عملکرد DVR:

- حداکثر MVA و ضریب توان بار
- حداکثر کمبود ولتاژ تکفاز و سه‌فاز که باید جبران شود
- حداکثر مدت تداوم کمبود ولتاژ سه فاز
- حداکثر افت ولتاژ مجاز DVR در دو سرش در عملکرد عادی
- امپدانس اتصال کوتاه ترانس‌های تزریق (ترانس سری با خط) چراکه افت در همین ترانس در طراحی مهم است.
- امپدانس اتصال کوتاه و نوع اتصال ترانس‌های توزیع
- این ترانس نباید به اشباع رود. چراکه رابطه خطی بین اولیه و ثانویه که از بین رود دچار مشکل می‌شویم.
- اتصال ترانس در انتخاب نوع DVR تأثیر دارد

بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

توان نامی هر فاز DVR برابر با حاصل ضرب حداکثر ولتاژ تزریقی در جریان اولیه ترانسفورمر تزریق می‌باشد. (جریان بار در حالت عادی)

$$E_{series} = KS_{load}\cos\varphi\Delta t = KP_{load}\Delta t$$

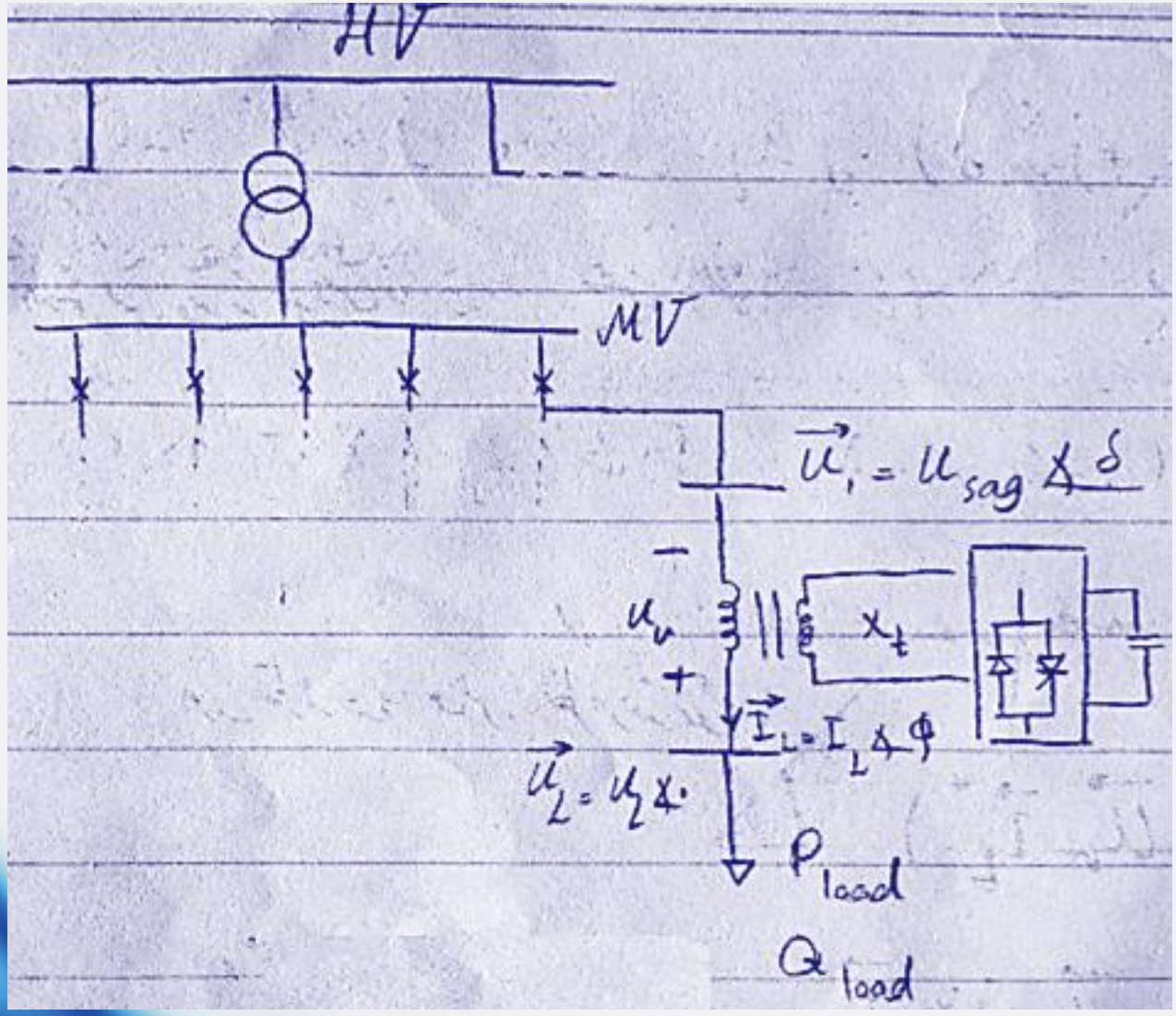
Δt : حداکثر مدتی که ممکن است کمبود رخ دهد

