

## فصل ششم

### کنترل توان راکتیو و ولتاژ

## Reactive Power & Voltage Control

در سیستم دوباس زیر افت ولتاژ مابین آنها بصورت زیر نوشته می‌شود :

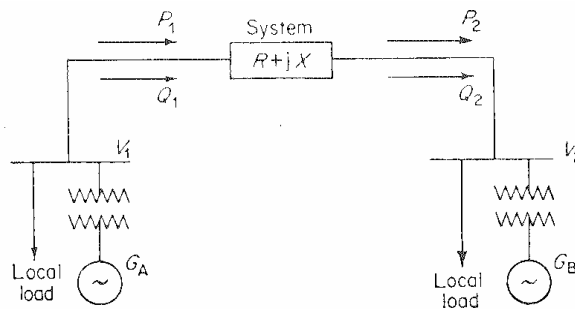
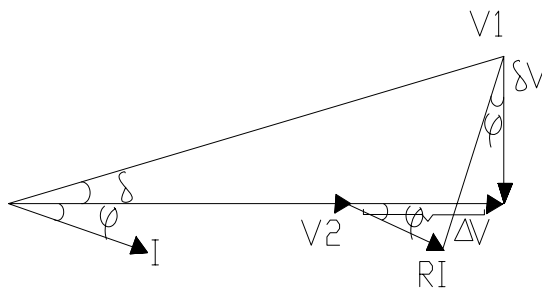


Figure 4.7 Two generating stations linked by an interconnector of impedance  $(R + jX)\Omega$ . The rotor of A is in phase advance of B and  $V_1 > V_2$ .



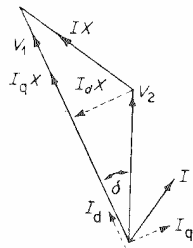
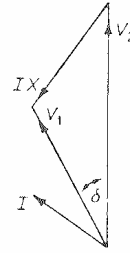


Figure 5.1 Phasor diagram for system shown in Figure 4.7;  $V_1 > V_2$ . Resistance of line zero, inductive reactance  $X$  ohms.  $I_d$  and  $I_q$  in-phase and quadrature components of the current  $I$ .



Phasor diagram for system in Figure 4.7.  $V_2 > V_1$ .

$$V_1^2 = (V_2 + \Delta V)^2 + \delta V^2 = (V + RI \cos \varphi + I \sin \varphi)^2 + (XI \cos \varphi - RI \sin \varphi)^2$$

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2}, \quad \delta V = \frac{XP - RQ}{V_2}$$

$$\text{If } \delta V \ll V_2 + \Delta V \text{ then } V_1^2 = \left( V_2 + \frac{RP + XQ}{V_2} \right)^2$$

$$\text{and } V_1 - V_2 = \frac{RP + XQ}{V_2} = \Delta V$$

بنابراین اختلاف ولتاژ بین دوشین  $V_2, V_1$  توسط رابطه تقریبی  $\Delta V$  بیان می شود.

$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V_2}$$

$$Q = \frac{V_2 \Delta V}{X} - \frac{R}{X} P$$

اگر  $X, V_2$  ثابت باشند و رابطه بین قدرت اکتیو و راکتیو

$$Q = K - \frac{R}{X} P$$

$$Q' = K - \frac{R}{X} P' \Rightarrow Q - Q' = \frac{R}{X} (P' - P)$$

تغییرات در توان اکتیو باعث تغییرات در توان راکتیو می شود. اما مقدار  $R$  بخاطر بزرگ بودن  $X$  مقدار کوچکی است و می توان در قسمت دوم صرف نظر کرد. پس می توان نتیجه گرفت که تغییرات اندازه ولتاژ بیشتر در ارتباط با تغییرات توان راکتیو است.

$$Q \propto V_2$$

$$\left. \begin{array}{l} > 0 \\ < 0 \end{array} \right\} \text{در مولد}$$

$$\left. \begin{array}{l} < 0 \\ > 0 \end{array} \right\} \text{در بار (ترانسفورماتورها، خطوط، کابلها)}$$

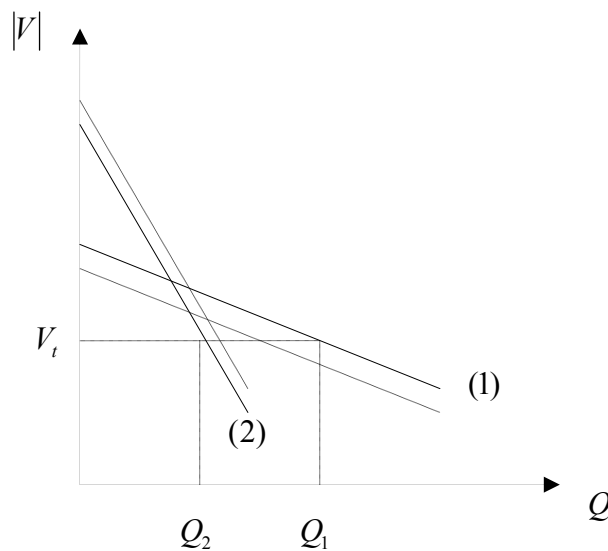
ارتباط بین این دو کانال تولید مشابه هم هستند این دو موضوع را موضوع دوگانه گویند.

dual concept applying to  $P'$  V.S.  $f$  and  $|V|$  V. S.  $Var$

در بحث پارالل بار بین دو ژنراتور در اینجا نیز قابل بحث است.

$$\left. \begin{array}{l} P, F \\ Q, V \end{array} \right\} \text{رابطه دوگانه}$$

برای کم کردن قدرت واحد ۱ و زیاد کردن قدرت واحد ۲ با کم کردن قدرت واحد ۱ برای ثابت بودن فرکانس بایستی مشخصه آن به پائین آمده و به یک  $V$  دیگر افت پیدا خواهد کرد. برای رساندن  $V$  به  $V_t$  بایستی تحریک ژنراتور ۲ را زیاد کنیم که با اینکار مشخصه ۲ به بالا می‌رود.



میزان قدرت راکتیو در ژنراتور بوسیله نسبت اتصال کوتاه (عکس راکتانس سنکرون) مشخص می‌شود. در اینصورت میزان جذب یا تولید قدرت راکتیو در ژنراتور بستگی به پیش فاز (زیرتحریک Under excited) یا پس‌فاز (فوق تحریک Over excited) بودن ژنراتور دارد. برای یک ژنراتور ۲۰۰MW و ضریب قدرت ۰/۸۵ با میزان پایدار ۱۰ درصد ظرفیت قدرت راکتیو برابر ۴۵MVAR است.

مقدار قدرت راکتیو جذب شده در بار نیز به میزان  $I^2X$  ارتباط دارد.

در برخی از بارها که در آنها خازن وجود دارد (در خطوط طویل) تبدیل به تولیدکننده قدرت راکتیو می‌شوند. در ترانسفورماتورها اغلب قدرت راکتیو جذب می‌شود.

راکتانس ترانسفورماتور  $X_{T(pu)}$

قدرت تولید توان نامی  $3VI_{rated}$

$$\text{راکتانس (اهم)} = X_{Base} X_{T(pu)} = \frac{V}{I_{rated}} X_T$$

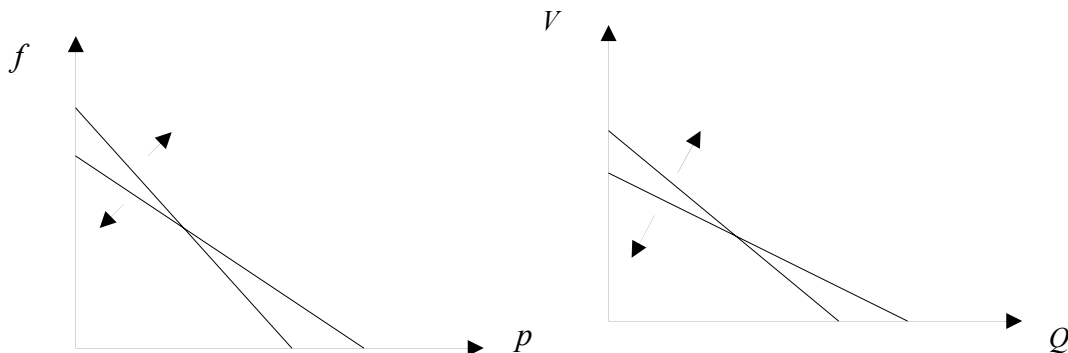
$$\text{میزان قدرت جذب شده} = 3I_{rated}^2 \frac{VX_T}{I_{rated}} = 3 \frac{I^2 V^2}{(IV)_{rated}} X_T = \frac{(VA_{load})^2}{VA_{rated}} X_T$$

کابل‌ها با ظرفیت بالا به مثابه ژنراتورهای تولید قدرت راکتیو هستند.

