جلسه اول

کنترل توان راکتیو سیستم‌های قدرت

سرفصل‌ها:

1- مقدمات و تعاریف

2- ارتباط کنترل توان راکتیو و ولتاژ

3- اهداف کنترل توان راکتیو در شبکه‌های قدرت

4- تاثیر کنترل توان راکتیو بر عملکرد حالت ماندگار شبکه انتقال

5- تاثیر کنترل توان راکتیو بر دینامیک سیستم قدرت

6- ساختمان و عملکرد جبرانسازهای استاتیک توان راکتیو

7- مفهوم پایداری ولتاژ در شبکه و شاخص‌های ارزیابی آن

8- برنامه‌ریزی بهینه توان راکتیو در سیستم‌های قدرت

مراجع:

1. پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت — Prof. کندور
ترجمه دکتر حسین سیفی و دکتر علی خاکی صدیق انتشارات دانشگاه تربیت مدرس

2. Reactive power control in Electric systems
T.J.E Miller — ترجمه دکتر قاضی مشهد
/ Library.nu ~~.com~~
gigapedia.com

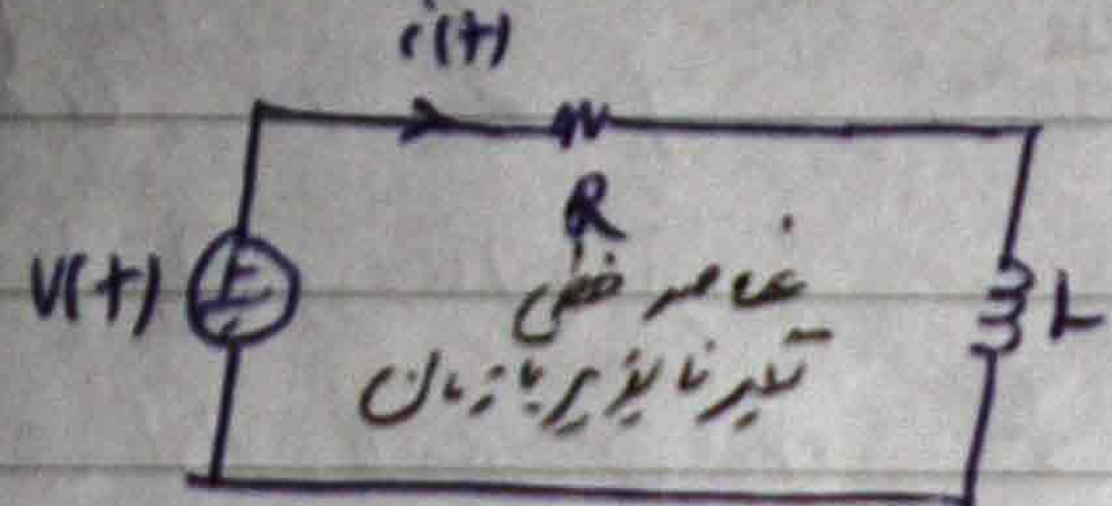
3. ادوات FACTS

پایان ترم: 15

کاردوره: 0-5

تعریف توان اکتیو و راکتیو:

مثال: مدار الکتریکی شکل زیر را در نظر بگیرید:



حوزه زمان:

$v(t) = V_m \cos\omega t$

$v(t) = R\,i(t) + L\frac{di(t)}{dt}$

حالت ماندگار $\rightarrow i(t) = i_m \cos(\omega t - \alpha) \rightarrow i_m = \frac{V_m}{R^2+(L\omega)^2}$, $\alpha = tg^{-1}\frac{L\omega}{R}$

توان الکتریکی لحظه‌ای که منبع به مدار تحویل می‌دهد $p(t) = v(t).i(t) = V_m\cos\omega t \,.\, i_m\cos(\omega t-\alpha)$

$\Rightarrow \frac{V_m i_m}{2}\left(\cos\alpha + \cos(2\omega t-\alpha)\right)$ تبدیل حاصل‌ضرب

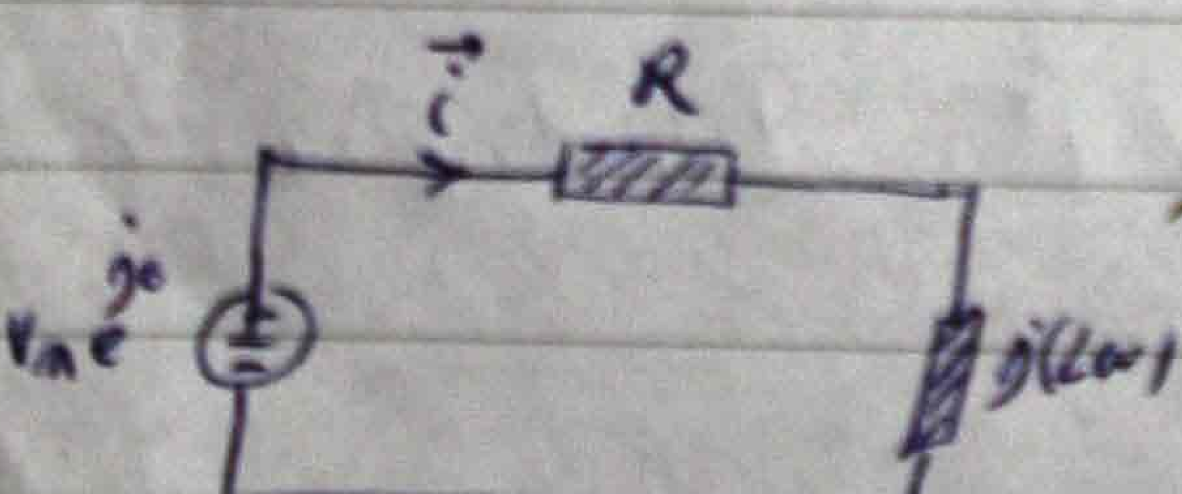
توان متوسط $\langle p(t)\rangle = \overline{p(t)} = \frac{V_m i_m}{2}.\cos\alpha$ $\frac{V_m}{\sqrt2} = V$, $\frac{i_m}{\sqrt2} = I$

$\rightarrow \overline{p(t)} = P = VI.\cos\alpha$ (توان حقیقی مدار در این روش توان متوسط است.)

حوزه فازور: (روش دوم تحلیل مدارهای الکتریکی با منابع سینوسی) (برای تحلیل مدار در حالت ماندگار)

$v(t) = V_m\cos\omega t \Rightarrow \vec{V} = V_m e^{j\omega t} = V_m e^{j0} = V_m\angle 0$

$i(t) = i_m\cos(\omega t-\alpha) \longrightarrow \vec{i} = i_m e^{j(\omega t-\alpha)} \longrightarrow \vec{i} = i_m e^{-j\alpha} = i_m\angle -\alpha$



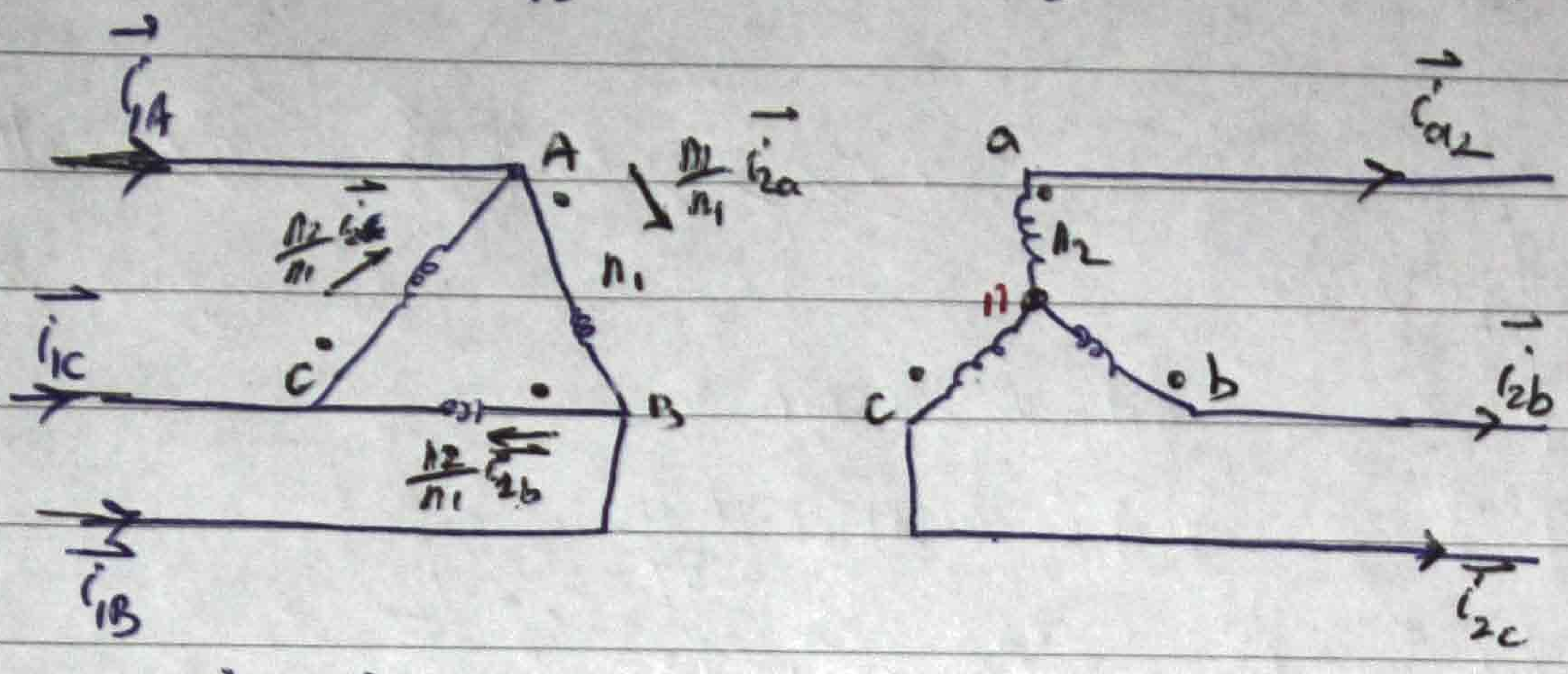
تعریف توان در حوزه فازور $\vec{S} = \frac12\vec{V}.\vec{i}^* = \frac12 V_m.i_m e^{j0}.e^{j\alpha}$

$= \underbrace{\frac12 V_m i_m\cos\alpha}_{} - j\underbrace{\frac12 V_m i_m \sin\alpha}_{}$

توان حقیقی (دقیقاً برابر با توان متوسط در حوزه زمان)   توان موهومی (راکتیو)

توان راکتیو در حوزه فازور تعریف می‌شود و فاقد مقدار فیزیکی و یا وجود فیزیکی است.

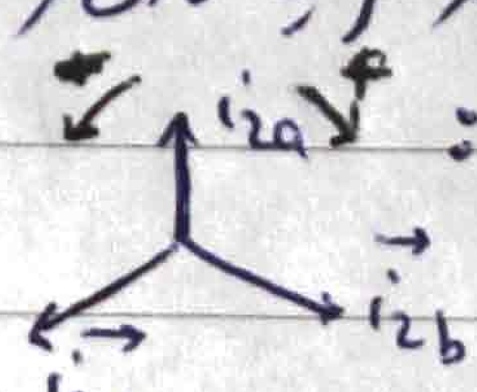
در حوزه قدرت ما از رابطه $\vec{S} = \frac{1}{2}\vec{V}\cdot\vec{i}^*$ استفاده می‌کنیم (چرا؟)

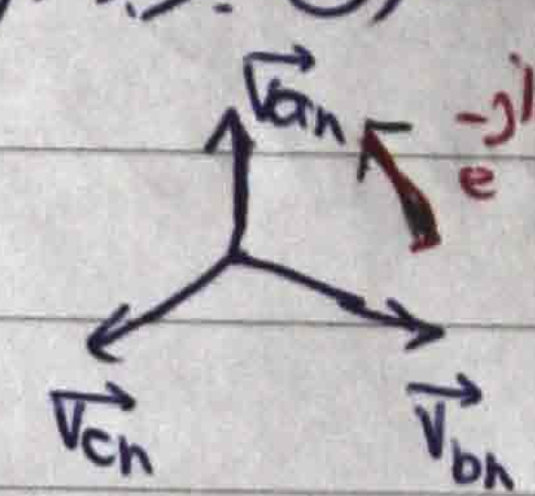


* برای یک ترانسفورماتور تحقیق زیر روابط ولتاژ و جریان را در سمت اولیه و ثانویه بدست آورید. (حوزه فازور)

$(\vec{i}_{2a}, \vec{i}_{1A})$? و $(\vec{V}_{ab}, \vec{V}_{AB})$?