k: نسبت ولتاژی که قرار است تزریق و سری گردد نسبت به ولتاژ بار مثلاً اگر k=1، جبران ولتاژ بار بطور کامل (اما همیشه k کوچکتر از یک است در DVR و کاربردش $0.3 < k < 0.5$)

$$P_{load} = 8\ \text{MW}, \qquad k = 0.5\ , \qquad 100ms \rightarrow E_{series} = 400kJ$$

برای محاسبه‌ی انرژی تحویل شده توسط DVR در طی اختلالات ولتاژ، ارزیابی نوع کمبود ولتاژ مانند تعیین اندازه، مدت تداوم و پرش فاز نقش تعیین کننده‌ای دارد.

بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

$$\vec{U}_1 - jX_t\vec{I}_L + \vec{U}_v = \vec{U}_L = 1^{p.u.}\measuredangle 0$$

$$U_{sag}(\cos\delta + j\sin\delta) - jX_tI_L(\cos\varphi + j\sin\varphi) + \vec{U}_v = 1$$

بهنگام بروز کمبود ولتاژ یک پرش فاز نیز رخ می‌دهد (δ).

$$U_v = \left(1 - U_{sag}\cos\delta - X_LI_L\sin\varphi\right) + j(X_tI_L\cos\varphi - U_{sag}\sin\delta)$$

صرف نظر از تلفات خاص در نظر گرفته نشده:

$$P_{dc} = Re(\vec{U}_v\vec{I}_L^{\,*})$$

$$U_v = 1\measuredangle 0 - \vec{U}_1 + jX_t\vec{I}_L \rightarrow \vec{U}_v\vec{I}_L^{\,*} = (1\measuredangle 0)\vec{I}_L^{\,*} - \vec{U}_1\vec{I}_L^{\,*} + jX_t|I_L|^2$$

$$\rightarrow R_e\left(\vec{U}_v\vec{I}_L^{\,*}\right) = R_e\left[1\measuredangle 0\vec{I}_L^{\,*}\right] - Re\left[\vec{U}_1\vec{I}_L^{\,*}\right]$$

$$= I_L\cos\varphi - U_{sag}I_L\cos(\delta - \varphi) =$$

$$P_{load} \times \left[1 - \frac{U_{sag}\cos(\delta - \varphi)}{\cos\varphi}\right]$$

(اگر پرش فاز مثبت باشد (δ) وضع بدتر و اگر پرش فاز منفی باشد وضع بهتر است نسبت به δ برابر با صفر)

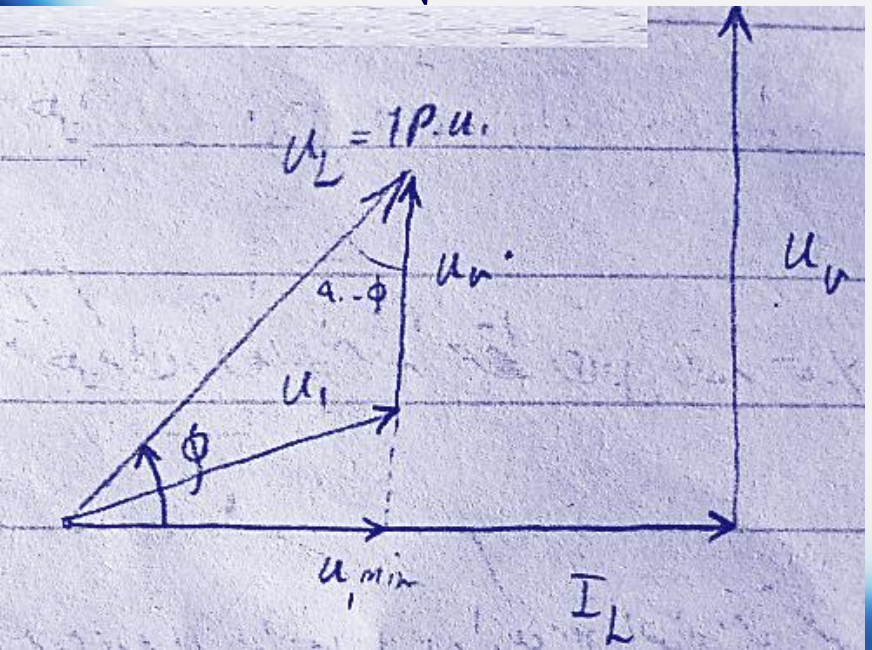
بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