در یک کابل  $270KV$  و  $240MVA$  مقدار قدرت راکتیو تولیدی  $\frac{MVAR}{Km} = 7/5 - 6/25$  است.

$$\begin{array}{ll} 1/9 & 132 KV \\ 0/125 & 33 KV \end{array}$$

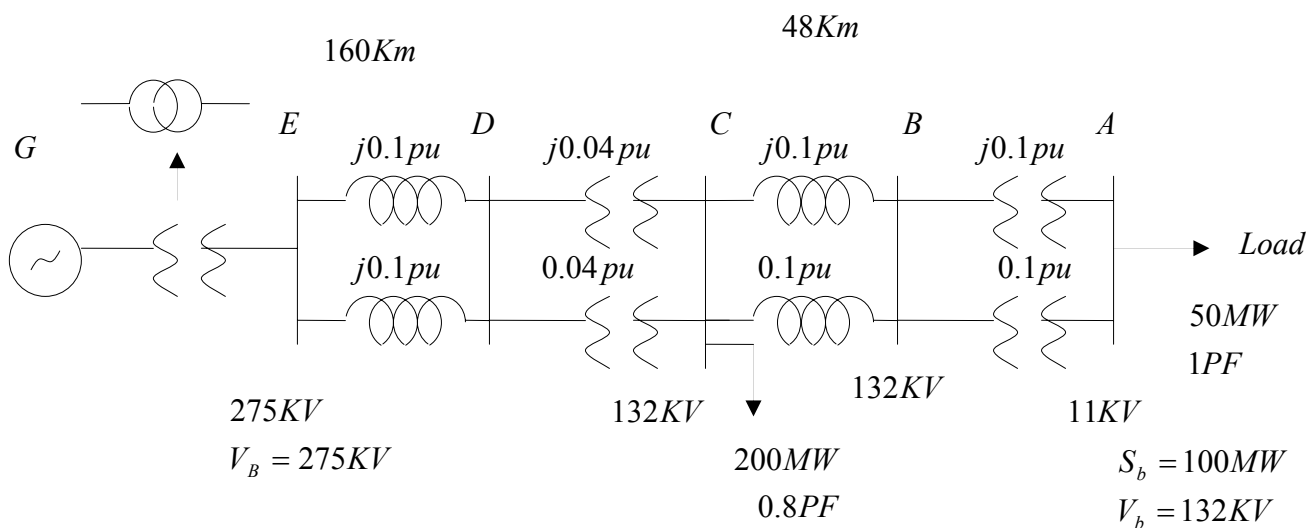
P	V.S	f	V	V.S	Var
۱- کنترل سرعت محرکه اصلی			۱- کنترل میدان تحریک ژنراتور		
۲- فرکانس			۲- ولتاژ ترمینال		
۳- $P_L = P_1 + P_2$			۳- $Q_L = Q_1 + Q_2$		
۴- $f$ V.S P			۴- $ V $ V.S Q		
۵- بوسیله افزایش سرعت نیروی محرکه فرکانس تنظیم $f \propto P$			۵- بوسیله افزایش تحریک یکی از ژنراتورها ولتاژ ترمینال تنظیم $Q - V \propto AVR$		
۶- برای کنترل فرکانس کنترل نیروی محرکه دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل می‌کنند.			۶- برای کنترل ولتاژ ترمینال تحریک دو نیروگاه بصورت عکس هم عمل می‌کنند.		



پس بین این دو سیستم يك دوگانگي دیده مي‌شود. پس ژنراتور خودش يك عامل جذب براي کنترل بار است فقط عيب آن اين است که قابليت و ظرفيت آن بحد کافي نيست و نمي‌توان تمامی بار شبکه را بوسیله ژنراتور تنظيم نماييم.

المانهاي موجود در شبکه ترانسفورمرها که همواره قدرت راکتیو جذب مي‌کنند خطوط انتقال مخصوصاً خطوط انتقال طولاني و کابل‌ها که قدرت راکتیو ايجاد مي‌کنند مخصوصاً در بار که ژنراتورها خود مي‌توانند توليد و يا جذب قدرت راکتیو کنند و يا موتورهاي سنکرون بعنوان کمپانزاتور که با دست زدن به تحريك آنها مي‌شود که آنرا بعنوان مولد قدرت راکتیو بکار برد.

مثال : يك بار با ظرفيت 50MW با ضريب قدرت واحد در شين A در شبکه زیر مفروض است. در این شبکه براي تنظيم ولتاژ چقدر قدرت راکتیو احتیاج است تا ژنراتور توليد نمايد که باید آیا به تنهائي کافي است یا نه؟



$$V \propto Q \begin{cases} Q_G \\ Q_C \\ Q_L \end{cases}$$

از انتهاي خط شروع کرده و جلو مي‌رويم و مقدار قدرت اکتیو و راکتیو موردنیاز را در بارها بدست آوريم.

در شين A  $P = 0.5 Pu$      $Q = 0$

در شين B  $X_{AB} = X_{BC} = 0.05$

$X_{CA} = 0.05 + 0.05 = 0.1$

$$I^2 X_{CA} = ?$$

افت قدرت راکتیو خط (فقط سلفی است)

$$|I|^2 = \frac{Q^2 + P^2}{V_2} = \frac{0^2 + 0.5^2}{1}$$

$$I^2 X_{CA} = \frac{0.5^2}{1} \times 0.025 = Q_{CA}$$

$$\cos \varphi = 0.8 \rightarrow Q = \tan \varphi \times P = 1.5$$

$$P_C = 2 + 0.5 = 2.5 \text{ pu}$$

$$Q_c = 0.025 + 1.5 = 1.525 \quad \text{در شین C}$$

$$X_{EC} = X_{ED} + X_{DC} = 0.05 + 0.02 = 0.07$$

$$I^2 X_{EC} = \frac{1.525^2 + 2.5^2}{1} \times 0.07 = 0.6$$

اگر از تلفات ترانس و ژنراتور صرفنظر شود

$$\begin{cases} P_E = P_{EC} + P_C \\ P = 2.5 \text{ pu} \end{cases} \quad \begin{cases} Q_E = Q_{EC} + Q_C \\ Q = 1.525 + .6 = 2.125 \text{ pu} \end{cases} \rightarrow \cos \varphi = .7619$$

حال باید دید ژنراتور تحت این PF و قدرت می تواند ظرفیت تولید داشته باشد یا نه؟

رابطه بین ولتاژ و قدرت اکتیو و راکتیو در یک نقطه (باس)

در یک نقطه ولتاژ تابع قدرت اکتیو و راکتیو است.

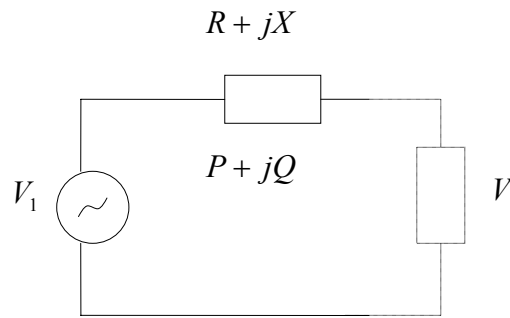
$$V = f(P, Q)$$

$$dV = \frac{\partial V}{\partial P} dP + \frac{\partial V}{\partial Q} dQ$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial P} = 1 \quad \frac{\partial Q}{\partial V} \cdot \frac{\partial V}{\partial Q} = 1$$

$$(1) \quad dV = \frac{dP}{\frac{\partial P}{\partial V}} + \frac{dQ}{\frac{\partial Q}{\partial V}}$$

تغییرات ولتاژ در یک نقطه بستگی به تغییرات قدرت اکتیو و راکتیو نسبت به ولتاژ دارد که این تغییرات می تواند قبلاً مشخص شود. برای پیدا کردن این تغییرات در یک مدار ساده بصورت زیر اقدام می شود.



$$\Delta V = \frac{RP + XQ}{V}$$

$$(V_1 - V) V = RP + XQ$$

حال اگر  $V_1$  ثابت باشد  $V$  بستگی به مقدار قدرت انتقالی اکتیو و راکتیو دارد. این معادله را نسبت به  $P$  حل می‌کنیم :

$$P = \frac{(V_1 - V)V}{R} - \frac{XQ}{R}$$

$$Q = \frac{(V_1 - V)V}{X} - \frac{RP}{X}$$

$$\frac{\partial P}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{R}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

با جایگزین کردن این دو معادله در بالا داریم : (۱)

$$dV = \frac{dP.R + dQ.X}{V_1 - 2V}$$

هرگاه  $dV = 0$  ثابت باشند  $V_1, dV$

$$R dP + X dQ = 0 \rightarrow dQ = -\frac{R}{X} dP$$

تغییرات قدرت اکتیو نسبت به تغییرات قدرت اکتیو

$$V \propto Q \propto P \propto f$$

ضریب سفتی یا stiffness یک ناحیه که قبلاً اشاره شد :

$$\frac{\Delta P}{\Delta f} = K$$

هرگاه  $\frac{\Delta Q}{\Delta V} \propto \frac{V}{X}$  برای یک شبکه یا یک باس در دست داشته باشیم می‌توان از روی این نسبت مقدار قدرت

راکتیو تزریق شده به آن منطقه برای ترمیم افت و ولتاژ مشخص ساخت و از روی آزمایش بدست می‌آید.

در حالتی می‌دانیم که وقتی قدرت راکتیو مثلاً  $Q_{before}$  و ولتاژ در آن نقطه  $V_{before}$  (قبل از موقعیکه به آن نقطه

قدرت راکتیو تزریق کنیم حالت معمولی before)

حال یک قدرت راکتیو معلوم به آن نقطه تزریق می‌کنیم و می‌توان ولتاژ را در آن نقطه اندازه گرفت.

$$Q_{after} \frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{Q_{after} - Q_{before}}{V_{after} - V_{before}}$$

تغییرات  $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$  نیز قبلاً بدست آمده است هرچه راکتانس آن نقطه کمتر باشد این نسبت بزرگتر خواهد بود. وقتی چند خط در يك باس تلاقی کنند X كوچك بوده و این نسبت بزرگ خواهد بود پس این نسبت بستگی به شرایط شبکه دارد و مقدار آن بطور متوسط  $10-15 \frac{MVar}{1KV}$  می باشد.