با فرض اینکه ترانسفورماتور در شرایط متعادل و متقارن بهره‌برداری شود:





KCL: A $\Rightarrow$

$$\vec{i}_{1A} = \frac{n_2}{n_1}\left(\vec{i}_{2a} - \vec{i}_{2c}\right) = \frac{n_2}{n_1}\vec{i}_{2a}\left(1 - e^{+j120^\circ}\right)$$

پس $\Longrightarrow$ $\boxed{\dfrac{\vec{i}_{1A}}{\vec{i}_{2a}} = \dfrac{n_2}{n_1}\left(1 - e^{j120^\circ}\right)}$ a

$$\vec{V}_{ab} = \vec{V}_{an} - \vec{V}_{bn} = \frac{n_2}{n_1}\vec{V}_{AB} - \frac{n_2}{n_1}\vec{V}_{AB}e^{-j120} = \frac{n_2}{n_1}\vec{V}_{AB}\left(1 - e^{-j120}\right)$$

$\Longrightarrow$ $\boxed{\dfrac{\vec{V}_{ab}}{\vec{V}_{AB}} = \dfrac{n_2}{n_1}\left(1 - e^{-j120^\circ}\right)}$ a^*

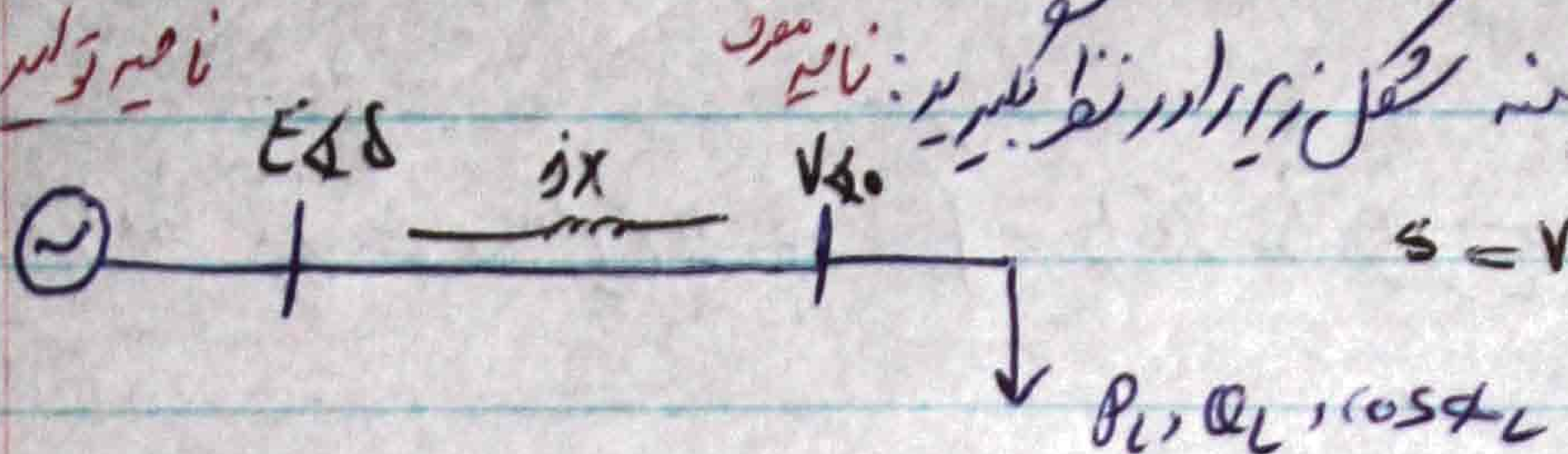
در ترانسفورماتور سه فاز با ولتاژ و جریان خط سر و کار داریم پس:

$$\frac{\vec{V}_{ab}}{\vec{V}_{AB}} = \left(\frac{\vec{i}_{1A}}{\vec{i}_{2a}}\right)^* \longrightarrow \vec{V}_{ab}\,\vec{i}_{2a}^{\,*} = \vec{V}_{AB}\,\vec{i}_{A}^{\,*}$$

به این دلیل از رابطه $\frac{1}{2}\vec{V}\cdot\vec{i}^*$ استفاده می‌کنیم.

کنترل توان راکتیو و ولتاژ :

مثال: سیستم قدرت ساده دو شینه شکل زیر را در نظر بگیرید:



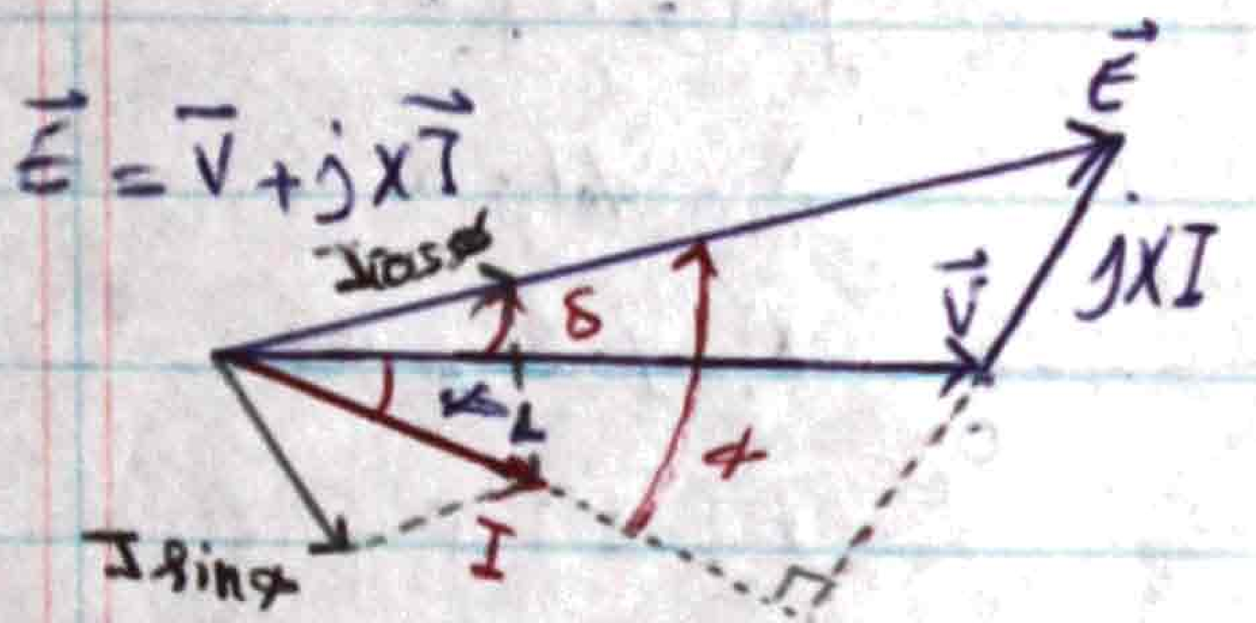
$S = V \cdot I^*$ (به راکتور نگاه کنیم اندازه است V^2)

$$\vec{E} = \vec{V} + jX\vec{I} = V + jX\left(\frac{S_L}{V}\right)^* = \vec{V} + jX\,\frac{P_L - jQ_L}{\vec{V}^*}$$

$$\longrightarrow \vec{E}\cdot\vec{V}^* = V^2 + jX(P_L - jQ_L) \longrightarrow (E\cos\delta + jE\sin\delta)\cdot V = V^2 + jXP_L + XQ_L$$

$$\begin{cases} P_L = \dfrac{E\cdot V}{X}\sin\delta \\ Q_L = \dfrac{V(E\cos\delta - V)}{X} \quad (*) \end{cases}$$

معادلات پخش بار برای سیستم دو شینه



ϕ_L زاویه بین V, I ، $\cos\phi$ زاویه بین E, I

$P = E\cdot I\cdot\cos\phi$

$Q = E\cdot I\cdot\sin\phi$

رابطه ولتاژ و توان راکتیو $\rightarrow (*) \rightarrow V^2 - E\cos\delta\cdot V + Q_L\cdot X = 0$

با فرض اینکه δ کوچک باشد ($\cos\delta = 1$)

در نتیجه $\longrightarrow V^2 - E\cdot V + Q_L\cdot X = 0$ (معادله درجه 2)

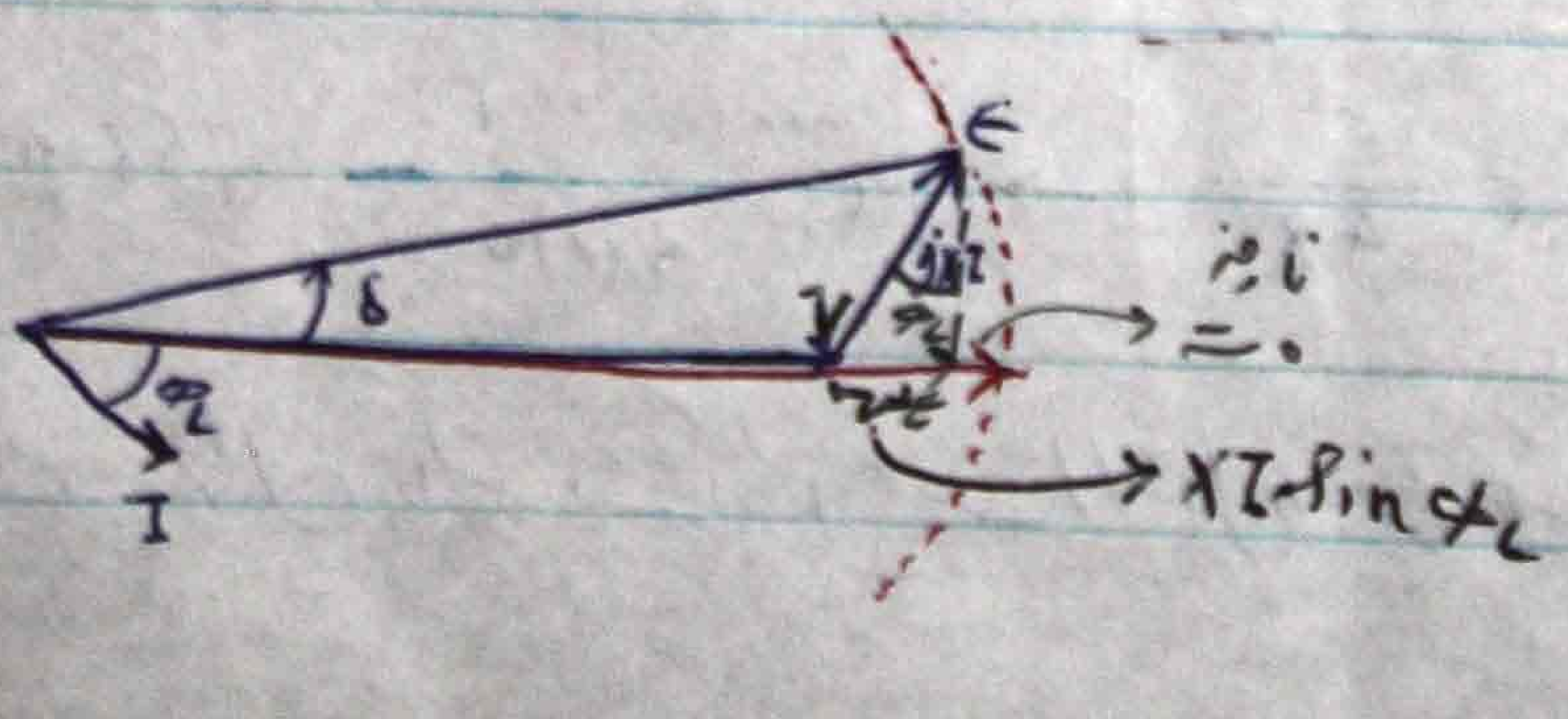
$$\Longrightarrow \boxed{V = \frac{E}{2} \pm \frac{\sqrt{E^2 - 4Q\cdot X}}{2}}$$

قابل قبول نیست (چرا؟)

$$\longrightarrow V = f(\overset{\text{ثابت}}{E}, Q_L, \overset{\text{ثابت}}{X})$$

اگر ولتاژ در ناحیه تولید ثابت و مشخصات تولید را نیز ثابت فرض کنیم $\Leftarrow$ $V = g(Q_L)$

اگر زاویه δ کم باشد



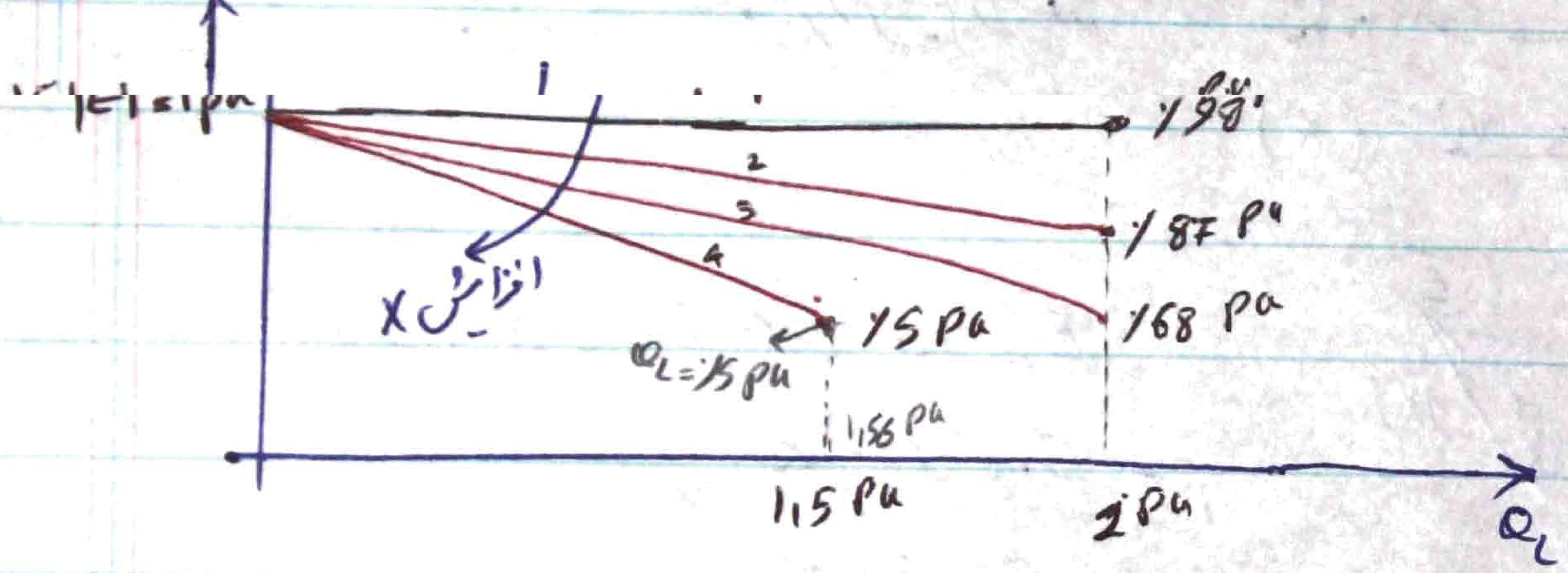
$$E = V + XI\sin\phi_L \xrightarrow{\text{ضرب}\ \times V} E\cdot V = V^2 + X(\overbrace{VI\sin\phi_L}^{Q_L}) \Rightarrow E\cdot V = V^2 + XQ_L$$

برابر با رابطه قبلی شد. به این نتیجه رسیدیم که ولتاژ در راستای مصرف کننده وابسته به توان راکتیو است.

جلسه دوم ۹۰/۷/۱۸

رابطه افت ولتاژ در سمت مصرف برحسب توان انتقالی کوتاه در شکل معرفی شده.