استفاده بصورت جبران راکتیو (بدون ذخیره کننده انرژی) یعنی تا چه میزان می‌توان بدون وجود عنصر ذخیره‌کننده، جبران ولتاژ کرد بسته به ضریب توان بار دارد.

$$\left|U_1^{min}\right| = \cos\varphi\,|U_L|$$

اگر ولتاژ تزریقی به مقدار $\left|V_{inj}^{max}\right|$ محدود شود، حداقل ولتاژ منبع که می‌تواند تا ولتاژ بار V_{load} افزایش یابد برابر است با:

$$\left|U_1^{min}\right| = \sqrt{|U_L|^2 - 2|U_L|\left|V_{inj}^{max}\right|\sin\varphi + \left|V_{inj}^{max}\right|^2}$$

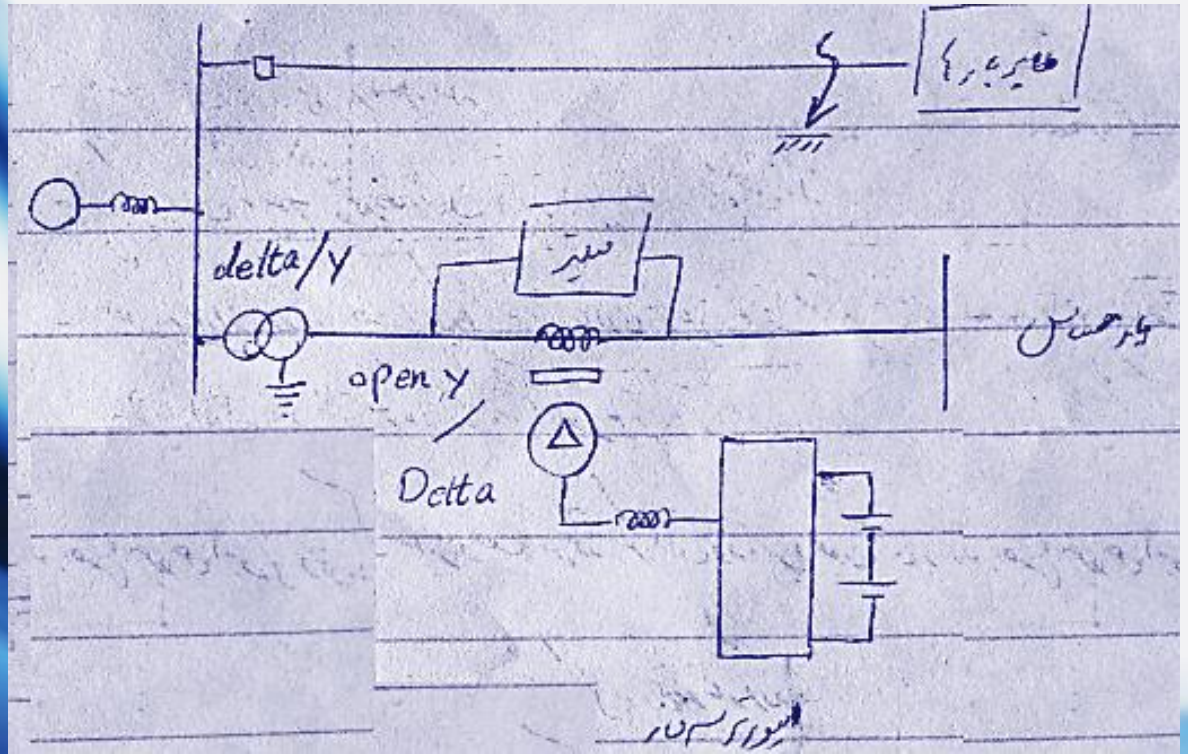


بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

ترانسفورمرهای تزریق:اگر اتصال در طرف اینورتر ستاره یا مثلث باشد به تزریق کردن یا نکردن مؤلفه صفر دخیل است.

چون در این طرف مؤلفه‌ی صفر حاصل از خطای فیدر دیگر جاری نمی‌شود پس برای DVR تنها به تزریق توالی مثبت و منفی نیاز است و می‌توان Δ بست مثل شکل و این امر در تزریق ولتاژ ($\sqrt{3}$ برابر) مؤثر است.