مثال : اگر افت طبیعی در يك نقطه بدون تزریق وار مصنوعی 5KV باشد و تغییرات  $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$  در آن نقطه برابر  $15 \frac{KVAR}{KV}$  باشد برای ترمیم 5KV افت ولتاژ چقدر قدرت راکتیو بایستی بدان نقطه تزریق گردد؟

**نتیجه مهم :**  $\frac{\Delta Q}{\Delta V}$  برابر شدت جریان اتصالی در همان نقطه (باس) است.

$$\frac{\Delta Q}{\Delta V} = \frac{V_1 - 2V}{X}$$

حال اگر شکل قبل ولتاژ خروجی اتصال کوتاه شود  $V = 0$  از روی مدار مشخص است که

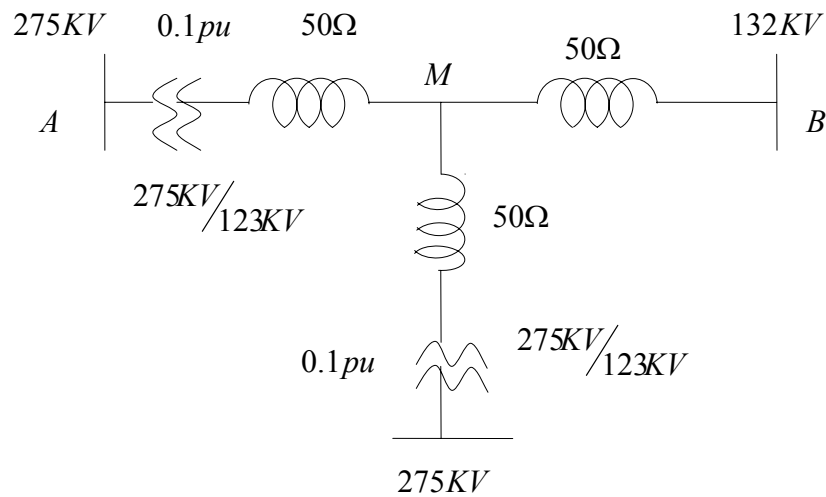
$$I_{S.C} = \frac{V_1}{X} [A] \quad R \ll X$$

در حالت بی باری که مدار باز است.  $\frac{\partial Q}{\partial V} = -\frac{V_1}{X} \quad (V = V_1)$

از نظر قدرمطلق برابر شدت جریان اتصال کوتاه است.  $\frac{\partial Q}{\partial V}$

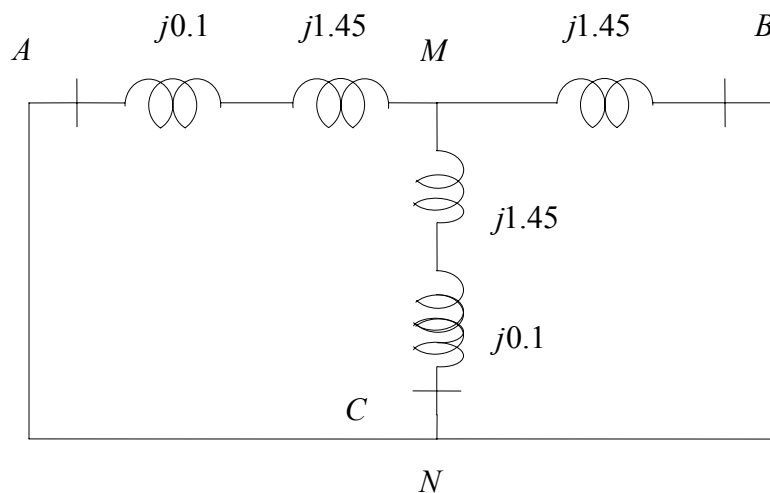
$$\left| \frac{\partial Q_P}{\partial V_{Phase}} \right| = I_{S.C, Phase}$$

مثال : سه نقطه تغذیه CBA به يك باس مشترك m وصل شده اند نقطه تقویه A روی 275KV ثابت نگه داشته شده و از طریق ترانس 275/132KV به نقطه m وصل شده اند. راکتانس ترانسفورماتورها  $0.1 pu$  می باشد.



راکتانس خط 132KV برابر  $50\Omega$  است. نقطه تغذیه B دارای ولتاژ اسمی 132KV بوده و از طریق خط 132KV با راکتانس  $50\Omega$  به نقطه m اتصال داده شده است. نقطه تغذیه C دارای ولتاژ اسمی 275KV است و از طریق ترانسفورماتور 275/132KV که دارای راکتانس  $0.1pu$  و خط 132KV با راکتانس  $50\Omega$  به نقطه m وصل شده است. اگر در یک بار معینی ولتاژ خط در نقطه m،  $5KV$  از مقدار اسمی افت پیدا کند حساب کنید قدرمطلق ظرفیت جبران ساز راکتیو (خازن) را که به نقطه m تزریق نمود تا ولتاژ اولیه بدست آید. مقادیر پریونیت در مقدار 500MVA داده شده و از مقاومت خطوط صرف نظر شده است.

مدار معادل حالت اتصال کوتاه



$$Z_b = \frac{132^2}{500} = 34.85\Omega$$

$$X_{MN} = 0.505057pu \cong 0.5 pu$$

شدت جریان اتصال کوتاه سه فاز

$$Z(\Omega) = Z_{base} \times Z(\text{pu}) = \left( \frac{V}{I_{Full Load}} \right) \times Z(\text{pu})$$

$$I_{S.C.} = \frac{V}{Z_{S.C.}(\Omega)} = \frac{V}{Z_{base} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{V}{I_{Full Load} \times Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{I_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})}$$

$$S_{3\text{ phase } S.C.} = \sqrt{3} V_{Line} I_{S.C.Line} = \sqrt{3} V \frac{I_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})} = \frac{S_{Full Load}}{Z_{S.C.}(\text{pu})}$$

$$S_{3\text{ phase } S.C.} = \frac{500}{0.5} = 1000\text{MVA}$$

$$I_{S.C.,Line} = \frac{S_{3\text{ phase } S.C.}}{\sqrt{3} V} = \frac{1000\text{M}}{\sqrt{3} \times 132\text{K}} = 4373.86 \text{ A}$$

$$\frac{\partial Q_{3\text{ phase}}}{\sqrt{3} \partial V_L} = I_{S.C.,Line} \rightarrow \frac{\partial Q_{\text{phase}}}{\partial V_{\text{phase}}} = \frac{\frac{\partial Q_{3\text{ phase}}}{3}}{\frac{\partial V_L}{\sqrt{3}}} = \frac{\partial Q_{3\text{ phase}}}{\sqrt{3} \partial V_L} \quad \text{در بحث سه فاز}$$

$$\Delta Q_M = \sqrt{3} I_{S.C.,Line} V_L = \sqrt{3} \times 5\text{KV} \times 4.37386\text{KA} = 37.88 \text{ MVAR} \quad \text{کل قدرت اکتیو سه فاز در نقطه M}$$

## جبران سازها

قدرت انتقالی در یک شبکه غیر واحد بصورت زیر است.

$$\text{از رابطه } \Delta V = \frac{RP + XQ}{V} \text{ مشخص است که افت فشار بشدت به مقدار توان راکتیو Q وابسته است.}$$

افزایش عبور جریان خط باعث ایجاد افت  $I^2R$  و کاهش ظرفیت حرارتی خط خواهد بود.

یکی از بهترین محلها برای تزریق قدرت راکتیو در محل بار می باشد. برای تزریق قدرت راکتیو سه فاز روش

زیر وجود دارد :

### 1. Static shunt Capacitors and Reactors

در سیستم های توزیع و فوق توزیع (بهمراه ترانسفورماتورهای تپ چنجر)

خازنهای موازی برای پیش فاز نمودن ضریب قدرت مدارات استفاده می شود. (در مدارات پس فاز بکار

می روند) تولیدکننده توان اکتیو

سلفهای موازی پس فاز (در مدارات پیش فاز مثل کابلها بکار می روند) مصرف کننده توان راکتیو هستند. در

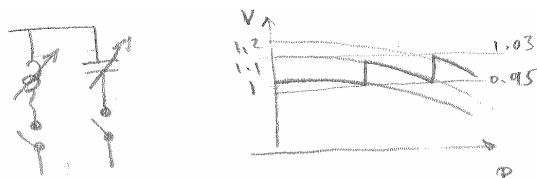
هر دو حالت هدف تأمین توان راکتیو Q روی تثبیت مقدار ولتاژ می باشد.

خازنها بصورت مستقیم و یا از طریق سیمپیچ ثالثیه يك ترانسفورماتور به شین متصل شده و مقدار تلفات و افت ولتاژ را کاهش می دهند.

بدبختانه با کاهش ولتاژ شین، توان راکتیو تولید شده توسط خازن یا سلف (راکتور) نیز کاهش می یابد.

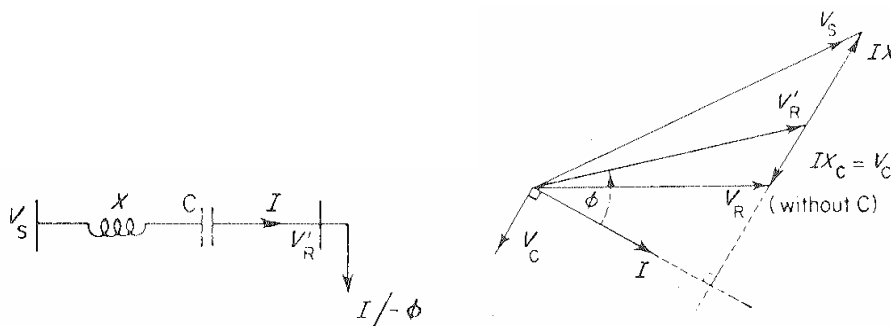
همینطور در بارهای روشنایی با افزایش ولتاژ به سمت مقادیر غیرمجاز خروجی خازن موازی نیز افزایش می یابد. کنترل ولتاژ در چند مرحله (پله) انجام می شود.