می‌خواهیم منحنی ولتاژ را برحسب Q_L رسم کنیم:



روش: $X, E = cte$

$|E| = 1$ p.u

$X_1 = 0/01$ p.u

$X_2 = 0/06$ p.u

$X_3 = 0/11$ p.u

$X_4 = 0/16$ p.u

* حداکثر Q_L که از ناحیه تولید به سمت ناحیه مصرف قابل انتقال است همواره مقداری است محدود

* محدودیت انتقال حداکثر Q به مصرف بواسطه محدودیت در تولید توان راکتیو در سمت ناحیه تولید نیست. بلکه بواسطه مشخصه خط انتقال اتصال بین ناحیه تولید و مصرف است.

در مسیر خطوط، خطوط انتقال بلند با X زیاد را داریم. $X\uparrow \Rightarrow \cancel{\Delta V}\uparrow$

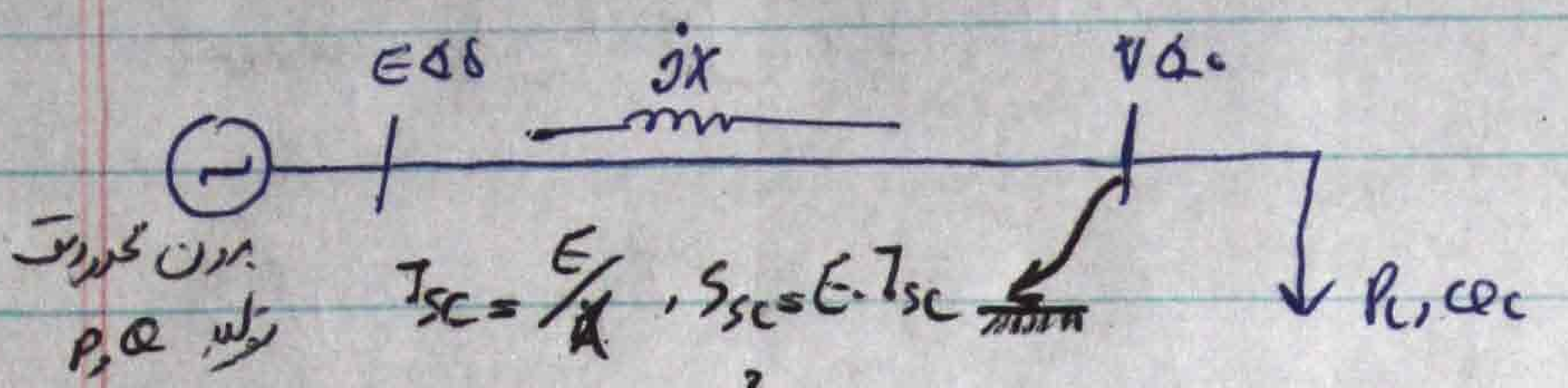
توجه: نقاط روی منحنی $|V|$ برحسب Q_L قابل رسم است که $\sqrt{E^2 - 4Q_LX} \geq 0$ باشد. پس:

$$E^2 - 4Q_LX \geq 0 \longrightarrow \boxed{Q_L \leq \frac{E^2}{4X}} \longrightarrow Q_L^{max} = \frac{1}{4\times 0/16} = 1/56 \text{ p.u}$$

* تامین توان راکتیو در شبکه به صورت (انتقال) حتی الامکان به صورت محلی باید انجام پذیرد.

$$V^2 - E\cdot V + Q_L\cdot X = 0 \longrightarrow V(E-V) = X\cdot Q_L \longrightarrow \frac{E-V}{V} = \frac{X\cdot Q_L}{V^2}$$

بازدن $\Rightarrow V^2 \simeq E^2$ اگر $X \ll 1 \longrightarrow \frac{E-V}{V} \simeq \frac{X Q_L}{E^2}$

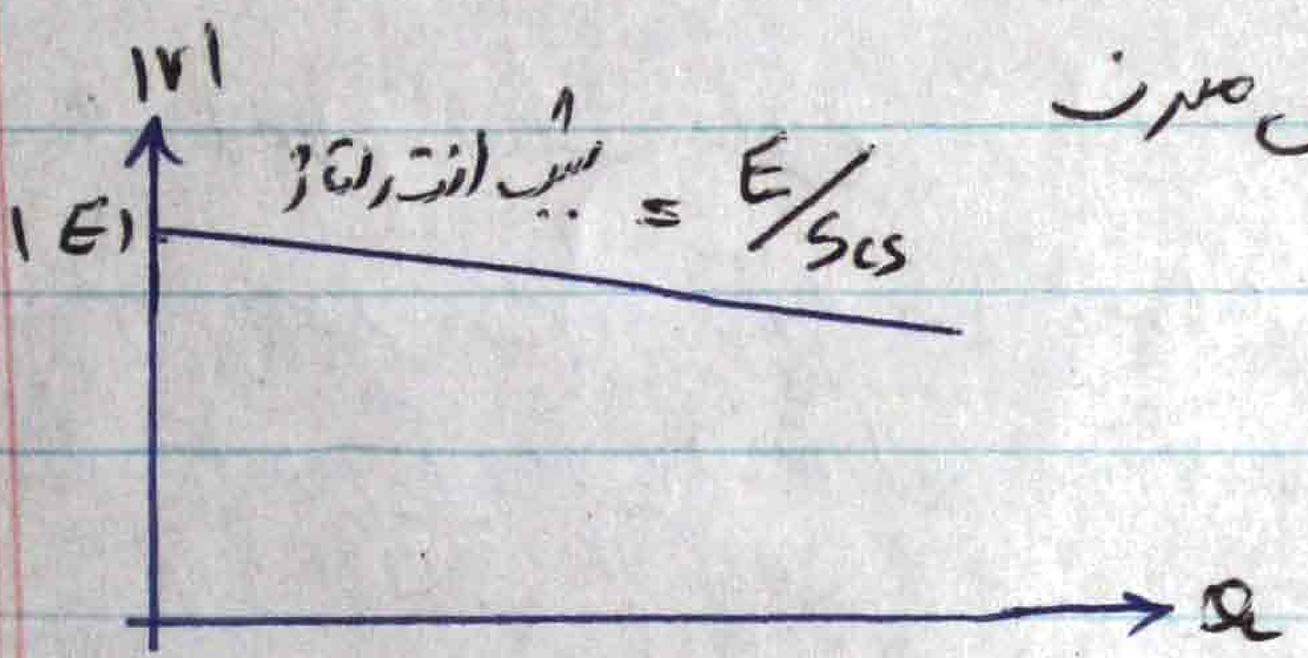


$I_{SC} = E/X \;,\; S_{SC} = E\cdot I_{SC}$

$$,\; S_{SC} = \frac{E^2}{X} \;*$$

$$* \xrightarrow{\text{در تقریب}} \frac{E-V}{V} = \frac{Q_L}{S_{CS}} \longrightarrow \boxed{V \simeq E\left(1 - \frac{Q_L}{S_{SC}}\right)}$$

رابطه افت ولتاژ در جهت قدرت برحسب توان اتصال کوتاه در شین مصرف



$$P_L = \frac{V\cdot E}{X}\sin\delta \longrightarrow \left[\sin\delta = \frac{P_L\cdot X}{V\cdot E}\right.$$

$$Q_L = \frac{VE\cos\delta - V^2}{X} \longrightarrow \left[\cos\delta = \frac{Q_L\cdot X + V^2}{V\cdot E}\right.$$

$,\; \sin^2\delta + \cos^2\delta = 1$

$$\Rightarrow 1 = \frac{P_L^2 X^2}{(VE)^2} + \frac{(Q_L X + V^2)^2}{(VE)^2} \longrightarrow P_L^2 + \left(Q_L + \frac{V^2}{X}\right)^2 = \left(\frac{EV}{X}\right)^2$$

$$\Rightarrow \frac{1}{X^2}\underline{V}^4 + \left(\frac{2Q_L}{X} - \frac{E^2}{X^2}\right)\underline{V}^2 + P_L^2 + Q_L^2 = 0$$

$$\Rightarrow V^2 = \left(\frac{E^2}{2} - Q_L X\right) \pm X\sqrt{\frac{E^4}{4X^2} - P_L^2 - Q_L\frac{E^2}{X}}$$

$$\Delta \geq 0 \longrightarrow P_L^2 + Q_L\frac{E^2}{X} \leq \frac{E^4}{4X^2} \quad,\quad S_{CS} = \frac{E^2}{X}$$

$$\Rightarrow P_L^2 + Q_L S_{SC} \leq \left(\frac{S_{CS}}{2}\right)^2$$

اگر $P_L = 0$ $\quad Q_L \leq \frac{S_{sc}}{4}$

اگر $Q_L = 0$ $\quad P_L \leq \frac{S_{sc}}{2}$

در یک سیستم انتقال توان هم محدودیت برای انتقال توان راکتیو برای خطوط وجود دارد و هم محدودیت برای انتقال توان اکتیو

جبران سازی بار:

مقصود از جبران سازی بار (مصرف کننده) این است که بخشی یا تمامی توان راکتیو مورد نیاز بار را توسط جبران کننده در محل تامین کنیم.

بطور کلی اهداف اصلی (اولیه) جبران سازی بار:

1- اصلاح ضریب توان

2- بهبود ضریب رگولاسیون ولتاژ (تنظیم ولتاژ)

3- متعادل کردن (متعادل سازی بار)

اهداف سراسری تامین توان راکتیو در شبکه‌های انتقال:

1- کاهش تلفات در سراسر شبکه قدرت (تلفات: تلفات اکتیو و راکتیو)

2- بهبود پروفیل ولتاژ

3- آزاد سازی ظرفیت اشغال شده خطوط و جلوگیری یا کاهش جریان‌های چرخشی (گردشی) در شبکه

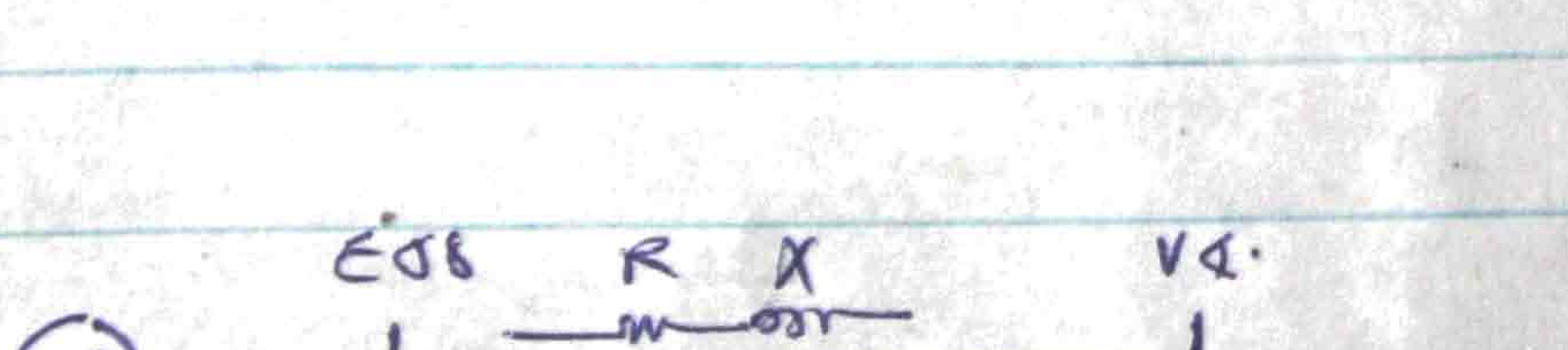
4- افزایش ورود توان راکتیو در شبکه با بهره‌برداری مناسب از منابع توان راکتیو در شبکه

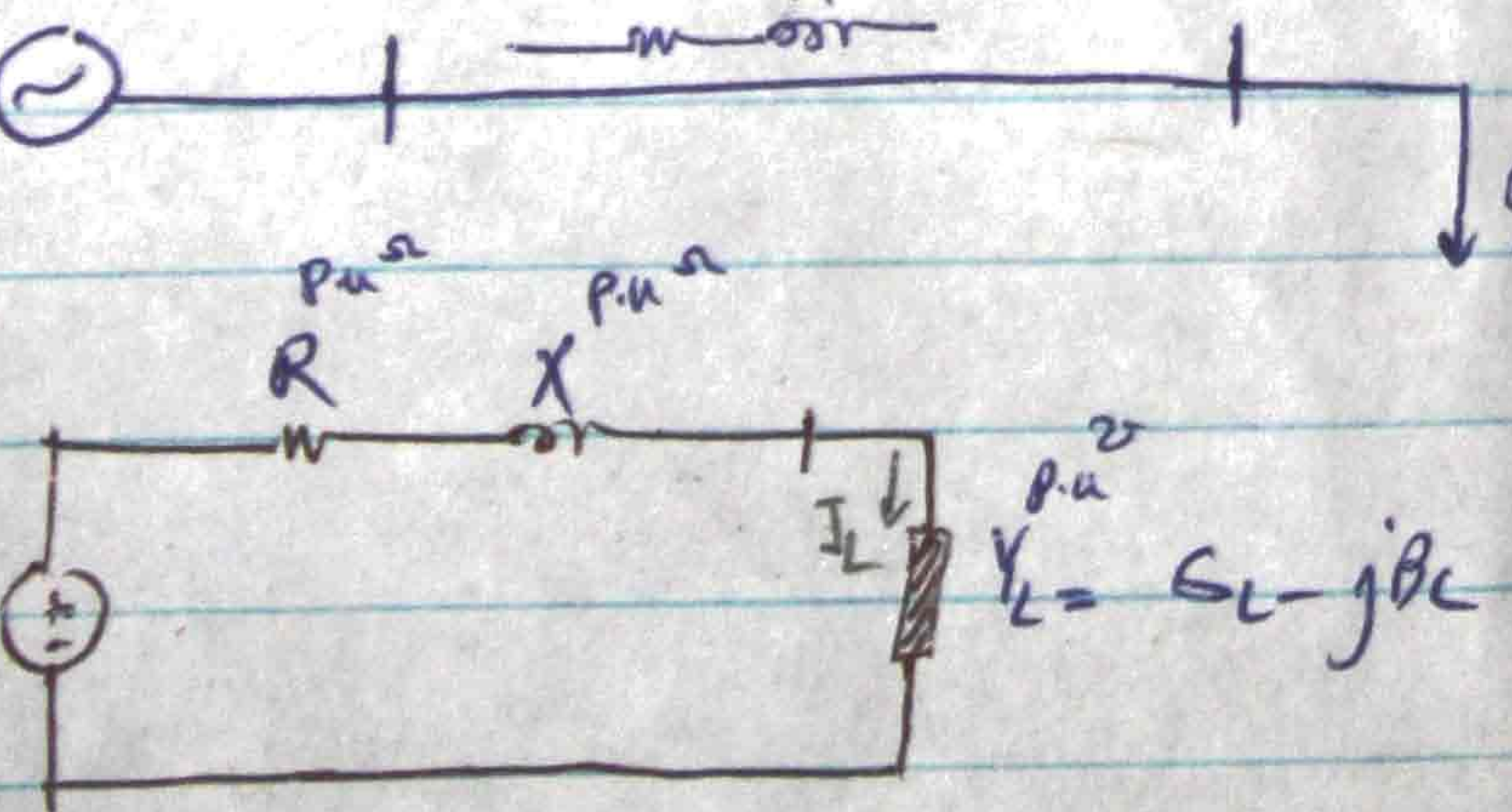
5- افزایش اهمیت و حاشیه پایداری ولتاژ در شبکه‌های قدرت.