پس هرگاه نیاز به تزریق صفر نداریم بهتر است که اتصال مثلث بکار بریم برای استفاده بهتر و تزریق ولتاژ بیشتر.



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

فیلتر پسیو:
DVR از یک فیلتر تنظیم شده روی فرکانس کلیدزنی استفاده می‌کند تا هارمونیک‌های تولید شده بوسیله ی اینورتر PWM را حذف کرده و مؤلفه اصلی ولتاژ خروجی اینورتر استخراج گردد.
(فیلتر هم می‌تواند در طرف اینورتر و یا در طرف سیستم مثل شکل باشد.)
مزایای قرارگیری در طرف ولتاژ کم یا اینورتر:
ولتاژ پایین‌تر برای طراحی فیلتر
نزدیکتر بودن به منبع تولید هارمونیک و بیشترین تأثیر در کاهش آن
جلوگیری از ورود هارمونیک‌های مرتبه بالای جریان به ترانسفورمر تزریق ← این ترانس باید نسبت خطی‌اش حفظ گردد پس نباید اشباع گردد
کاهش اندازه ی ولتاژ تحریک روی ترانسفورمر تزریق
عیب آن: سلف فیلتر موجب می‌شود که افت ولتاژ و شیفت فاز در مؤلفه ی اصلی خروجی اینورتر بوجود آید و باعث عدم بازیابی کامل ولتاژ بار گردد.
ذخیره کننده انرژی: در نبود آن تنها بارهای با ضریب توان کم با sag کم قابل جبران است.
باطری‌های سرب–اسید – چرخ طیار – SMES –ابر خازن

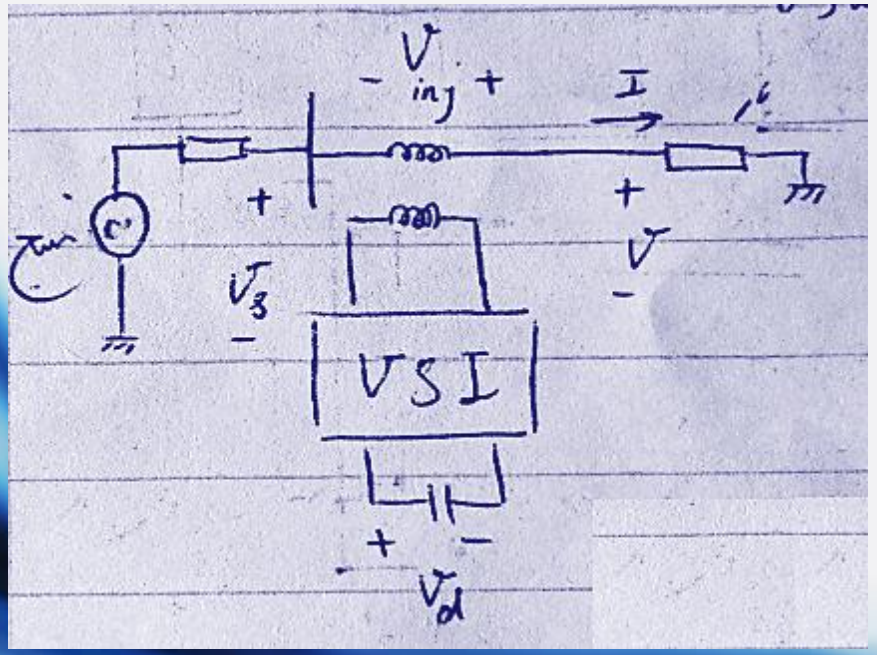
بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

مقایسه روش های جبران sag، Swell: سه روش بطور کلی:

In-Phase: ولتاژ تزریقی همفاز با V_S بعد از اختلال است بدون توجه به اینکه V_S قبل از اختلال چه بوده است.