پس  $\Delta V$  توسط تولید محلی Q در شین بار با افزایش ولتاژ دو طرف خط کاهش می یابد.



## 2. Series Capacitors

این خازنها بصورت سری با خط انتقال متصل می شوند و برای کاهش میزان راکتانس سلفی خط بین شین تولید و مصرف بکار می روند. یکی از شرایط خطرناک، وجود اضافه ولتاژ تولیدی در حین عبور جریان اتصال کوتاه از خازن سری خواهد بود که توسط جرعه گیرها باتی حفاظت شوند.



(خازنهای سری در خلال خطاها، اتصال کوتاه می شوند تا به آنها آسیبی نرسد). (کلیدهای اتصال

کوتاه کننده معمولاً تریسقردی است).

اختلافات اساسی بین تأثیر خازنهای سری و موازی :

- ۱- در صورتیکه میزان وار موردنیاز بار کم باشد خازنهای سری به تعداد کم استفاده می شوند.
- ۲- تأثیر خازن سری در کاهش جریان خط کم است. در صورتیکه شرایط ظرفیت حرارتی خط در نظر گرفته شود خازن موازی تأثیر بیشتری بر جریان خط می گذارد.
- ۳- هر گاه افت ولتاژ عامل محدودکننده می باشد در آنصورت تأثیر خازنهای سری در اینمورد بیشتر خواهد بود.
- ۴- هرگاه راکتانس کل خط بزرگ باشد خازنهای سری بسیار سودمند بوده و حتی پایداری را نیز بهبود می بخشند.

در حقیقت نقش اصلی خازن سری در بهبود پایداری خطوط بلند است.

وقتي در خطوط بسيار بلند خازن سري استفاده مي‌شود از راکتور موازي نيز براي کنترل ولتاژ حاليهاي کمبار و بي‌بار استفاده مي‌شود.

### نتايج در نصب خازنهاي سري

۱- افزايش قدرت انتقالی ماکزیمم و بهبود پايداري ماندگار

$$P_C = \frac{V^2}{Z_C} \quad \text{افزايش بار طبيعي} \Rightarrow \text{بار طبيعي} \uparrow = SIL \uparrow$$

۲- افزايش بار طبيعي خط

$$P = \frac{|V_1||V_2|}{X} \sin \delta \quad \text{ثابت} \Rightarrow \delta \downarrow$$

۳- کاهش زاويه انتقال  $\delta$  در قدرت ثابت

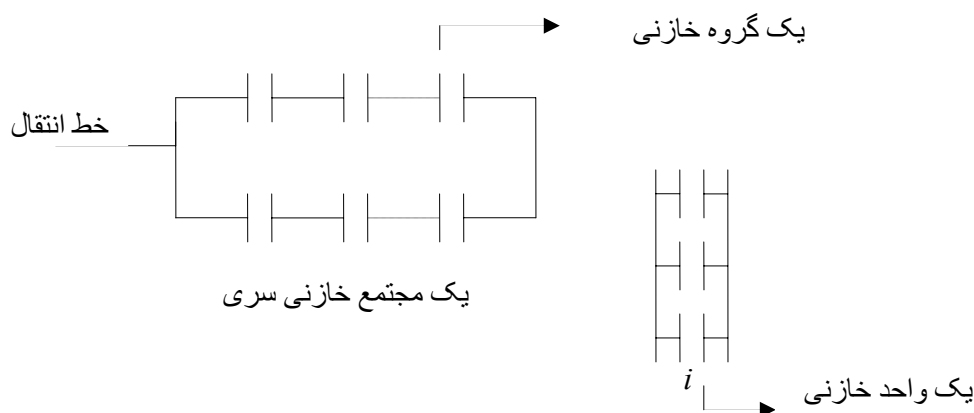
۴- کاهش تلفات خط

۵- کاهش افت ولتاژ و ايجاد پروفيل ولتاژ بهتر در طول خط

۶- بهبود پايداري گذرا

۷- کاهش حساسيت ولتاژ به اختلالات گذرا

محل نصب خازنهاي سري (بسته به عوامل اقتصادي) در يك يا در محل در ابتدا، انتها و وسط خط انتقال است.



### 3. Synchronous Compensators

#### جبران سازهای سنكرون

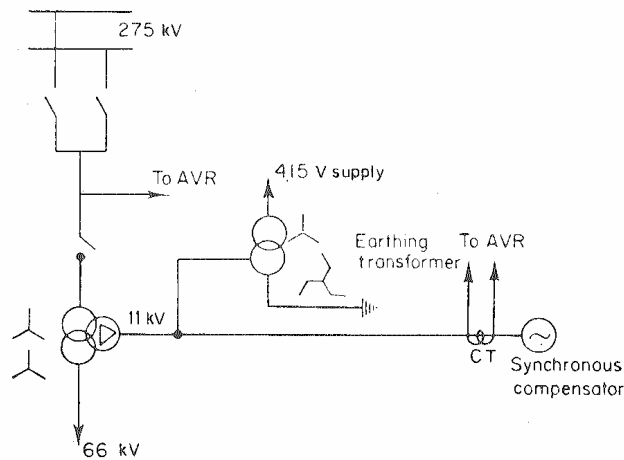
(هم در سيستم فوق توزیع و هم انتقال)

جبران کننده سنكرون در واقع يك موتور سنكرون بي‌بار است و جذب يا توليد توان راكتيو در آن به مقدار تحريك بستگي دارد.

تلفات آن قابل مقايسه با خازنهاي استاتيک است در حالیکه ضريب قدرت آن غير صفر مي‌باشد.

در حالت high load بصورت overexcited بعنوان جبران و تنظیم‌کننده ولتاژ بکار می‌رود (بصورت اتوماتیکی).

در حالت light load بصورت underexcited



سیستم AVR مربوط به کمپانزاتور توسط ولتاژ خط 275kV و جریان کمپانزاتور کنترل می‌شود.

این کار باعث ایجاد تغییرات لازم در مشخصه V-Q مربوط به سیستم خواهد شد.

از ویژگی‌های مهم این روش انعطاف عملکرد آن در شرایط بارداري مختلف است. هزینه نصف چینين تاسیساتي نیز بالاست.

برای خطوط بلند HV در انتهای بار با ضریب قدرت کمتر از ۱ این تجهیزات توجیه نمی‌شوند و بجای آنها در قسمت LV از خازن موازي استفاده می‌شود.

۱- کنترل ولتاژ در يك نقطه

۲- تنظیم خط و در نتیجه افزایش قدرت اکتانس و بهبود پایداری سیستم

۳- تأمین قدرت راکتیو در شرایط اضطراری

۴- کاهش نوسانات

#### 4. Static Compensators

##### جبران‌کننده‌های استاتیک

۱- راکتیو کنترل‌شده با تریستور TCR

۲- TCR و خازنهای ثابت موازي TCR/FC

۳- خازن سوییچ شده با تریستور TSC

۴- راکتور اشباع شده SR

## بررسی اقتصادی میزان ترمیم قدرت راکتیو

مثال : قدرت راکتیو می تواند در محل یا نزدیکتر به بار تولید شود و اینکار به سود و نفع مصرفکننده و هم به تولیدکننده است. تولیدکننده می خواهد فقط قدرت اکتیو انتقال دهد چون در موارد مصارف خانگی و تجاری فقط به قدرت اکتیو تعرفه پرداخت می شود در این محل برای قدرت راکتیو کشیده شده در شبکه پولی داده نمی شود تلفات خط و سیستم را افزایش می یابد بخاطر وجود مدرک راکتیو و شدت جریان نامی خط افزایش می یابد تول گیس در مصارف که دارای ضریب قدرت پائینتر هستند می خواهد تا ضریب قدرت خودش را بالا ببرد و یا تعرفه الکتریکی مصرف را دو قسمت کند که برای بارهای صنعتی صورت می گیرد.

$$f A \times KVA + B \times KWh \quad \text{يك تعرفه براي KVA موردنظر براي مصرف محل}$$

و يك تعرفه براي انرژی مصرف شده KWA می تواند هم مؤلفه اکتیو دهم مؤلفه راکتیو داشته باشد. حال اگر مصرفکننده بخواهد VAR مورد نیاز خود را تأمین کند KVA پائین می آید و هر ماه یا سال و یا در هر پریود بازای هر KVA پرداخت کسری خواهد داشت و این کار برای کارخانه بطور جسمانی صورت نمی گیرد بلکه آنها بایستی سرمایه گذاری روی کمپاتورها داشته باشد. اگر این سرمایه گذاری انجام نشود بایستی تعرفه بپردازد باید دید چقدر باید مصرفکننده ضریب قدرت خود را بالا برد تا برایش اقتصادی تر باشد؟

$$P_1 : \text{قدرت قبل از اصلاح} \quad \theta_1 : \text{ضریب قدرت تأخیری}$$

$$P_1, \theta_2 : \text{ضریب قدرت بعد از اصلاح}$$

$$KVA = \frac{P_1}{\cos \theta_1} \quad \text{مورد نیاز کارخانه} \quad KVA = \frac{P_1}{\cos \theta_2}$$

$$KVA \text{ در } = \left( \frac{P_1}{\cos \theta_1} - \frac{P_1}{\cos \theta_2} \right) \cdot A \quad \text{صرفه جویی}$$