اهداف جبران سازی محلی:

اصلاح ضریب قدرت بار:

P_L ، Q_L ، V معلوم است



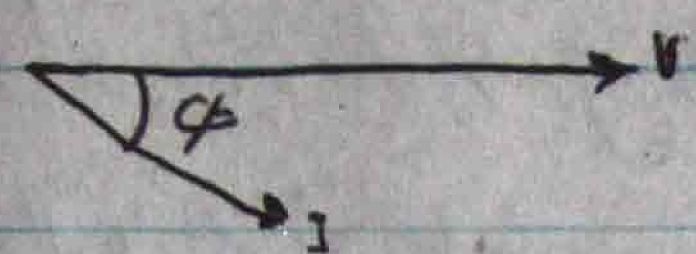


$$\vec{I}_L = \vec{V}(G_L - jB_L) = VG_L - jVB_L = I_r - jI_x$$

توان راکتیو منتقل شده قبل از جبران سازی

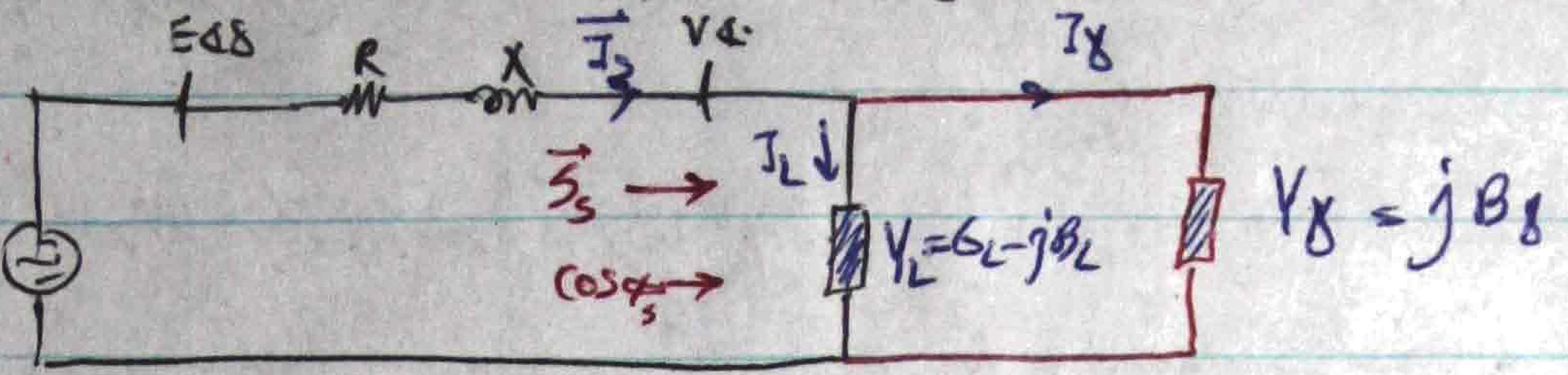
$$S_L = V_L \times I_L^* = V(VG_L + jVB_L) = P_L + jQ_L = V^2G_L + j\overbrace{V^2B_L}$$

یک جبران ساز موازی به مجموعه اضافه می کنیم



$$\cos\phi = \frac{P_L}{S}$$

ضریب قدرت بار

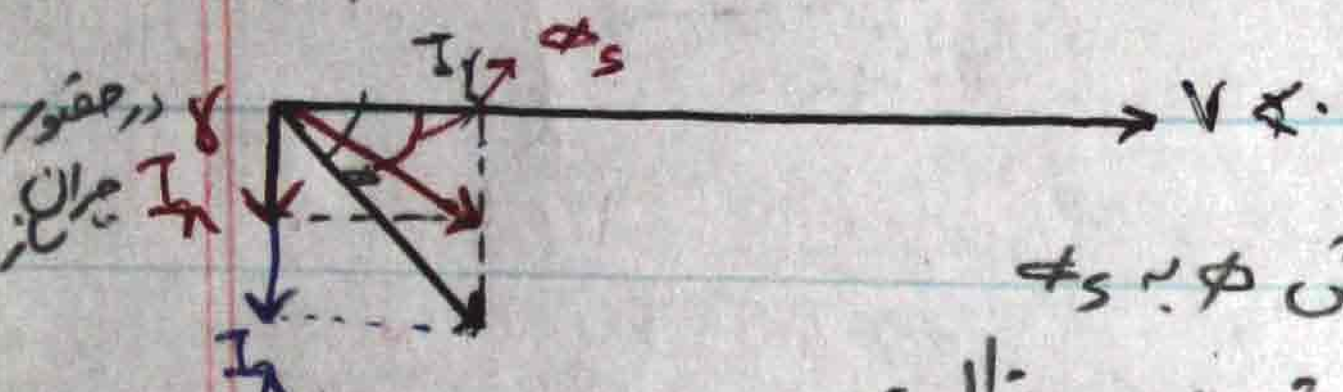


$$\vec{I}_S = \vec{I}_L + \vec{I}_\gamma \quad , \quad \vec{I}_S = V(G_L - jB_L) + V(jB_\gamma)$$

$$\to \vec{I}_S = V(G_L - j(B_L - B_\gamma)) \to S_S = V^2(G_L + \underline{j(B_L - B_\gamma)})$$

توان راکتیو منتقل شده بعد از جبران سازی بار

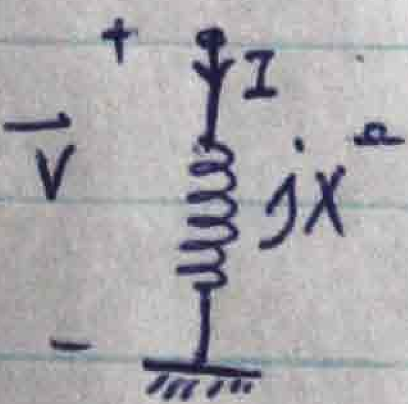
$$\cos\phi_s = \frac{V^2G_L}{\sqrt{(V^2G_L)^2 + (V^2(B_L - B_\gamma))^2}}$$



کاهش ϕ به ϕ_s

افزایش ضریب توان

- تولید و مصرف توان راکتیو در عناصر سلفی و خازنی:

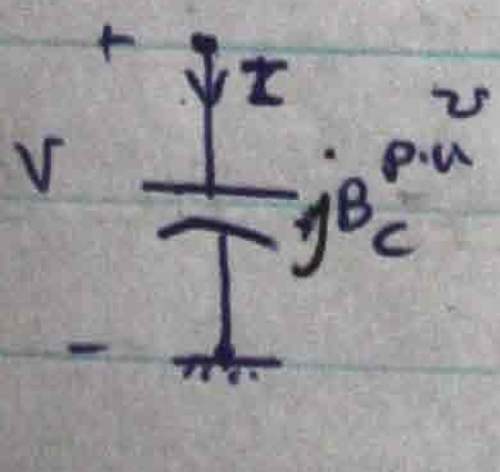


توان مصرفی در سلف

$$S = \vec{V}\vec{I}^*$$

$$V = jX\vec{I}$$

$$\to S = \vec{V}\cdot\frac{\vec{V}^*}{-jX} = j\frac{V^2}{X} = jB_LV^2$$



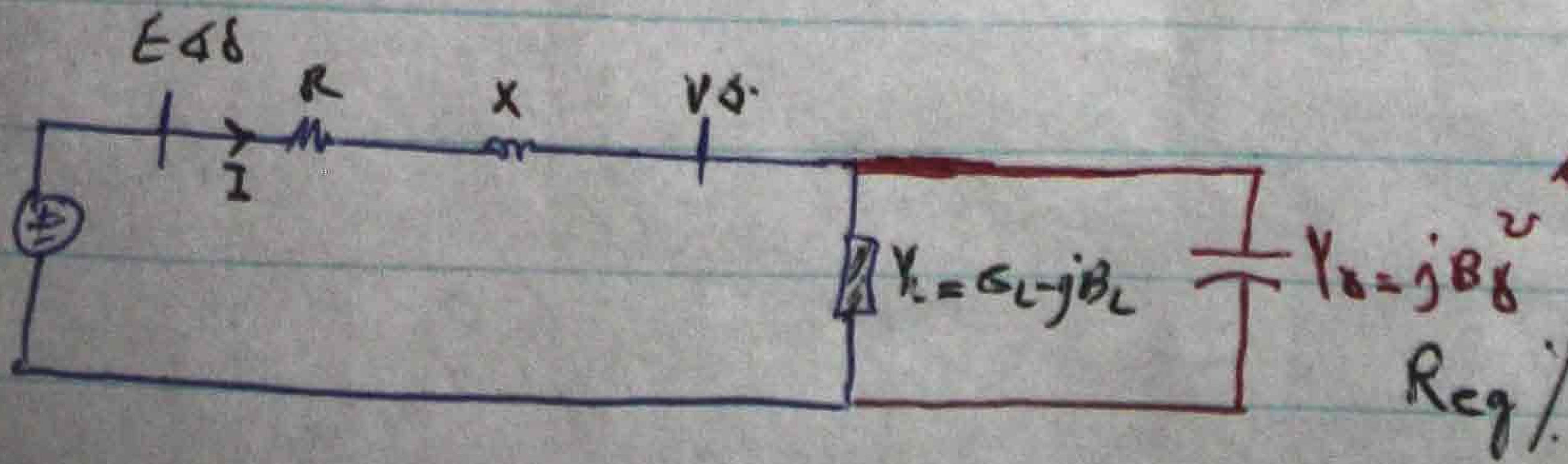
$$S = \vec{V}\vec{I}^*$$

$$I = jB\vec{V}$$

$$\to S = V(-jB_c)\vec{V}^* = -jV^2B$$

توان مصرفی در خازن

$$S = -jV^2B_c$$



2- بهبود رگولاسیون یا بهبود دادن رگ

$$Reg\% = \frac{|E| - |V|}{|V|}$$

$$\Delta\vec{V} = \vec{E} - \vec{V} = (R + jX)\cdot\vec{I} \quad , \quad I = \frac{P_L - jQ_L}{V}$$

$$\Rightarrow \Delta\vec{V} = \frac{R\cdot P_L + XQ_L}{V} + j\,\frac{XP_L - RQ_L}{V} = \Delta V_r + j\,\Delta V_x$$

بردار افت ولتاژ قبل از جبران‌سازی توان راکتیو در محل

یک خازن موازی به بار اضافه کردیم :

توان راکتیو تولیدی توسط جبران کننده

$$S_\gamma = 0 + jQ_\gamma = +jB_\gamma V^2$$

بردار حقیقی

$$\vec{E} - \vec{V}_{new} \Rightarrow \Delta\vec{V}_{new} = \frac{RP_L + X(Q_L - Q_\gamma)}{V_{new}} + j\,\frac{XP_L - R(Q_L - Q_\gamma)}{V_{new}}$$

بردار افت ولتاژ پس از جبران‌سازی توان راکتیو در محل

$$① \Rightarrow \boxed{|E|^2 = \left[V_{new} + \frac{RP_L + X(Q_L - Q_\gamma)}{V_{new}}\right]^2 + \left[\frac{XP_L - R(Q_L - Q_\gamma)}{V_{new}}\right]^2}$$

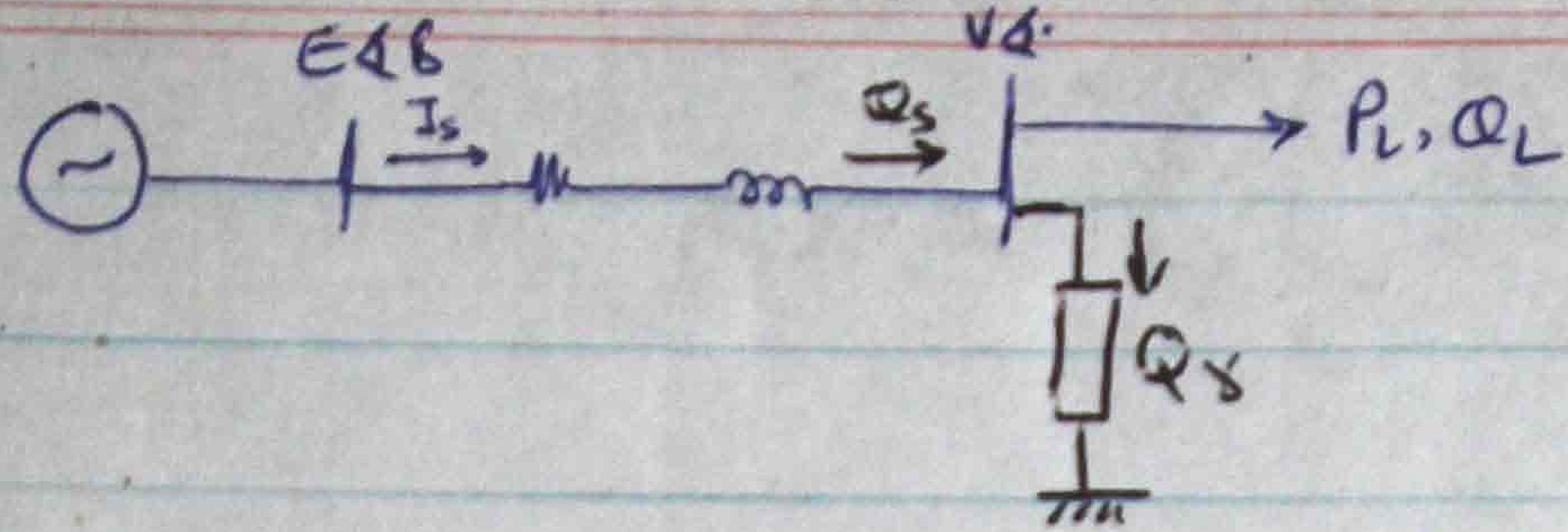
$$Q_\gamma \xrightarrow{①} V_{new}$$

اگر $V \longrightarrow V_{new}$ ، $Q_\gamma = ?$

۰/۹۵ ، 1 pu

سوال: اگر $\cos\alpha = 1$ را بگیریم آیا باز هم این می‌شود که دامنه ولتاژ $V=1$ بشود؟
آیا ممکن است با تأمین توان راکتیو هم در اهداف اصلاح ضریب توان و اصلاح دامنه ولتاژ پیروز بود؟