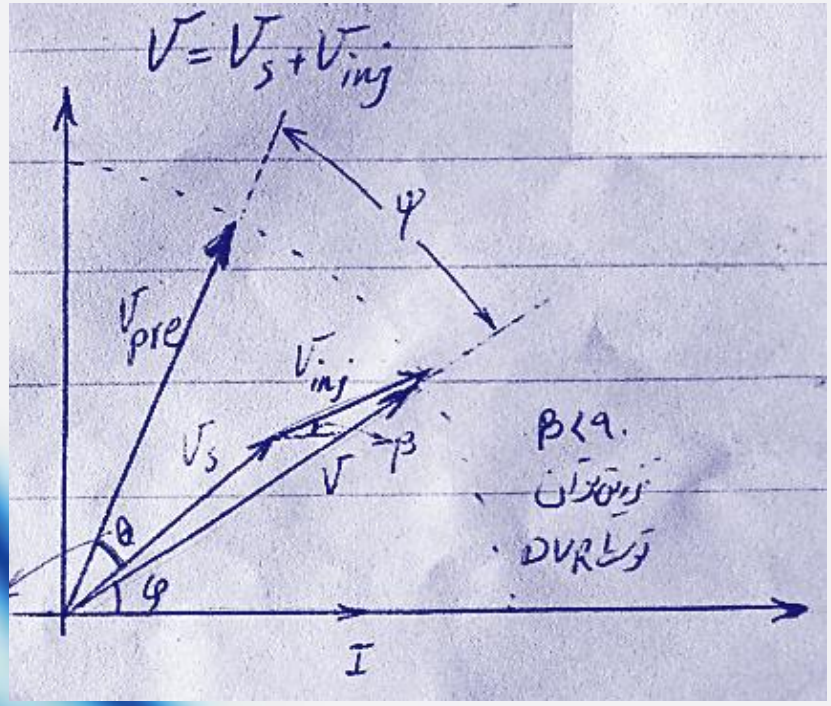
Pre-sag:ولتاژ تزریقی به گونه‌ای تزریق می‌شود که به V_S قبل از اختلال از نظر اندازه و فاز برسیم پس از جمع شدنش با V_S کنونی. (V_S و V_L قبل از اختلال برابرند)

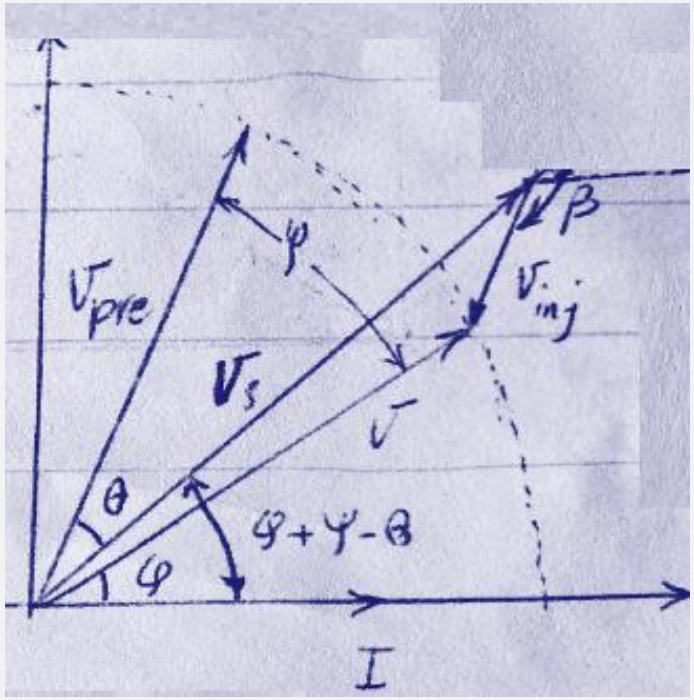
Energy-Saving :در این روش تبادل انرژی حقیقی کنترل می‌شود و هدف این است. بنابراین صرف نظر از اینکه فاز چگونه بوده تنها برای رساندن دامنه به مقدار قبل از اختلال حداقل انرژی را وارد سیستم می کند.



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

در اشکال فوق جریان به‌عنوان فازور مرجع است. θ برای حالتی که V_S عقب‌تر از V_{pre} است مثبت فرض می‌شود. φ زاویه ضریب توان بار است و فرض که بار ضریب توان ثابت دارد.





بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

در حالت متعادل تمامی مباحث فوق و زیر است:

$$P_{inj} = 3|V||I|\cos\varphi - 3|V_s||I|\cos(\varphi + \psi - \theta)$$

$$P_{inj} = 3|I|[|V|\cos\varphi - |V_s|\cos(\varphi + \psi - \theta)]$$

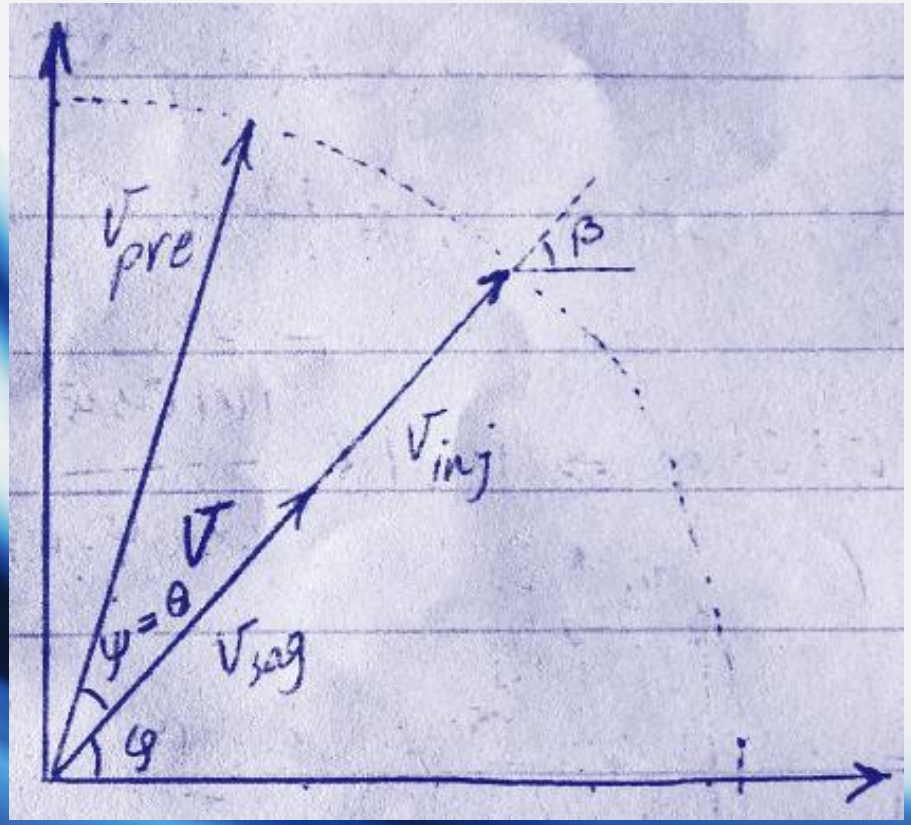
$$P_{inj} = 3\left|V_{inj}\right||I|\cos\beta$$

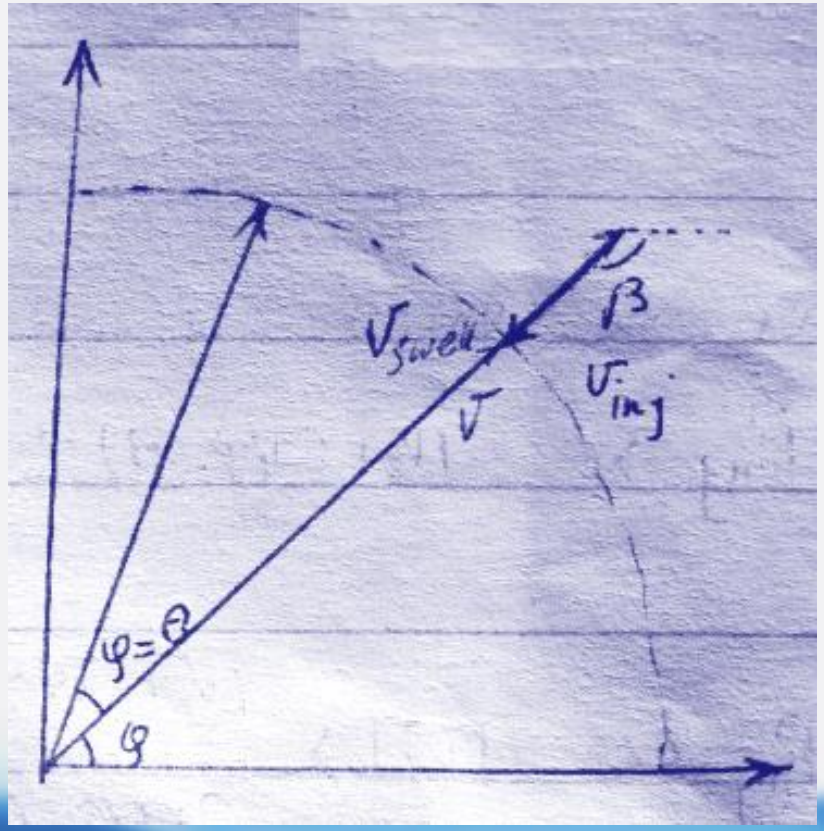
بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

جبران In-Phase :

$$P_{inj} = 3[|V|\cos\varphi - |V_s|\cos(\varphi)]|I| \rightarrow \quad P_{inj} > 0 \quad |V| > |V_s| \quad sag$$
$$\rightarrow \quad P_{inj} < 0 \quad |V| < |V_s| \quad swell$$

در این حالت ولتاژ مرجع را برای کنترل داریم چراکه توسط PLL فاز درآمده و امتداد معلوم است و مقدارش نیز معلوم است پس بردار جبران معین است. در حالت sag اگر در طرف دیگر VSI یک خازن باشد به دلیل شارژ اگر زمان sag زیاد باشد باید حد ولتاژ خازن رعایت گردد.





بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

در جبران Pre-sag ولتاژ تزریقی V_{inj} بگونه‌ای است که دقیق به V_{pre} برسیم.

در این حالت $\psi = 0$ است و بنابراین خواهیم داشت:

$$P_{inj} = 3|I|[|V|\cos\varphi - |V_s|\cos(\varphi - \theta)]$$

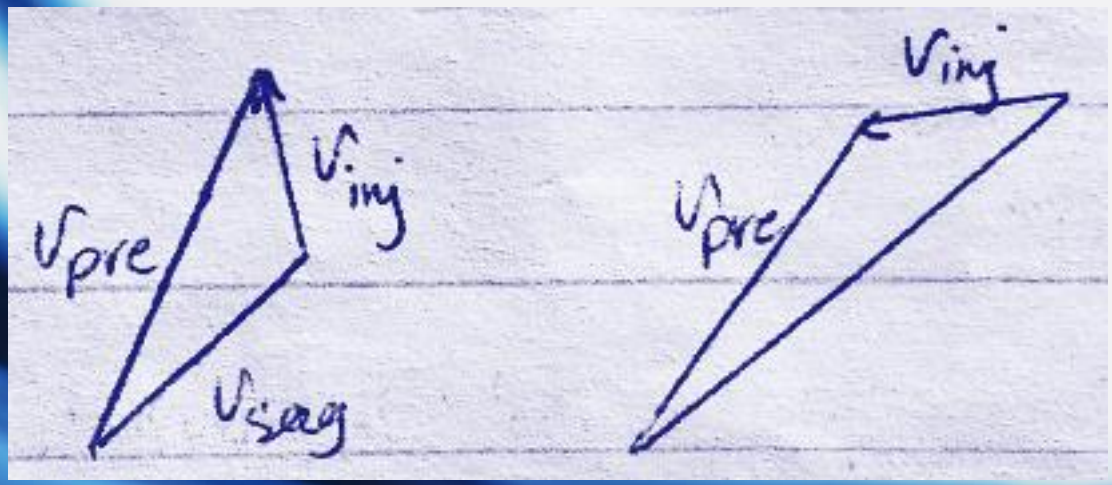
سمت چپ:

$$P_{inj} > 0 \qquad |V_s|\cos(\varphi - \theta) < |V|\cos\varphi \;\rightarrow\; |V_s| < \frac{|V|\cos\varphi}{\cos(\varphi - \theta)}$$