خازنهای موجود در بازار بازای هر KVAR ظرفیت خازن مطرح می شود.

$$P_1 \tan \theta_1 \quad \text{قدرت راکتیو مورد نیاز قبل از اصلاح } \cos^0$$

$$P_1 \tan \theta_2 \quad \text{بعد از اصلاح}$$

$$KVAR = P_1 \tan \theta_1 - P_1 \tan \theta_2 \quad \text{KVAR مورد احتیاج بوسیله کمپاتورها}$$

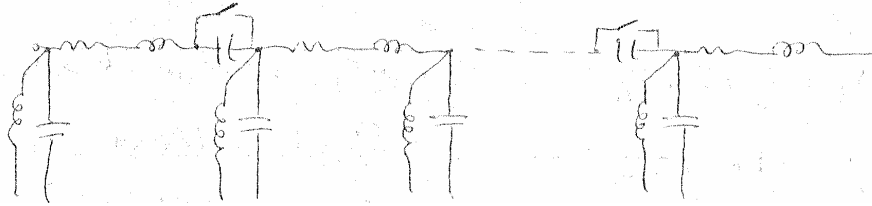
هزینه سالانه مسئله اگر برابر هر KVAR  $C' f / KVAR$  سرمایه گذاری شود اگر به بالا ضرب شود کل هزینه سرمایه گذاری است این هزینه در طی عمر خازنها استهلاک دارد برای هر سال استهلاکهای فراوان از جمله استهلاک ارزش پول و نرخ بهره بوجود می آید.

$$C' f / KVAR = \text{هزینه سالانه سرمایه گذاری}$$

$$KVA \text{ خالص } = \left[ AP_1 \left( \frac{1}{\cos \theta_1} - \frac{1}{\cos \theta_2} \right) - C' P_1 (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \right]$$

$\theta_2$  متغیر است. می‌توان از این صرفه‌جویی نسبت به  $\theta_2$  مشتق گرفته و مساوی صفر قرار دهیم.

$$\sin \theta_2 = \frac{C'}{A} \quad \theta_2 \text{ بیشتر بستگی به هزینه سرمایه‌گذاری سالانه و تعرفه KVA دارد.}$$



خازنهای سری و کاهش افت ولتاژ، یا اتصال کوتاه کردن این خازنهای سری می‌توان فقط بارهای راکتور (سلف) را به مدار آورد. خازنهای سری در مواقع بار زیاد که افت ولتاژ بیشتر مطرح است مورد استفاده است و راکتورها در مواقع بار سبک خازنهای موازی عمده/ کاهش تلفات می‌تواند قابلیت انتقال خط را به حد قابل معینی افزای دهد در خازنهای سری افت ولتاژی را می‌تواند جبران کند از خازنهای موازی برای تقسیم بار بین خطوط استفاده می‌شود چون بار بصورت عکس امپدانس بین خطوط تقسیم می‌شود.

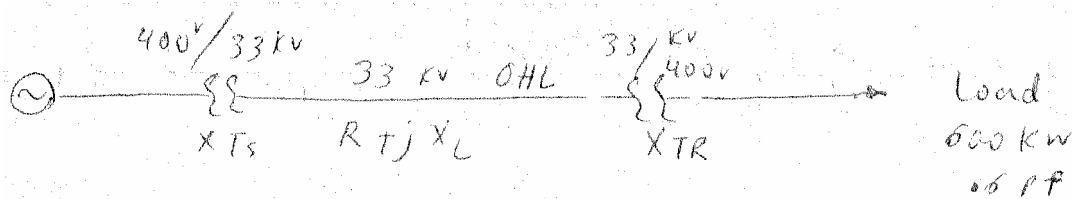
مثال: در شکل زیر می‌خواهیم ضریب قدرت را ابتدا توسط خازن موازی و سپس توسط خازن سری برابر 1 نمائیم. مقدار بار 600KW PF = 0.6 ترانسفورماتور 33KV/400V خط overhead 33KV  $R_L + jX_L$  و ترانسفورماتور دیگر 400V/33KV است.

$$X_{TS} = 87 \Omega / pu$$

$$X_{TR} = 87 \Omega / pu$$

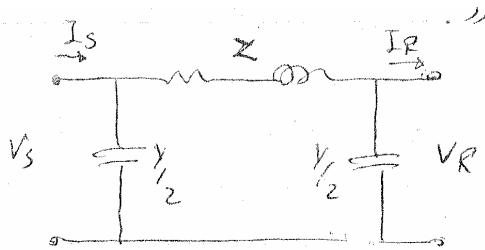
$$R = 6u \Omega / pu$$

$$X_L = 22 \Omega / pu$$



## قدرت راکتیو لازم برای کنترل ولتاژ یک خط طولانی

خط طولانی را می‌توان بصورت مدار معادل  $\pi$  معادل‌سازی کرد.



بازای اینکه  $V_R$  چه مقداری از  $V_S$  باشد مقدار قدرت راکتیو لازم برای انتقال یک قدرت معینی را بررسی کنیم.  $A$ ,  $B$  به مشخصات خط مربوط هستند.

$$V_S = (V_R \frac{Y}{Z} + I_R)Z + V_R$$

$$A = \frac{ZY}{2} + 1 = |A| < \alpha$$

$$V_S = (\frac{ZY}{2} + 1)V_R + Z I_R$$

$$B = Z = |B| < \beta$$

$$V_r = |V_r| < 0, \quad I_r = |I_r| < -\phi_r$$

طرف دریافتی

$$V_S = |V_S| < \delta_S$$

طرف ارسالی

$$|V_S|^2 = |A|^2 |V_r|^2 + |B|^2 + |I_r|^2 + |A||B||V_r||I_r| [\cos(\alpha - \beta) \cos \phi_r - \sin(\alpha - \beta) \sin \phi_r]$$

ایجاد نول بایستی برحسب قدرت انتقالی نوشته شود تا پارامترها قابل اندازه‌گیری باشند.

$$P_r = V_r I_r \cos \phi_r$$

$$Q_r = V_r I_r \sin \phi_r$$

$$I_r = I_p + j I_q$$

$$I_r^2 = I_p^2 + I_q^2$$

$$\text{مؤلفه اکتیو شدت جریان دریافتی } I_p = \frac{P_r}{V_r}$$

$$I_q = \frac{Q_r}{V_r}$$

$$V_S^2 = A^2 V_r^2 + B^2 \left( \frac{P_r^2}{V_r^2} + \frac{Q_r^2}{V_r^2} \right) + 2AB P_r \cos(\alpha - \beta) - 2AB Q_r \sin(\alpha - \beta)$$

برای یک شبکه قدرت اکتیو و راکتیو انتقالی  $Q_r, P_r$  در دست باشد، بازای اینکه  $V_r$  دارای چه نسبتی با  $V_S$  باشد  $Q_r$  را می‌توان مشخص ساخت و از روی آن می‌توان دید چقدر کمپاتره نمودن در پایان خط لازم است.

اقتصادی و راحت‌ترین راه برای کنترل ولتاژ ترانس‌های مجهز به tap changing هستند.

کنترل ولتاژ می‌تواند بصورت استفاده از خازنهای سری و موازی یا با استفاده از راکتور نیز باشد که قبلاً بحث آن رفت. این ترانس‌ها به ترتیبات مختلف می‌توانند در خط استفاده شوند: دو عدد ترانسفور مانند تپ‌چنجر در دو طرف خط

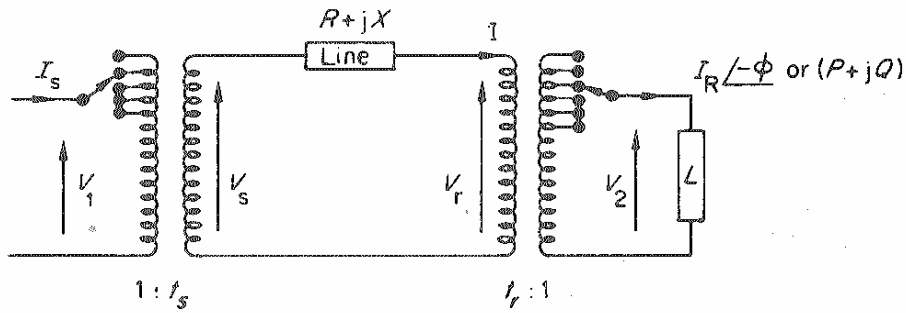
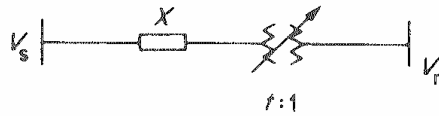
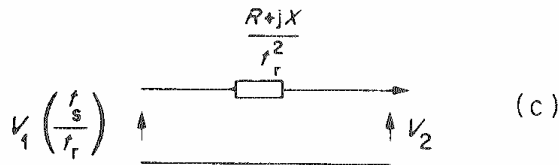
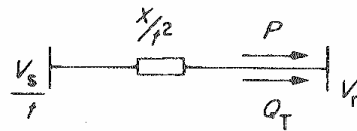


Figure 5.10 (a) Coordination of two tap-changing transformers in a radial transmission link.



(b)



(c)

Figure 5.10 (b) and (c) Equivalent circuits for dealing with off-nominal tap ratio. (b) single transformer (c) two transformers.