جلسه سوم ۹۰,۷,۲۵



$$|E^2| = \left[V_{new} + \frac{P_L R + X Q_s}{V_{new}}\right]^2 + \left[\frac{X P_L - R Q_s}{V_{new}}\right]^2$$

آیا با هم $\cos\varphi_s = 1 \xrightarrow{?} |E| = |V|$

اگر $\cos\varphi_s = 1 \Longrightarrow Q_\gamma + Q_L = 0$, KVL: $\vec{E} = \vec{V} + (R + jX).I_s$

$\rightarrow I_s = \dfrac{P_L}{\vec{V}_{new}}$, $\vec{E} = \vec{V} + (R+jX)\dfrac{P_L}{\vec{V}^*} \Longrightarrow \vec{E} - \vec{V}_{new} = \vec{DV} = (R+jX)\dfrac{P_L}{V_{new}}$

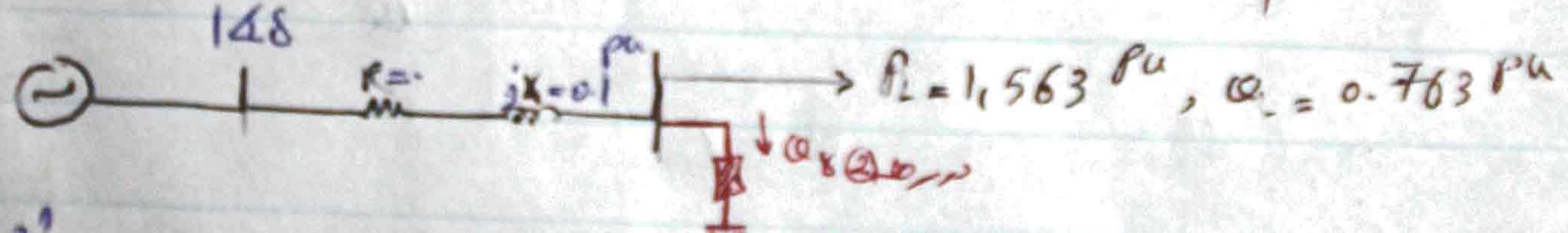
مثال: یک قدرت ساده دو شینه شکل زیر مفروض است:

① ولتاژ بار در شین مصرف محاسبه کنید.

② میزان توان راکتیو لازم برای آنکه ضریب قدرت بار به یک برسد!

در این حالت ولتاژ در شین مصرف کننده چقدر است؟

③ میزان توان راکتیو لازم در شین مصرف برای آنکه دامنه ولتاژ در آن به مقدار $V = 1^{pu}$ برسد!



① ولتاژ شین بار: $\begin{cases} P_L = \dfrac{EV}{X}\sin\delta \\ Q_L = \dfrac{V(E\cos\delta - V)}{X} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} 1.563 = \dfrac{1 \cdot V}{0.1}\sin\delta \\ 0.763 = \dfrac{V(\cos\delta - V)}{0.1} \end{cases}$ پس از حل $\longrightarrow$

$\delta = 10^\circ$, $V = 0.9^{pu}$

② اگر $\cos\varphi_s = 1 \rightarrow Q_\gamma + Q_L = 0 \rightarrow Q_L = -0.763\ pu$

علامت منفی یعنی توان تولید کنیم

$1.563 = \dfrac{1 \times V'}{0.1}\sin\delta' \longrightarrow 1.563 = \dfrac{1}{2 \times 0.1}\sin 2\delta' \longrightarrow \delta' = 18.21/2$

$0 = \dfrac{V'(\cos\delta' - V')}{0.1} \Longrightarrow V' = \cos\delta'$

$V' = \cos\delta' = 0.95$

③ تمرین بررسی

⑤

$1.563 = \frac{1\times 1}{0.1}\cdot \sin\delta''$

$Q_S = \frac{1\times(1.\cos\delta''-1)}{0.1} \longrightarrow \delta'' = 8.92^\circ$, $Q_S = Q_\gamma + Q_L = -0.121^{pu}$

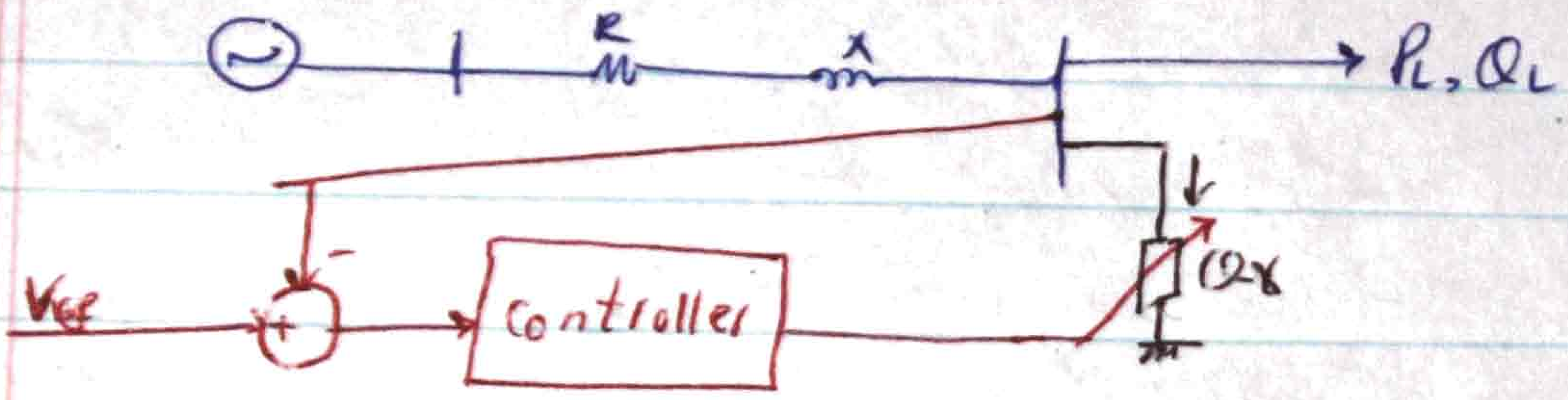
$\therefore\ Q_\gamma = -0.121 - 0.763 = 0.88^{pu}$

تعیین ظرفیت جبران‌سازی توان راکتیو (مهندسی):

از گذشته $\frac{E-V}{V} \simeq \frac{Q_S}{S_{sc}}$, $\Delta V \simeq V\left(\frac{Q_S}{S_{sc}}\right)$, $V \simeq \left(1-\frac{Q_S}{S_{sc}}\right)E$

فرض $S_{sc} \gg S$

$\rightarrow V \simeq \left(1-\frac{Q_\gamma+Q_L}{S_{sc}}\right)E \longrightarrow$ اگر $Q_\gamma + Q_L = 0 \longrightarrow V = E$ در حالت ss



دو روش برای این منظور وجود دارد:

$\{\ Q_\gamma$:

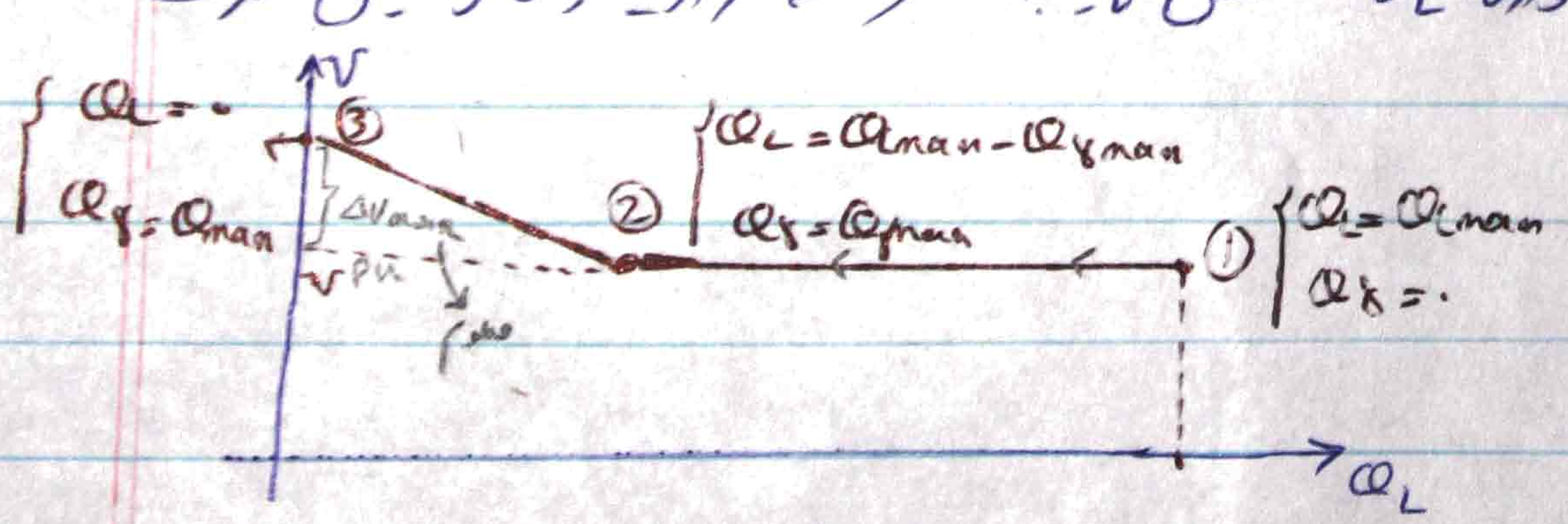
الف) جبران سلفی:

مفروضات: ① فرض کنید بار و جبران کننده، هر دو دارای خاصیت سلفی باشند

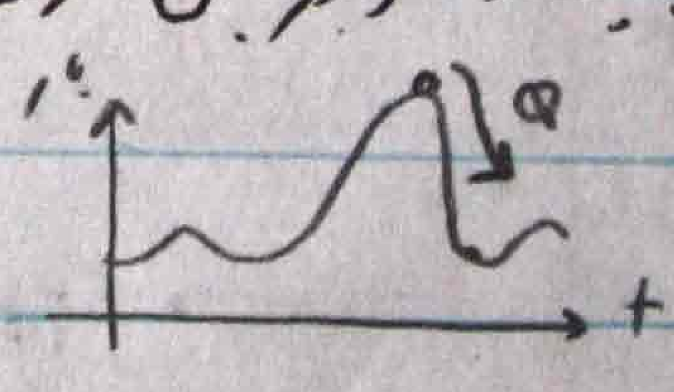
② $0 < Q_L < Q_{L max}$, ④ $Q_{\gamma max} < Q_{L max}$

③ $0 < Q_L < Q_{\gamma max}$

∴ در حین تنظیم، باید فرض کنید که در نقطه کار اولیه $Q_L = Q_{L max}$ و $Q_\gamma = 0$ ، نقطه کار سیستم تا بودار تثبیت کننده که در آن همواره Q_L کاهش می‌یابد. در نقطه کار اولیه ولتاژ شین مصرف کننده V فرض می‌شود



هدف: تثبیت ولتاژ در شین مصرف



⇐ تا جایی Q_γ، Q_L را جبران می‌کند که به حد جبران‌ساز برسد چون مقدار $Q_{\gamma max}$ مقدار محدود است.