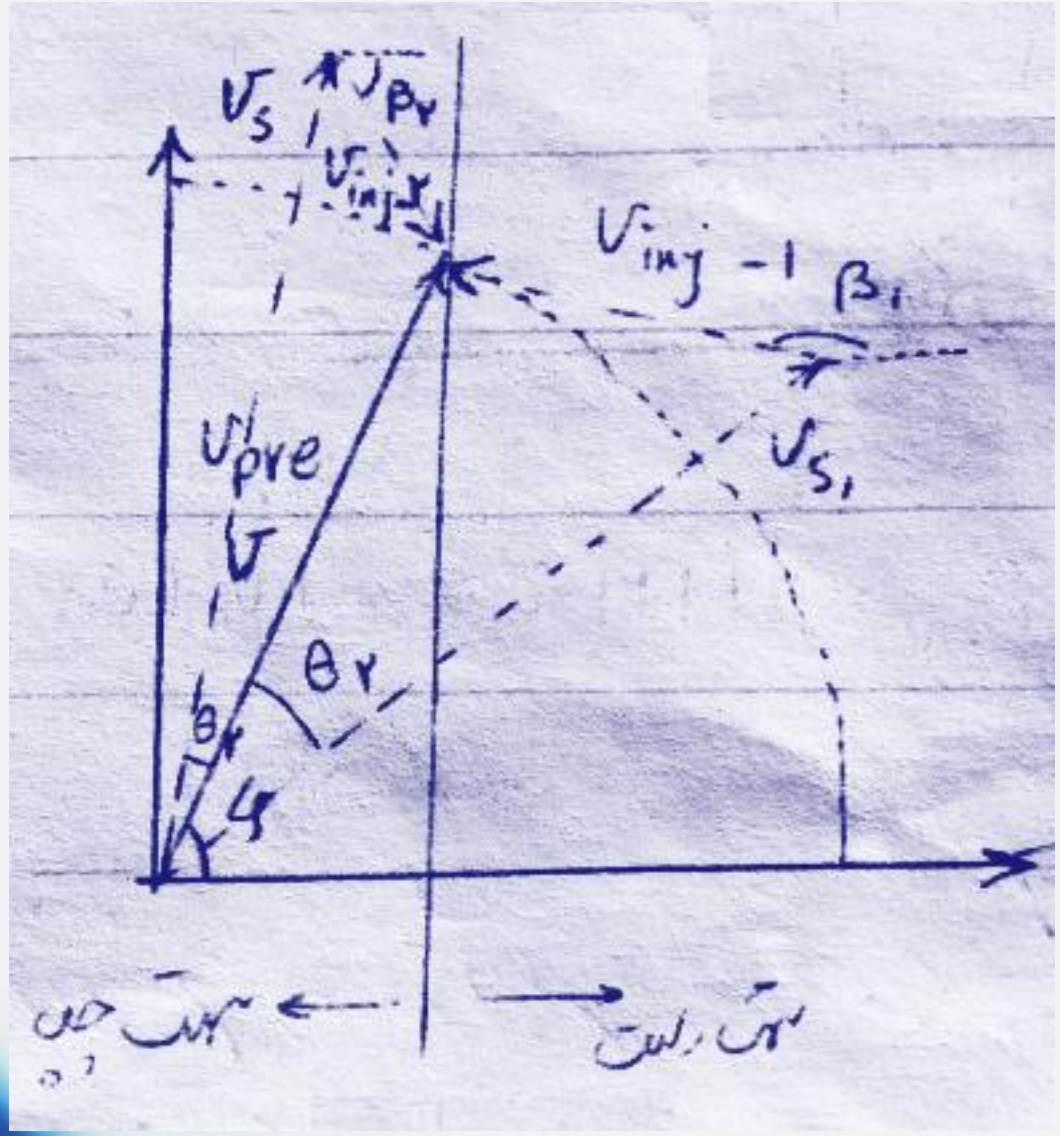
سمت راست:

$$P_{inj} < 0 \qquad |V_s| > \frac{|V|\cos\varphi}{\cos(\varphi - \theta)}$$

چه برای sag و چه برای swell صادق است. بنابراین برای هر دو، هر دو شرایط جذب و تزریق توان می‌تواند فراهم گردد.



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)



بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

جبران با ذخیره انرژی (Energy-Saving):

با حداقل کردن مقدار زیر در sag، می‌توان انرژی را حداقل کرد:

$|V_s|\cos(\varphi+\psi-\theta) \rightarrow |V|\cos\varphi$ برود به سمت

$$\cos(\varphi+\psi-\theta)=1 \rightarrow \varphi+\psi-\theta=0 \rightarrow \psi_{min}=\theta-\varphi$$

$$P_{min}=3(|V|\cos\varphi-|V_s|)|I|$$

در swell رابطه ی $|V|\cos\varphi<|V_s|$ برقرار است و $P_{inj}<0$ است و چون رابطه (**) علامتش عوض می‌شود بنابراین با شرط فوق P_{max} را در حالت جذب توسط DVR داریم که به جهت شارژ خازن خطرناک است. بنابراین در حالت swell، ψ_{min} را انتخاب نمی‌کنیم. در حالت swell انتخاب می کنیم:

$$P_{inj}=0 \rightarrow \psi_0=\theta-\varphi-\cos^{-1}\left(\frac{|V|\cos\varphi}{|V_s|}\right)$$

بازیابنده دینامیکی ولتاژ Dynamic Voltage Restorer (DVR)

چون در swell این رابطه همیشه جواب دارد پس همیشه می‌توان $P_{inj} = 0$ داشت اما در sag نمی‌توان $P_{inj} = 0$ داشت و تنها وقتی که φ کوچک نباشد می‌توان این کار را کرد. بنابراین در این روش جبران چون ψدست ماست دوحالت داریم:

$P_{inj} < 0$ باشد. در این حالت اگر خازن کوچک باشد ابتدا ψ_{min} تنظیم کرده تا شارژ شود و سپس ψ_0 را اعمال می کنیم.

$P_{inj} > 0$در این حالت ψ_{min} را برقرار می کنیم.