تنظیم واحد

$V_1$  ولتاژ اسمی nominal voltage

$t_s$  تنظیم off- nominal

$V_s$  ولتاژ حقیقی actual voltage

$t_r$  تنظیم off- nominal

$V_r$  actual voltage

تنظیم واحد

$V_2$  actual voltage

$t =$  of nominal tap ratio Or perunit tap setting نسبت ترانس ها

$t_s, t_r$  نسبتی از نسبتهای اسمی ترانسفورماتورها fraction of nominal transformation ratio

نسبت ترانس ها وقتی تیپینگ صورت می گیرد به نسبت ترانس وقتی که تپ صورت نمی گیرد یعنی (در حالت عادی)

$$t_s = \frac{\text{tap ratio}}{\text{no min alratio}}$$

$$t_s = \frac{\left(\frac{T}{P}\right)_{\text{tap}}}{\left(\frac{T}{P}\right)_{\text{nominal}}}$$

مثلاً اگر نسبت اسمی ترانس ۱ و ۲  $6.6/33^{\text{KV}}$  باشد و وقتی که تیپینگ انجام می‌شود نسبت ترانس به  $6.6/36$  تبدیل می‌شود (تیپینگ در step های مختلف صورت می‌گیرد).

$$t_s = \frac{36/6.6}{33/6.6} = \frac{36}{33} = 1.09 \quad t_s.t_r = 1 \rightarrow t_r = 0.917$$

$$\text{اگر } t_s.t_r = 1$$

$$V_s = V_1 t_s \quad V_r = t_r V_2$$

برای جبران کامل افت ولتاژ و برای داشتن حداقل tap cho در کنترل ولتاژ بایستی داشته باشیم :

$$t_r.t_s = 1$$

$$\bar{V}_s = \Delta \bar{V} + \bar{V}_r \quad t_s V_1 = I_2 t_r V_2 \quad I_2 = \Delta V = \frac{RP + XQ}{V_r = t_r V_2}$$

$$\Delta \bar{V} = V_1 \left(\frac{t_s}{t_r}\right) - \bar{V}_2 \equiv \frac{\frac{R}{t_r^2} P + \frac{x}{t_r^2} Q}{\bar{V}_2}$$

$$\begin{cases} t_s V_1 = t_r V_2 + \frac{RP + XQ}{t_r V_2} \\ t_r.t_s = 1 \end{cases} \rightarrow t_s V_1 = \frac{V_2}{t_s} + \frac{RP + XQ}{\frac{V_2}{t_s}} \quad \text{طرفین در } \frac{t_s}{V_1} \text{ ضرب}$$

$$t_s^2 = \frac{V_2}{V_1} + \frac{RP + XQ}{V_1 V_2} . t_s^2 \quad \frac{V_2}{V_1} = t_s^2 \left(1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}\right)$$

$$t_s^2 V_1 V_2 - V_2^2 = (RP + XQ) t_s^2$$

بازای یک مقدار قدرت انتقالی از خط و بازای اینکه  $V_2$  چه نسبتی از  $V_1$  باشد  $t_r, t_s$  را مشخص سازیم و خواهیم افت ولتاژ متوسط ترانس مجهز به tapch کمپانزه باشد یعنی  $V_1 = V_2$  باشد خواهیم داشت :

$$t_s = \sqrt{\frac{V_2/V_1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1 V_2}}} \xrightarrow{V_1=V_2} \sqrt{\frac{1}{1 - \frac{RP + XQ}{V_1^2}}}$$

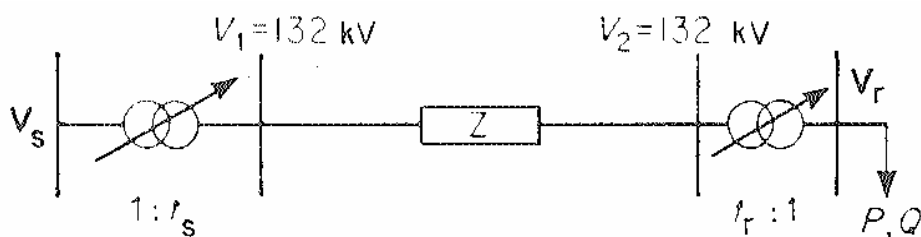
$$V_2 = \frac{1}{2} \left( t_s^2 V_1 \pm t_s \sqrt{t_s^2 = V_1^2 - 4(RP + XQ)} \right)$$

برای یک مشخصه معینی از خط و برای یک اتصال یک قدرت معینی و یک تصحیح معینی با داشتن  $V_1$  می‌توان ولتاژ  $V_2$  را مشخص ساخت.

مثال- يك خط انتقال ۱۳۲KV از طريق ترانسفورماتور 11/132 KV تغذيه مي‌شود. در طرف ديگر خط (طرف بار) اين ولتاژ توسط ترانسفورماتور ديگر 132/11 KV کاهش مي‌يابد. امپدانس كل خط و ترانسفورماتورها در طرف 132 KV برابر  $25 + j66\Omega$  است.

هر دو ترانسفورماتور، داراي سيستم تپ چنجر هستند كه در آنها حاصلضرب تنظيمات طرف off-nominal برابر واحد است.

اگر بار انتهاي خط برابر 100MW در ضريب قدرت ۰/۹ پس‌فاز باشد در آنصورت تنظيمات  $t_s \cdot t_r = 1$  تپ‌چنجرها را براي ثابت نگه‌داشتن ولتاژ شين بار در 11KV محاسبه كنيد (توان مثبت 100MW).



$$V_s = V_r = 132KV = 1pu$$

حالت جبران كامل مي‌باشد (طبق شرايط مسئله)

$$t_s \times t_r = 1$$

$$Z_{un} = 25 + j66\Omega = 0.14 + j0.38 pu$$

$$\text{load} = P + jQ = 100MW + j48.3MVAR = 1 + j0.483 Pu$$

از معادله كلي

$$1 = \frac{1}{2} \left[ (t_s^2 \cdot 1) \pm t_s \sqrt{(t_s^2 \cdot 1^2 - 4(0.14 \times 0.38 \times 0.483))} \right]$$

$$2 = t_s^2 \pm t_s \sqrt{t_s^2 - 1.28}$$

$$(2 - t_s^2)^2 = t_s^2 (t_s^2 - 1.28) \quad \rightarrow \quad t_s = 1.21 \quad \rightarrow \quad t_r = \frac{1}{1.21} = 0.83$$

شرايط عادي براي تپ‌چنجر بيش از ۲۰ درصد نمي‌باشد و مقادير بدست آمده كمی بيشتر از حالت معمول است. بنا بر اين لازم است براي تثبيت ولتاژ در شين بار از تزريق وار نيز استفاده شود.

دقت شود كه اين ترانسفورماتورها مقدار قدرت راكتيو را تغيير نمي‌دهند بلكه با افزايش نسبت تنظيم  $t_s$  (با کاهش  $t_r$ ) جريان خط افزايش مي‌يابد.

$$I = 100A$$

قبل از تپ‌چنجر

$$\text{ratio } 1:1$$

$$\frac{I'}{100} = \frac{1.1}{1}$$

$$\rightarrow I' = 100 \times 1.1$$

بعد از تپ‌چنجر

$$\Delta V_L' = 1.1 \Delta V_L$$

از طرف ديگر افزايش ولتاژ ثانويه (كاهش  $t_r$ ) نيز باعث افزايش اين افت ولتاژ (افزايش جريان) خواهد بود.

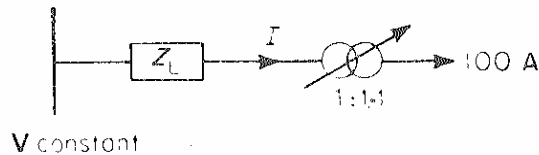


Figure 5.12 Effect of tap changing on line current and voltage drop.

### ترکیب ترانسفورماتورهای تنظیم Tap-changing و تزریق توان راکتیو

در بعضی از منابع  $t_r = a_2$  ,  $t_s = a_1$  per unit tap setting

در طرف دریافتی وقتی  $t_r$  را کاهش می‌دهیم شدت جریان در این قسمت افزایش می‌یابد و لذا با کاهش  $t_r$  که می‌خواهیم افت ولتاژ را جبران کنیم از طرف دیگر شدت جریان را افزایش داده‌ایم. پس بایستی توجه داشت این ترانس‌ها را در خطوطی بکار برد که دارای امپدانس کمتری باشند.

این ترانس‌ها حداکثر تا 20% ولتاژ را کنترل کنند اگر ترمیم ولتاژ بیشتر از آن مورد احتیاج باشد لازم است ترانسفورماتورها را همراه با سایر کمپانزاتورها مثل خازنها یا موتورهایی سنکرون استفاده کنیم که آنها به ثالثیه ترانسفورماتورهای سه‌سیم‌پیچه اتصال پیدا می‌کنند.

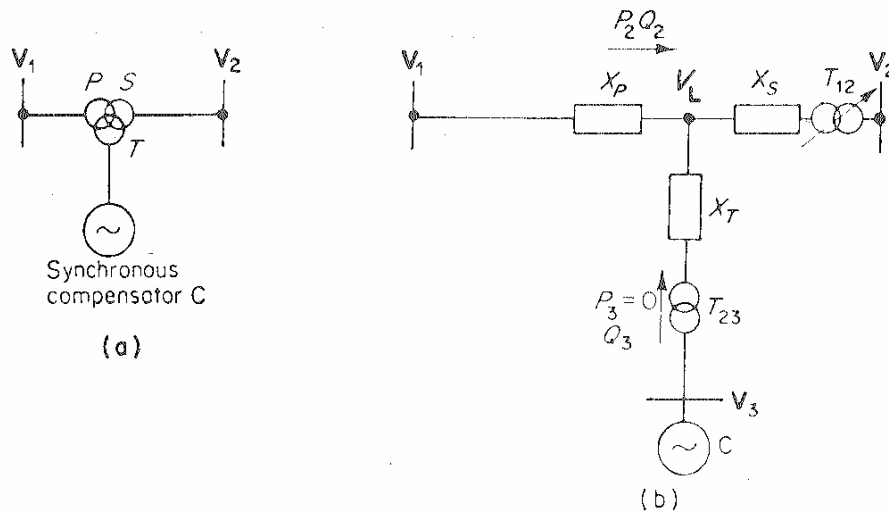


Figure 5.13 (a) Schematic diagram with combined tap changing and synchronous compensation. (b) Equivalent network.