∴ اگر ΔV_{max} را داشتیم: بسنجیم چقدر جبران‌سازی کنیم که تغییرات ولتاژ از ΔV_{max} بیشتر نشود؟

$$\text{تغییرات جزئی} \qquad * \Delta V = -E\left(\frac{\Delta Q_\gamma + \Delta Q_L}{S_{sc}}\right) \Rightarrow \Delta V = -E\,\frac{\Delta Q_L}{S_{sc}}$$

* دیواسیون ماکزیمم

$$V_3 - V_2 = \Delta V = -E\,\frac{0 - (Q_{L\max} - Q_{\gamma\max})}{S_{sc}} \Rightarrow \Delta V \cdot \frac{S_{sc}}{E} = Q_{L\max} - Q_{\gamma\max}$$

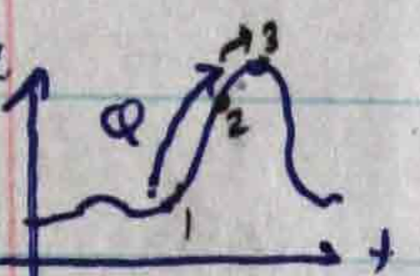
$$\longrightarrow \boxed{Q_{\gamma\max} = Q_{L\max} - \frac{S_{sc}}{E}\cdot \Delta V_{\max}}$$

$Q_\gamma \frac{1}{T}$:

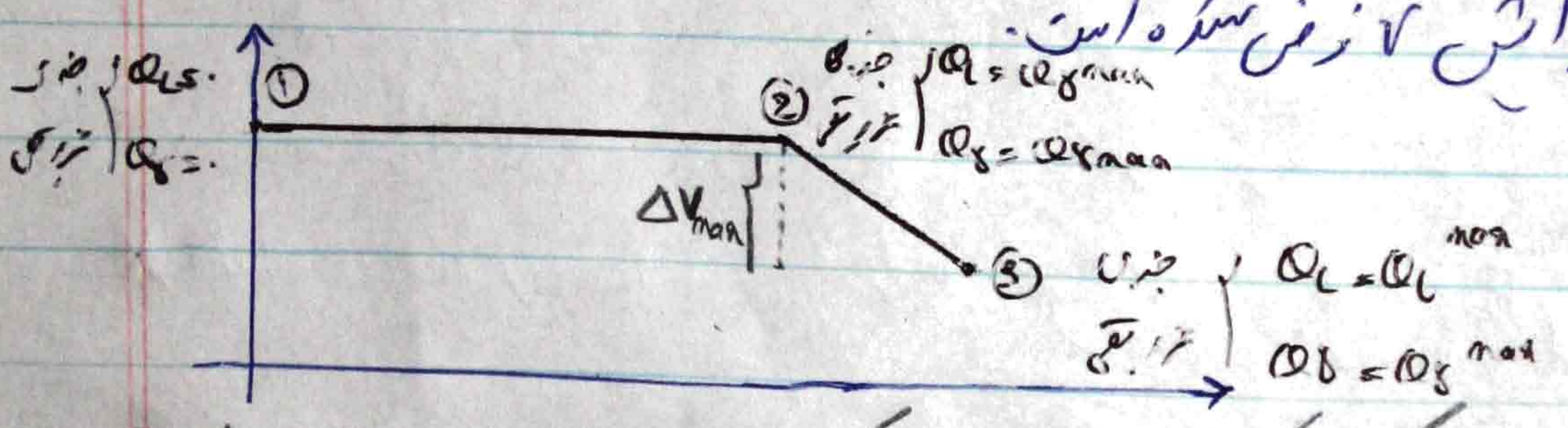
ب. جبران خازنی:

مفروضات: ① بار مصرفی دارای خاصیت سلفی است

② $0 < Q_\gamma < Q_{\gamma\max}$ ③ $0 < Q_L < Q_L^{\max}$ ④ $Q_\gamma^{\max} < Q_L^{\max}$



سناریوی تغییر بار: در این شرایط فرض بر آن است که بار مصرفی در حال افزایش می‌باشد و ولتاژ بار قبل از افزایش V فرض شده است.



با بالا رفتن Q_L که زیاد می‌شود از Q_γ تزریق شبکه جذب را جبران می‌کند پس ولتاژ ثابت می‌ماند تا نقطه ② در نقطه ② $Q_L = Q_{\gamma\max}$ می‌رسد از اینجا به بعد Q_L افزایش پیدا کند چون محدود Q_γ را داریم ولتاژ افت می‌کند

$$V = E\left(1 - \frac{\overset{\text{جذبی}}{Q_\gamma} + \overset{\text{جذبی}}{Q_L}}{S_{sc}}\right) \longrightarrow \Delta V = -E\left(\frac{\Delta Q_L + \cancel{\Delta Q_\gamma}}{S_{sc}}\right)$$

در اول فرض شده جذبی

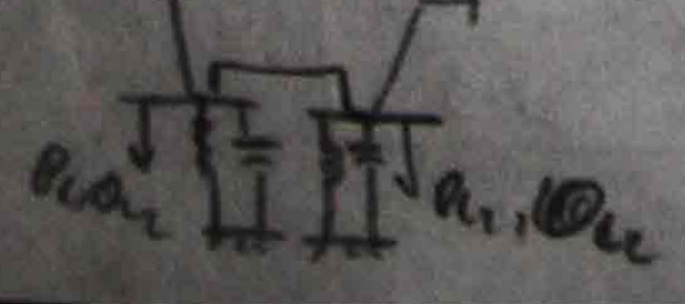
بین نقطه $\underbrace{3,2}$

$$\xrightarrow{V_3 - V_2} \Delta V = -E\left(\frac{Q_L^{\max} - Q_\gamma^{\max}}{S_{sc}}\right) \longrightarrow -\frac{S_{sc}}{E}\cdot \Delta V = Q_L^{\max} - Q_\gamma^{\max} \longrightarrow Q_\gamma = Q_L^{\max} + \frac{S_{sc}}{E}\cdot \Delta V_{\max}$$

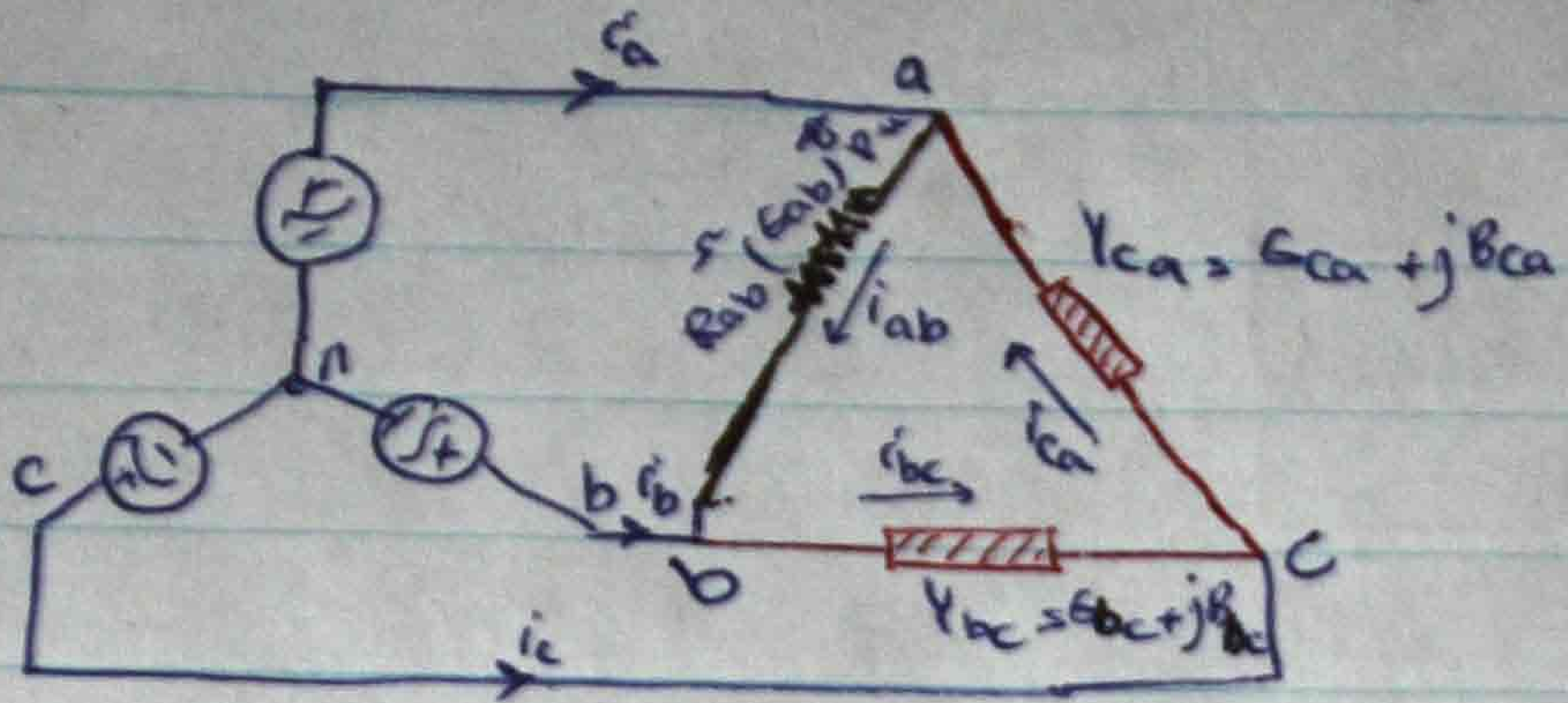
عدد منفی

* در وضعیت های فرض شده که تزریق یا جذب توان راکتیو به صورت پیوسته [illegible] ولی در عمل به دلیل استفاده از بانک های خازنی کنترل توان راکتیو و ولتاژ شین به صورت گسسته تغییر می‌کند.

(تمرین) مثال: شبکه قدرت در شکل زیر را در نظر بگیرید. چنانچه بانک خازنی (الف) متصل به شین بار به صورت گسسته تغییر کند، منحنی ولتاژ بر حسب تغییر توان راکتیو جبران را با انضمام ظرفیت مورد نیاز جبران سازی محاسبه کنید. (حداکثر تعداد یا تغییر ظرفیت توان راکتیو ده پله)



جبران سازی بارهای نامتعادل در شبکه‌های سه فاز با جبران سازهای توان راکتیو:

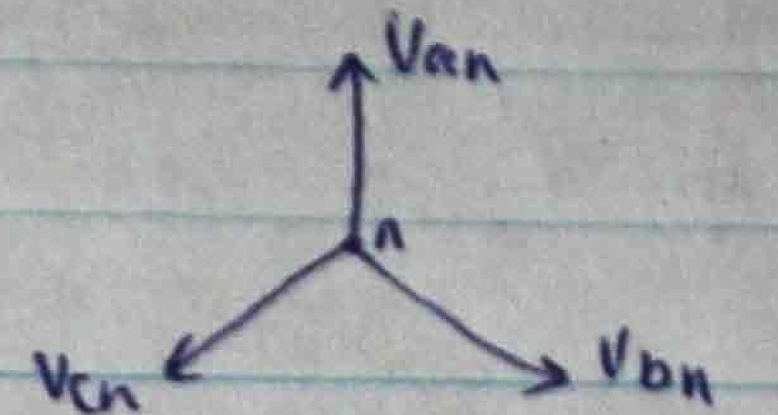


بار مورد R_{ab} بار نامتعادل است و ما به آن کار داریم

در منظور که قطعا توان راکتیو از شبکه جذب

می‌کند می‌توان بار را متعادل کرد و تعادل

* با گذاشتن مقاومت تلفات شبکه را بالا می‌بریم



در حالت تعادل $i_a = -i_b$
$i_c = 0$ → شبکه سه فاز نامتعادل

عبارت i_a را بر حسب جریان‌های حلقه می‌نویسیم

$$\vec i_{ab} = (\vec V_{an} - \vec V_{bn}) \cdot G_{ab} \qquad \vec i_a = \vec i_{ab} - \vec i_{ca}$$

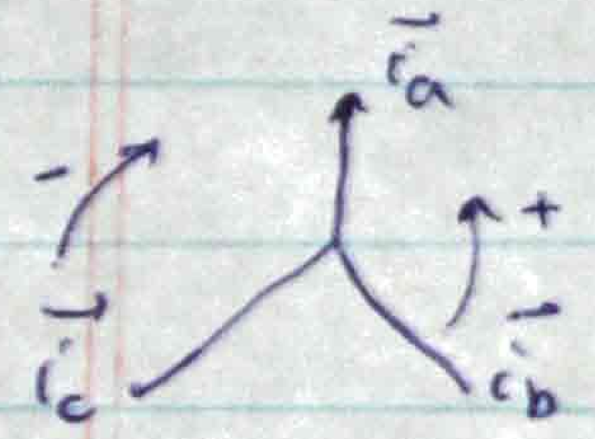
$$\vec i_{bc} = (V_{bn} - V_{cn}) \cdot \vec Y_{bc} \quad , \quad \vec i_b = \vec i_{bc} - \vec i_{ab} \implies \text{جریان‌های خط}$$

$$\vec i_{ac} = (\vec V_{cn} - \vec V_{an}) \cdot \vec Y_{ca} \qquad \vec i_c = \vec i_{ca} - \vec i_{bc}$$

$$a = -\tfrac{1}{2} + j\tfrac{\sqrt3}{2} = a^{*2}$$

$$a^2 = -\tfrac{1}{2} - j\tfrac{\sqrt3}{2} = a^*$$

* هدف: مقادیر Y_{ac} ، Y_{bc} را طوری محاسبه کنید که جریان‌های i_a, i_b, i_c متعادل گردند؟



اگر هدف متعادل کردن جریان‌های فاز باشد:

$$i_a = \vec i_b \times e^{j120} \rightarrow \vec i_{ab} - \vec i_{ca} = e^{j120}(\vec i_{bc} - \vec i_{ab}) \qquad \text{فرض:}\ e^{j120} = \vec a$$

$$i_a = \vec i_c \times e^{-j120} \rightarrow \vec i_{ab} - \vec i_{ca} = e^{-j120}(\vec i_{ca} - \vec i_{bc})$$

$$\text{(I)}\ (1+a)\vec i_{ab} = \vec a\, \vec i_{bc} + \vec i_{ca} \xrightarrow{\times a} (\overbrace{a+a^2}^{-1})\vec i_{ab} = a^2 \vec i_{bc} + a\vec i_{ca} \rightarrow$$

در معادله یکم برابرش را که بگیریم استفاده می‌کنیم:

$$\text{(II)}\ (1+a)\vec i_{ca} = \vec i_{ab} + a^2 \vec i_{bc} \qquad \rightarrow (\text{I} = \text{II})\ \text{در سیستم متعادل}$$

$$\vec V_{an} = e^{-j120} V_{bn}\ \text{(اشتباه نکن)}$$

$$\text{از (I)} \rightarrow -e^{-j120}(1 - e^{-j120})\vec V_{an} \cdot G_{ab} = e^{j120}(e^{-j120} - e^{j120})\vec V_{an} \cdot \vec Y_{bc} + (e^{j120} - 1)\vec V_{an} \cdot Y_{ca}$$

$$\rightarrow e^{-j120}(1 - e^{-j120})G_{ab} = (1 - e^{-j120})(G_{bc} + jB_{bc}) + (e^{j120} - 1)(G_{ca} + jB_{ca})$$

$$\implies j\,G_{ab} = (\tfrac{\sqrt3}{2} + \tfrac{1}{2})Y_{bc} + (-\tfrac{\sqrt3}{2} + \tfrac{1}{2})Y_{ca}$$

$$\rightarrow \begin{cases} ① & G_{ab} = \tfrac{1}{2}G_{bc} + \tfrac{\sqrt3}{2}B_{bc} - \tfrac{\sqrt3}{2}B_{ca} + \tfrac{1}{2}G_{ca} \\ ② & 0 = \tfrac{\sqrt3}{2}G_{bc} - \tfrac{1}{2}B_{bc} - \tfrac{\sqrt3}{2}G_{ca} - \tfrac{1}{2}B_{ca} \end{cases}$$

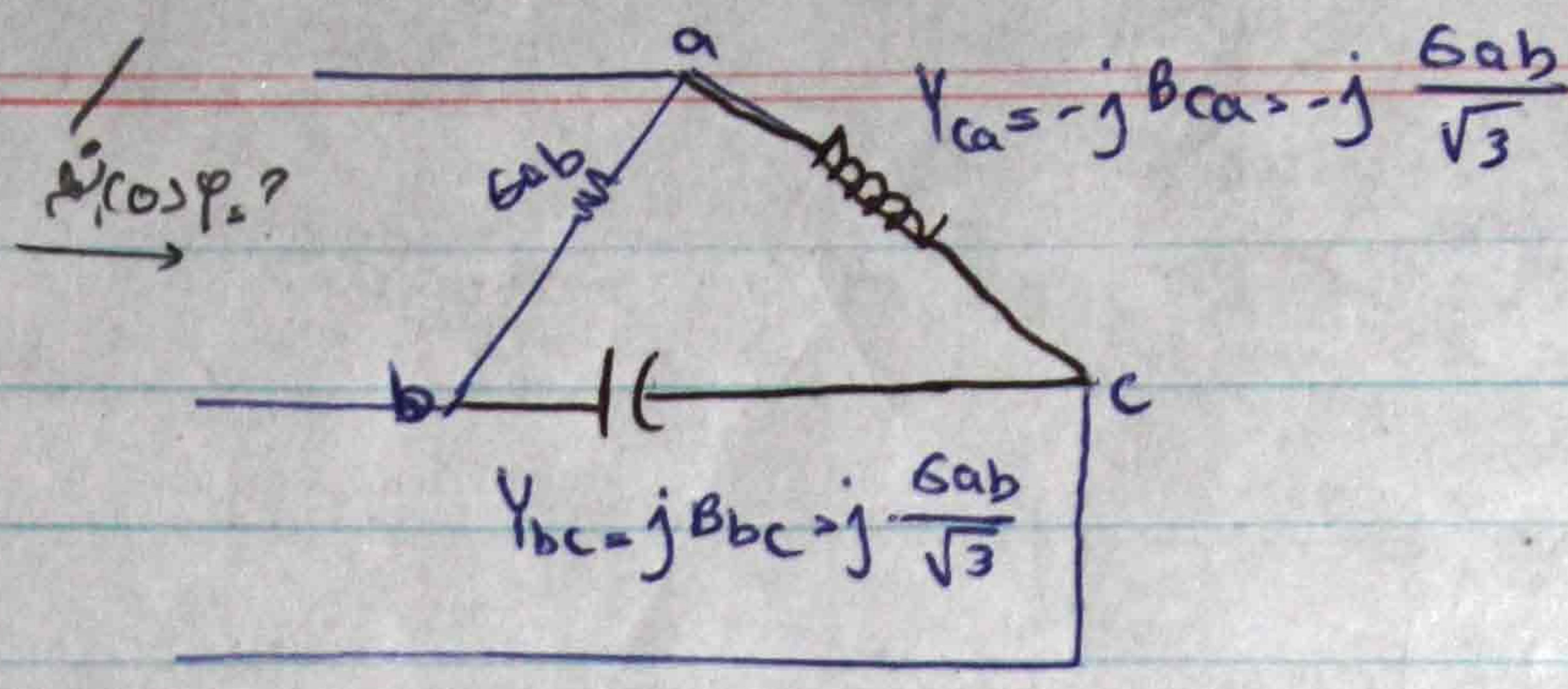
در معادله ۴ مجهول است ۲ تا داریم

فرض می‌کنیم که $\boxed{G_{bc} = G_{ca} = 0}$

$$② \rightarrow B_{bc} = -B_{ca} \rightarrow ① \rightarrow G_{ab} = \sqrt{\tfrac{3}{2}}\,B_{bc} + \tfrac{\sqrt3}{2}B_{bc}$$

$$\boxed{B_{bc} = \frac{G_{ab}}{\sqrt3}} \quad , \quad \boxed{B_{ca} = -\frac{G_{ab}}{\sqrt3}}$$

خازن   سلف



$Y_{ca} = -jB_{ca} = -j\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}}$

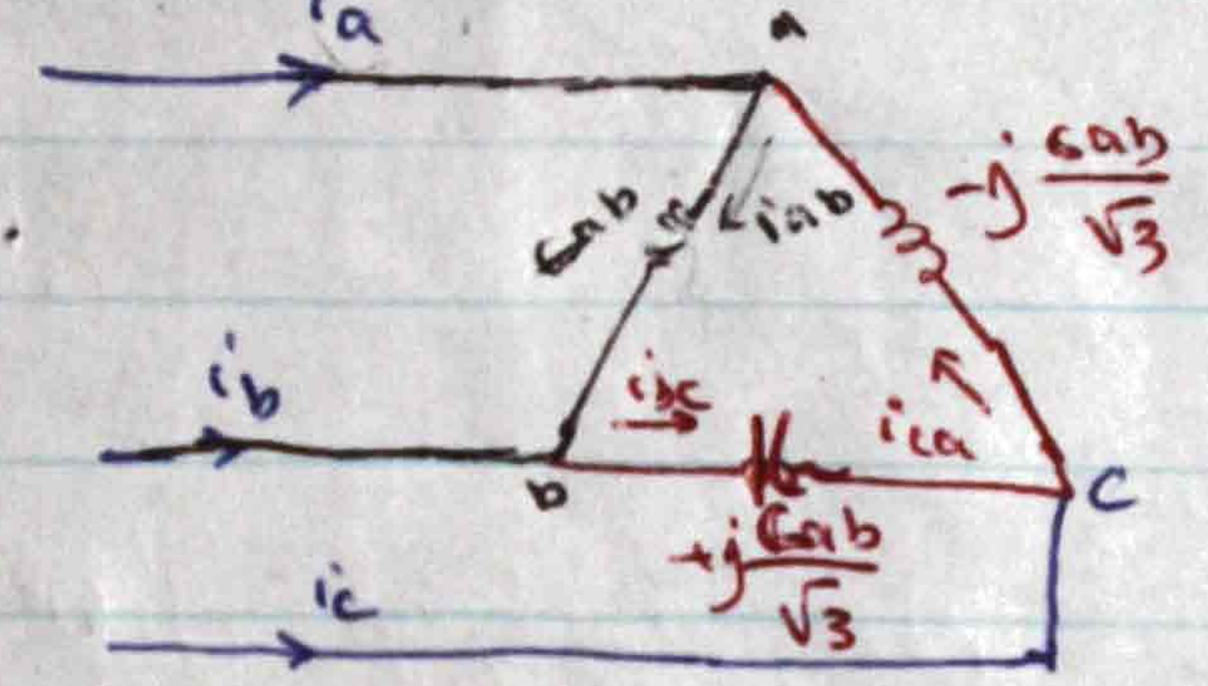
$Y_{bc} = jB_{bc} = j\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}}$

پس هر دو ترکیب مقاومتی است سلف سمت چپ خازن اضافه می کنیم

مثال: دیک بار تکفاز برابر 4 MVA با ضریب توان یک بین فازهای a,b وصل شده است جبران راکتیو لازم برای متعادل کردن بار چقدر است؟ پس تا؛ $\cos\varphi = ۰/۸۶۶$

جلسه چهارم ۹۰/۸/۲

جبران سازی بار:



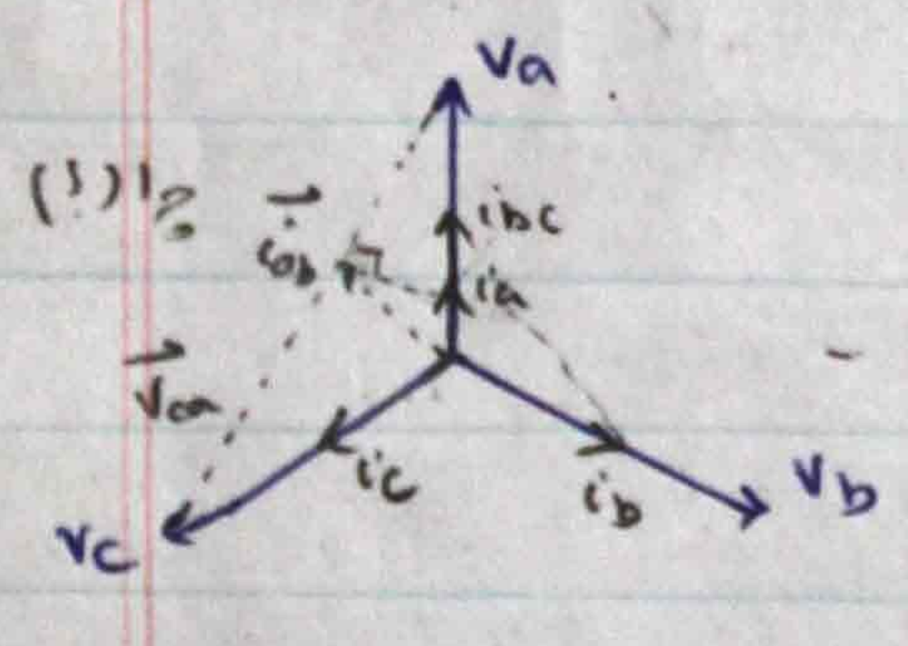
$P = V_{LL}^{rms} \cdot i_{ab}^{rms} = V_{LL}^{rms} \cdot G_{ab} \cdot V_{LL}^{rms}$

$Q_{ac} = V_{LL}^{rms} \cdot i_{ca}^{rms} = V_{LL}^{rms}\left(-\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}}\right) \cdot V_{LL}^{rms}$

$Q_{bc} = V_{LL}^{rms} \cdot i_{bc}^{rms} = V_{LL}\left(\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}}\right) \cdot V_{LL}^{rms}$

$\Big\} \; Q_{total} = 0$

$\therefore \; tg\,\varphi = \dfrac{Q=0}{P} = 0 \longrightarrow \cos\varphi = 1$



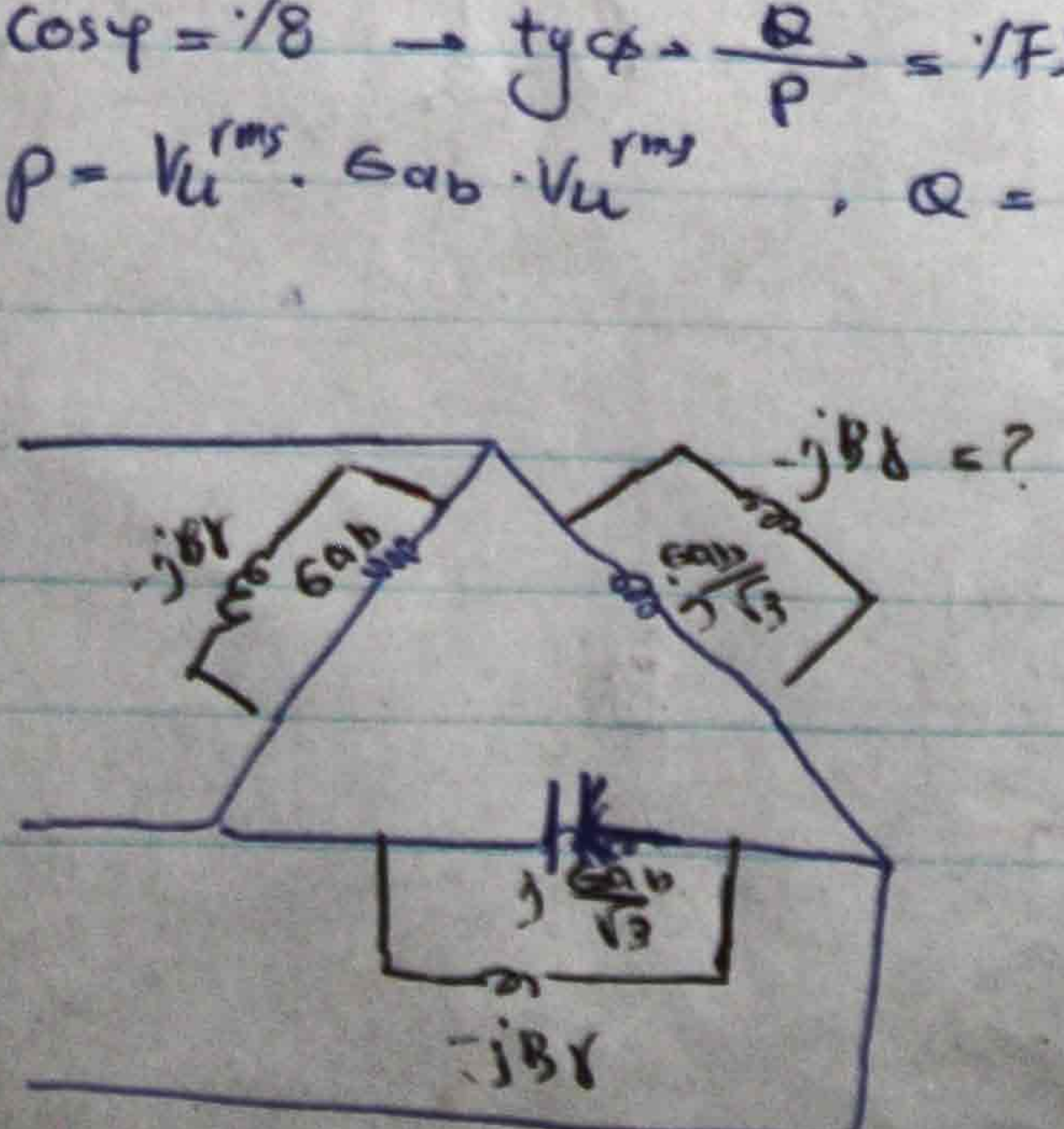
$\vec{i_a} = \vec{i_{ab}} - \vec{i_{ca}} \quad , \quad \vec{i_b} = \vec{i_{bc}} - \vec{i_{ab}} \quad , \quad \vec{i_c} = \vec{i_{ca}} - \vec{i_{bc}}$

$\Rightarrow \vec{i_a} = \vec{V_{ab}} \cdot G_{ab} - \vec{V_{ca}}\left(-j\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}}\right) = \sqrt{3}\,\vec{V_a}\,e^{j30} \cdot G_{ab} + j\sqrt{3}\,V_a\,e^{j150}\,\dfrac{G_{ab}}{\sqrt{3}} = R_{eq} + 0j$

سوال: حال اگر هدف جبران بار برای رسیدن به $\cos\varphi = ۰/۸$ باشد مقدار جبران سازی راکتیو را محاسبه کنید.