برای انتقال یک قدرت معینی و بازای اینکه ولتاژ ثانویه چه نسبتی با ولتاژ اولیه داشته باشد و با توجه به محدود بودن setting , tap های این ترانس مقدار قدرت راکتیوی که این کمپانزاتور بایستی بدهد چقدر باید باشد؟

در طرف ثالثیه  $P_3 = 0, Q_3$  افت ولتاژ در نقطه  $V_1$  تا  $V_n$  با صرف نظر از R

$$\Delta V = \frac{X_P Q_2 / 3}{V_n} = X_P \frac{Q_2}{\sqrt{3} V_b} \quad V_L = \sqrt{3} V_n$$

$$\delta V = X_P \frac{P_2}{\sqrt{3}V_L}$$

$$(V_n + \Delta V)^2 + (\delta V)^2 = V_1^2$$

$$(V_L^2 + X_P Q_2)^2 + (X_P P_2)^2 = 3V_1^2 V_L^2$$

$$V_{1L} = \sqrt{3}V_1$$

$$V_L^4 + X_P^2 Q_2^2 + 2X_P Q_2 V_L^2 + X_P^2 P_2^2 = V_{1L}^2 V_L^2 = 0$$

$$V_L^4 + (2X_P Q_2 - V_{1L}^2)V_L^2 + (X_P^2 Q_2^2 + X_P^2 P_2^2) = 0$$

$$V_L^2 = \frac{(V_{1L}^2 - 2X_P Q_2)}{2} \pm \frac{1}{2} \sqrt{V_{1L}^2 (V_{1L}^2 - 4X_P Q_2) - 4X_P^2 P_2^2}$$

190

*Example 5.4* A three-winding grid transformer has windings rated as follows: 132 kV (line), 75 MVA, star connected; 33 kV (line), 60 MVA, star connected; 11 kV (line), 45 MVA, delta connected. A synchronous compensator is available for connexion to the 11-kV winding.

The equivalent circuit of the transformer may be expressed in the form of three windings, star connected, with an equivalent 132 kV primary reactance of 0.12 p.u., negligible secondary reactance, and an 11 kV tertiary reactance of 0.08 p.u., both values expressed on a 75 MVA base.

In operation, the transformer must deal with the following extremes of loading:

- (a) Load of 60 MW, 30 MVA<sub>r</sub> with primary and secondary voltages governed by the limits 120 kV and 34 kV; synchronous compensator disconnected.
- (b) No load. Primary and secondary voltage limits 143 kV and 30 kV; synchronous compensator in operation and absorbing 20 MVA<sub>r</sub>.

Calculate the range of tap changing required. Ignore all losses.

روش دیگر مورد استفاده از ترانس‌های مجهز به tap chan در خطوط برای کنترل جریان قدرت راکتیو است

VAR

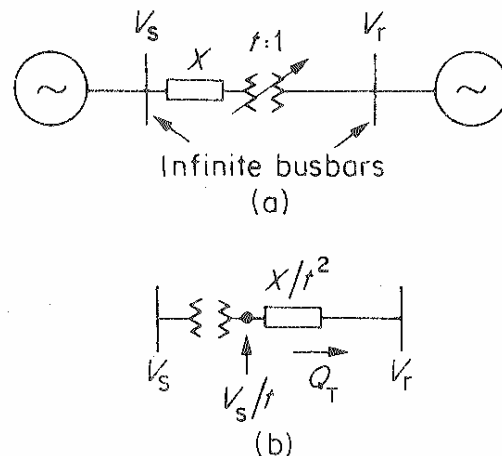


Figure 5.15 (a) Two power systems connected via a tap-change transformer. (b) Equivalent circuit with impedance transferred to receiver side.

اگر  $V_r, V_s$  ثابت باشند و ترانس مجهز به t.ch با nominal ratio  $t$  باشد می‌توان مدار را بصورت زیر در نظر گرفت :

تمام پارامترها را به سمت راست ترانس می‌توان انتقال داد.

$$\Delta V = \frac{V_s}{t} - V_r = \frac{X Q_r}{t^2 V_r} \quad \text{افت ولتاژ در خط}$$

$$Q_r = (V_s v_r t - V_r^2 t^2) \frac{1}{X} \quad \text{اگر طرفین به } \frac{V_r \cdot t^2}{X} \text{ ضرب شود.}$$

تحت این شرایط داریم :

$$V_s = V_r = V$$

$$tV^2(1-t) \frac{1}{X} = Q_T \quad \text{قدرت اتصال کوتاه} \quad S = \frac{V^2}{X}$$

$$St(1-t) = Q_T$$

$t < 1$   $Q_T$  مثبت است.  $V_s$  بزرگتر از  $V_r$  بوده و جریان از باس  $V_s$  بطرف  $V_r$  است.

$t > 1$   $Q_T$  منفی است.  $V_s$  کمتر از  $V_r$  بوده و جهت جریان قدرت راکتیو از  $V_r$  به طرف  $V_s$  است.

بنابراین با تنظیم مناسب ترانسفورماتور تبدیل مقدار توان راکتیو بین دو ناحیه کنترل می‌شود. در حالت پیشرفته می‌توان از تعداد دو ترانسفورماتور تنظیم تبدیل موازی بین دو ناحیه استفاده نمود. هرگاه یکی از ترانسفورماتورها در نسبت تبدیل off-nominal برابر 1:1.1 و دیگری در جهت مخالف یعنی 1:0.8 تنظیم

شوند در آن صورت جریان گردشی متناسب با توان راکتیو در حلقه بین دو ترانسفورماتور ظاهر می شود. این روش بنام Tap Stagger یا اتصال قابل تغییر نامیده شده و راه حل مناسبی برای جذب توان راکتیو می باشد.

### Booster Transformers

### ترانسفورماتور تقویت

Booster transformer = دو نوع هستند و ترانس های تنظیم کننده یا regulating trans هستند که ولتاژ را در جهت طولی تغییر می دهند (که قبلاً توضیح داده شده است) ترتیب سیم پیچ های سری و تحریک که در مدار قرار می گیرند صورت می گرفت در این ترانس ها سیم پیچ تحریک و سری از یک باس گرفته می شود. افزایش ولتاژ خواهیم داشت بدون Phase shift

تحریک سیم پیچ سری از خود همان فاز است. در حالیکه در حالت قبل تحریک سیم پیچ سری از دو فاز دیگر گرفته می شد که 90 نسبت به ولتاژ دیگر فاز اختلاف فاز دارند.

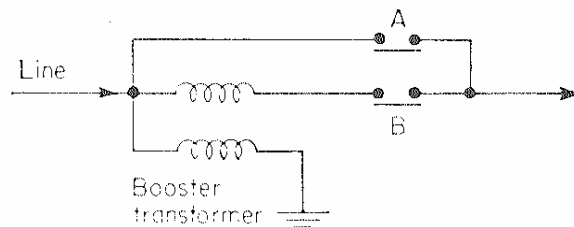
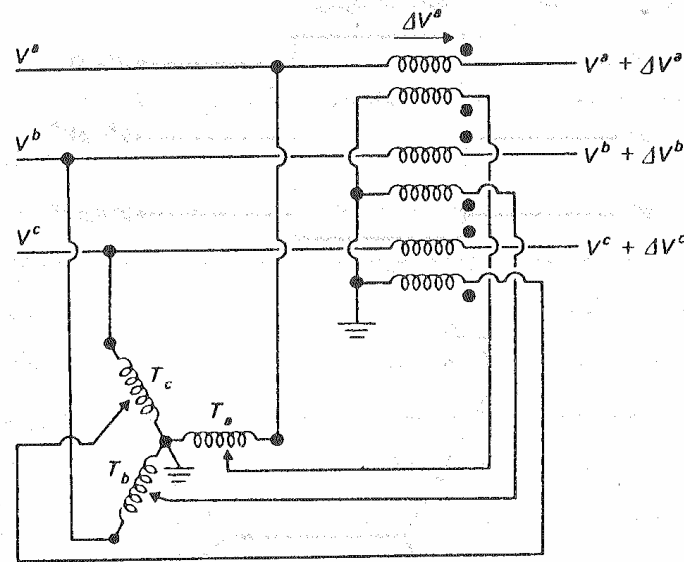
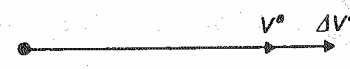


Figure 5.16 Connexion of in-phase booster transformer. One phase only shown.



(الف)



(ب)

ترانسفورماتور تنظیم مخصوص تنظیم دامنه ولتاژ

**Example 5.5** In the system shown by the line diagram in Figure 5.17 each transformer  $T_A$  and  $T_B$  have tap ranges of  $\pm 10$  per cent in 14 steps of 1.43 per

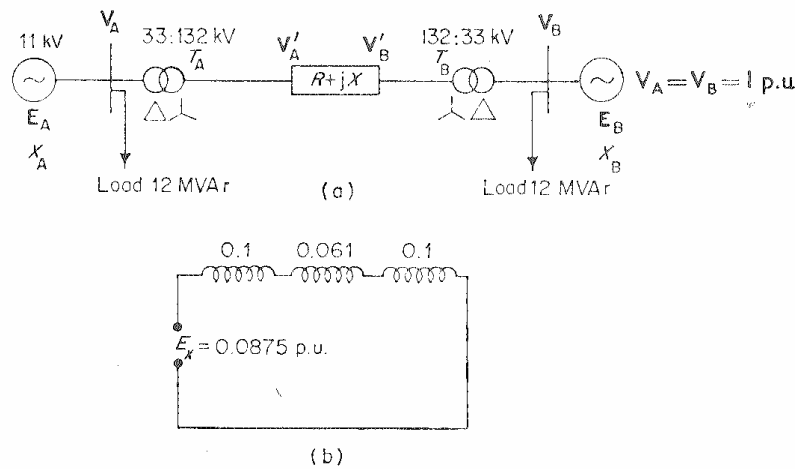
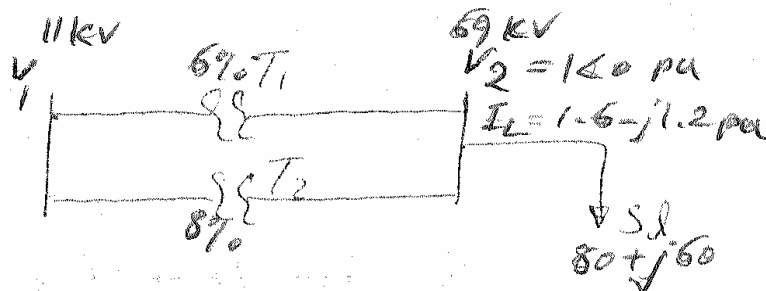


Figure 5.17 (a) Line diagram of system for Example 5.5. (b) Equivalent network with voltage boost  $E_x$  acting.

cent. Initially  $V'_A = V'_B$  and hence no power or var transfer takes place through the line. It is required to calculate the magnitude of the circulating current resulting from an in-phase boost of 8.75 per cent on  $T_A$ , with the busbar voltages maintained constant by automatic voltage regulators on generators A and B. The plant data are as follows expressed on a 20 MVA base, resistance ignored. Generators A and B: 20 MVA,  $X = 0.2$  p.u. Transformers  $T_A$  and  $T_B$ : 20 MVA, 132/33,  $X = 0.1$  p.u.; 132 kV line, 8 km,  $X = 3.85 \Omega = 0.061$  p.u.

مثال - در شکل زیر 2 ترانسفورماتور بطور موازي مورد بهره برداري قرار گرفته و قدرت را بين باس  $V_1 = 11KV$  و باس  $V_2 = 69KV$  انتقال مي دهند.  $S_L$  قدرت بار دريافتي  $80MW + j60MVAR$  و تحت ولتاژ 50MVA تغذيه مي شود دو ترانسفورماتور داراي قدرت 50MVA مساوي هم بوده و ولتاژ نامي آنها  $11/69KV$  است. دو ترانس قدرت 100MVA را تغذيه مي نمايند.



حال اگر امیدانس این ترانس ها با هم برابر بودند قدرت بطور مساوي بين دو ترانس تقسیم می شد مسئله ای نبود اما امیدانس ترانس ها متفاوت است.  $X_{T1} = j.06$  ,  $X_{T2} = j.08$  است،

وقتی نسبت ترانس ها  $\frac{1}{1}$  است یعنی بدون تغییر دادن t.ch بار بطور مساوي بين آنها تقسیم نخواهد شد چون امیدانس ترانس 1 کمتر است Overload می شود ولی  $T_2$  تحت شرایط under load مورد استفاده قرار می گیرد حال اگر بوسیله تغییرات نسبت ترانس ها تا چه اندازه می توان بارها را بطور مطلوب بين ترانس ها تقسیم نمود. میدانیم نسبت هر يك از ترانس ها بين 90-110% از نسبت نامي  $a^0 = \frac{11}{69KV}$  در 32 مرحله یا پله step بطوریکه در هر مرحله یا پله  $\frac{5}{8}\%$  تغییر یابد.

Nominal ratio تغییر پیدا خواهد کرد (هر کدام از این 32 پله  $\frac{5}{8}\%$  ولتاژ را تغییر خواهند داد).

حل : در صورتیکه هیچ اصلاحي صورت نمی گیرد حل می کنیم پس بررسی می کنیم که با تغییرات مناسب بار را به چه شکل مطلوب می توان بين دو خط تقسیم نمود :

$$S_b = 50MVA$$

$$V_b = 11KV, 69KV$$

چون 69KV ولتاژ  $V_2$  را 1 پریونیت در نظر گرفته ایم.

$$I_L = 1.6 - j1.2 \quad S = VI_L^*$$

با داشتن شدت جریان می توان شدت جریان هر خط را بدست آورد به نسبت عکس امیدانس ها.

$$I_{L1} = \frac{j.08}{j.08 + j.06} I_L = .914 - j.686 \text{ Pu}$$

$$I_{L2} = \frac{j.06}{j.08 + j.06} I_L = .686 - j.514 \text{ Pu} \quad \frac{|I_{L2}|}{|I_{L1}|} = \frac{6}{8} = .75$$

$$|I_{L1}| = 1.14$$

طرف 1 14 درصد Over load کار می کند

$$|I_{L2}| = .86$$

طرف 2 14 درصد Under load کار می کند

اختلاف ولتاژی که می خواهیم ایجاد کنیم فرض می کنیم اختلاف ولتاژ  $\Delta V$  در بين ثانويه ترانس 1 و ثانويه ترانس 2 وجود می آوریم و این اختلاف ولتاژ بایستی موجب ایجاد يك شدت جریان دوراني  $V_{I_L}$  که از شدت جریان خط  $L_1$  کم و به شدت جریان خط  $L_2$  اضافه نماید.

$$\Delta V \text{ اختلاف ولتاژ بين ثانويه } T_1 \text{ و ثانويه } T_2 \text{ شدت جریان دوراني } I_C = \frac{\Delta V}{Z_{Loop}} \text{ فرض می شود تغییرات } 1 \text{ tap}$$

را فقط در يك ترانس انجام می دهیم tap هاي  $T_2$  را ثابت نگه داشته و tap ترانس 1 را مقداري افزایش می دهیم

پس نسبت ترانس 2 روي مقدار نامي ثابت نگه مي داريم روي ترانس 1 به اندازه  $\Delta a$  افزايش مي دهيم :

$$a^0 = 11/69 \text{KV}$$

$$T_2 : a^0 \rightarrow t_2 = \frac{a^0}{a^0} = 1$$

$$T_1 : a^0 + \Delta a \rightarrow t_1 = \frac{a^0 + \Delta a}{a^0} = 1 + \frac{\Delta a}{a^0}$$

$$T_2 \Delta a^0 = \frac{V_1}{V_2}$$

$\Delta a \cdot a_0 \rightarrow 0$  مقدار كوچكي است پس

اگر صورت و مخرج كسر را به  $V_2$  تقسيم كنيم  $\Delta V$  بر حسب  $Pu$  بدست مي آيد.

$$T_1 a^0 + \Delta a = \frac{V_1}{V_2}$$

$$\Delta V = \frac{V_1}{a_0} - \frac{V_1}{a_0 + \Delta a} = \frac{V_1(a_0 + \Delta a) - V_1 a_0}{a_0(a_0 + \Delta a)} = \frac{V_1 \Delta a}{a_0^2 + \Delta a \cdot a_0} \cong \frac{V_1 \Delta a}{(a_0)^2}$$

$$\frac{\Delta V}{V_2} \cong \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{\Delta a}{a_0^2} Pu \quad (\Delta V)_{Pu} \cong \frac{\Delta a}{a_0} Pu$$

به  $V_1 = 1 \text{ Pu}$  يا بر حسب پريونيت

با داشتن شدت جريان دوراني مي توان نسبت ترانس را بدست آورد.

$$I_C = \frac{\Delta a / a_0}{j \cdot 4} = \frac{\Delta V}{\Sigma X}$$

بصورت ترسيمي مي توان

$$\begin{cases} I_1 = I_{L1} - I_C \\ I_2 = I_{L2} + I_C \end{cases} \rightarrow |I_{L1} - I_C| = |I_{L2} + I_C|$$

چون  $I_C$  فقط مؤلفه راكتيو دارند لذا  $I_C = -jb$  (در كتاب  $a \rightarrow b$  نوشته شده است)

$$-ja = \text{قدر مطلق شدت جريان دوراني}$$

$$|.914 - j.686 + ja| = |.686 - j.514 - ja| \rightarrow a = .238$$

$$\frac{\Delta a}{a_0} = I_C(j.14) \rightarrow \frac{\Delta a}{a_0} = .0333 \text{ Pu} \rightarrow \begin{cases} t_2 = 1 \\ t_1 = 1 + \frac{\Delta a}{a_0} = \pm .0333 \end{cases} \quad \text{كل تغييرات}$$

در هر مرحله فقط  $5/8\%$  اين نسبت تغيير پيدا مي كند.

$$\text{تعداد پله} = \frac{t}{\dots}$$

$$\text{تعداد پله} = \frac{.0333}{\left(\frac{5}{8}\right) \frac{1}{1000}} = 5.33 =$$

تعداد پله ها