$\cos\varphi = ۰/۸ \rightarrow tg\,\varphi = \dfrac{Q}{P} = ۰/۷۵$

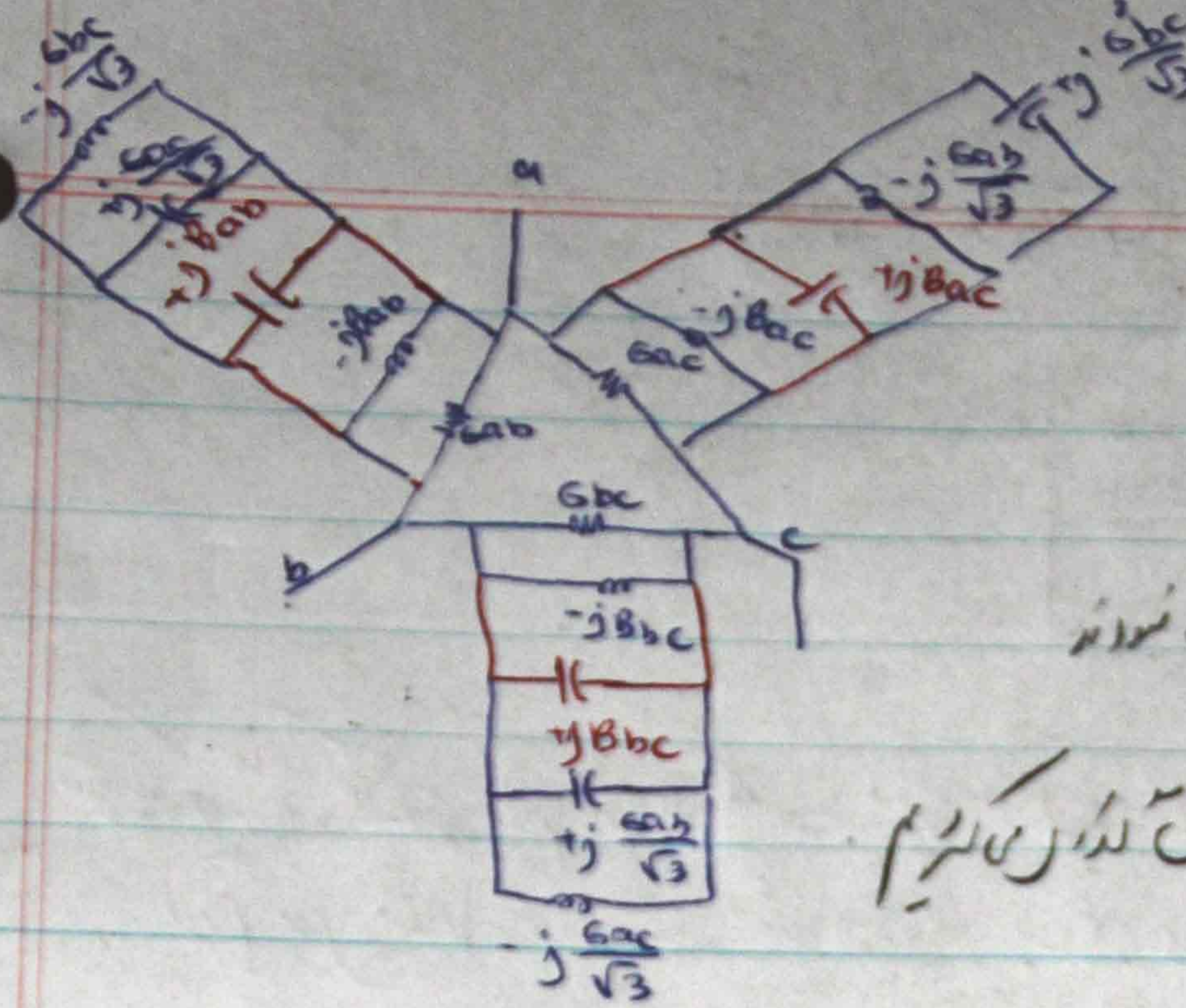
$P = V_{LL}^{rms} \cdot G_{ab} \cdot V_{LL}^{rms} \quad , \quad Q = ۰/۷۵ \times V_{LL}^{rms}\, G_{ab} \cdot V_{LL}^{rms}$ خواسته مسئله $(Q = P \cdot tg\,\varphi)$



$Q = 3 \cdot V_{LL}^{rms} \cdot B_\gamma \cdot V_{LL}^{rms}$

$\rightarrow ۰/۷۵\,G_{ab} = 3B_\gamma \Rightarrow B_\gamma = \dfrac{۰/۷۵ \times G_{ab}}{3}$

$= \dfrac{tg(\cos^{-1}) \cdot G_{ab}}{3}$



جبران سازی بار در حالت کلی:

باری که اول متعادل بوده

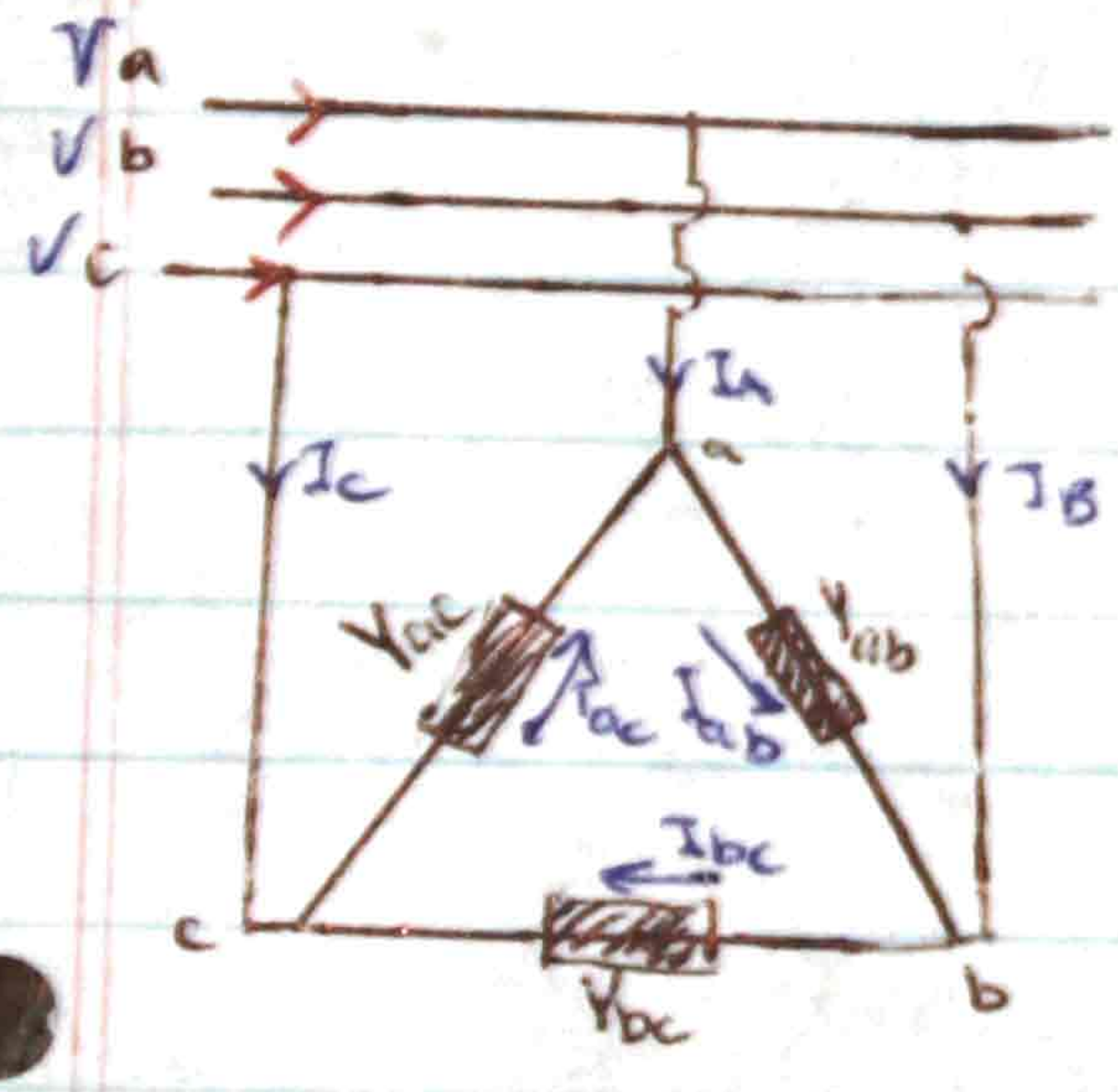
اول خازن اضافه شده را از سلف موازی بیرون می‌بریم

فرض می‌کنیم Gab از اول بوده ولی Gac و Gbc نبوده‌اند

می‌آییم سمت راست سلف، سمت چپ خازن می‌گذاریم

حالا: $\cos\varphi = 1$, متعادل.

جاهایی داریم که امپدانس و یا سوسپتانس در هر لحظه از زمان تغییر می‌کند پس باید عناصر متعادل‌سازی که در سیستم داریم بتوانند با زمان تغییر کنند پس دنبال جبران‌کننده‌ای می‌گردیم که تغییر با زمان داشته باشد

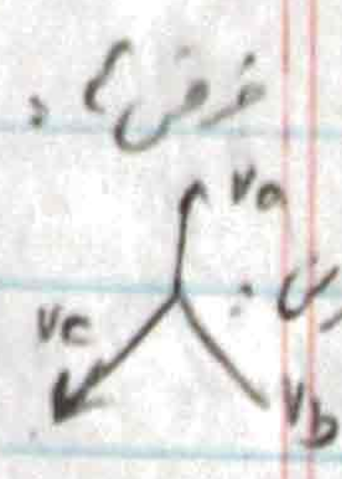


متعادل سازی بارهای غیر متعادل متغیر با زمان:

اگر امپدانس ما در هر لحظه مشخص باشد می‌توانیم مقدار توان راکتیو لازم جبران‌سازی را محاسبه کنیم در اینجا ما این مقادیر را نداریم پس باید مقادیر I و V را تخمین با دلتا و جریان خط بزنیم

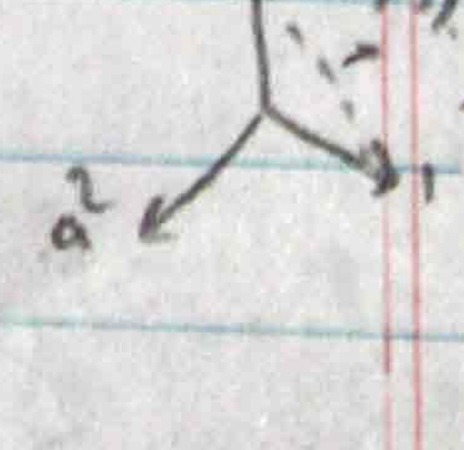
فرض: مقادیر دلتا Y های a, b, c و جریان‌ها معلوم هستند.
ولتاژ سیستم را همواره متعادل فرض می‌کنیم

فرض:



Va را ولتاژ مرجع در نظر می‌گیریم.

مقدار تغییرات را در یک شکل برداری می‌گذاریم (تو مشخصات)



$$(\mathrm{I})\begin{cases}\vec{I}_{ab} = \vec{Y}_{ab}\cdot\vec{V}_{ab}\\ \vec{I}_{bc} = \vec{Y}_{bc}\cdot\vec{V}_{bc}\\ \vec{I}_{ca} = \vec{Y}_{ca}\cdot\vec{V}_{ca}\end{cases}\qquad (\mathrm{II})\begin{cases}\vec{I}_A = \vec{I}_{ab} - \vec{I}_{ca}\\ \vec{I}_B = \vec{I}_{bc} - \vec{I}_{ab}\\ \vec{I}_C = \vec{I}_{ca} - \vec{I}_{bc}\end{cases}$$

$$\mathrm{III}\begin{cases}\vec{I}_{ab} = \vec{Y}_{ab}\cdot\vec{V}_a(1-a^2), \quad a = e^{j120}\\ \vec{I}_{bc} = \vec{Y}_{bc}\cdot\vec{V}_a(a^2-a)\\ \vec{I}_{ca} = \vec{Y}_{ca}\cdot\vec{V}_a(a-1)\end{cases}$$

III را در II جایگذاری →

$$\begin{cases}\vec{I}_A = V_a\left[(1-a^2)Y_{ab} - (a-1)Y_{ca}\right]\\ \vec{I}_B = V_a\left[(a^2-a)Y_{bc} - (1-a^2)Y_{ab}\right]\\ \vec{I}_C = V_a\left[(a-1)Y_{ca} - (a^2-a)Y_{bc}\right]\end{cases}\qquad \mathrm{IV}$$

رابطه ۳۷ را بفرم ماتریسی می‌نویسیم.

$$\begin{bmatrix}\vec{I}_A\\ \vec{I}_B\\ \vec{I}_C\end{bmatrix} = \sqrt{3}\,\vec{V}_a \begin{bmatrix} 1\angle 30 & 0 & 1\angle -30 \\ -1\angle 30 & 1\angle -90 & 0 \\ 0 & 1\angle 90 & 1\angle 150 \end{bmatrix}\begin{bmatrix}Y_{ab}\\ Y_{bc}\\ Y_{ca}\end{bmatrix} \quad (4)$$

با اندازه‌گیری هر لحظه (که مشکل) از جریانهای A و B و C را داریم Va می‌توان مقادیر ادمیتانس‌ها را پیدا کرد.

چون جریانهای بار نامتقارن است قدم بعدی رفع این مشکل است.

(5) مولفه توالی

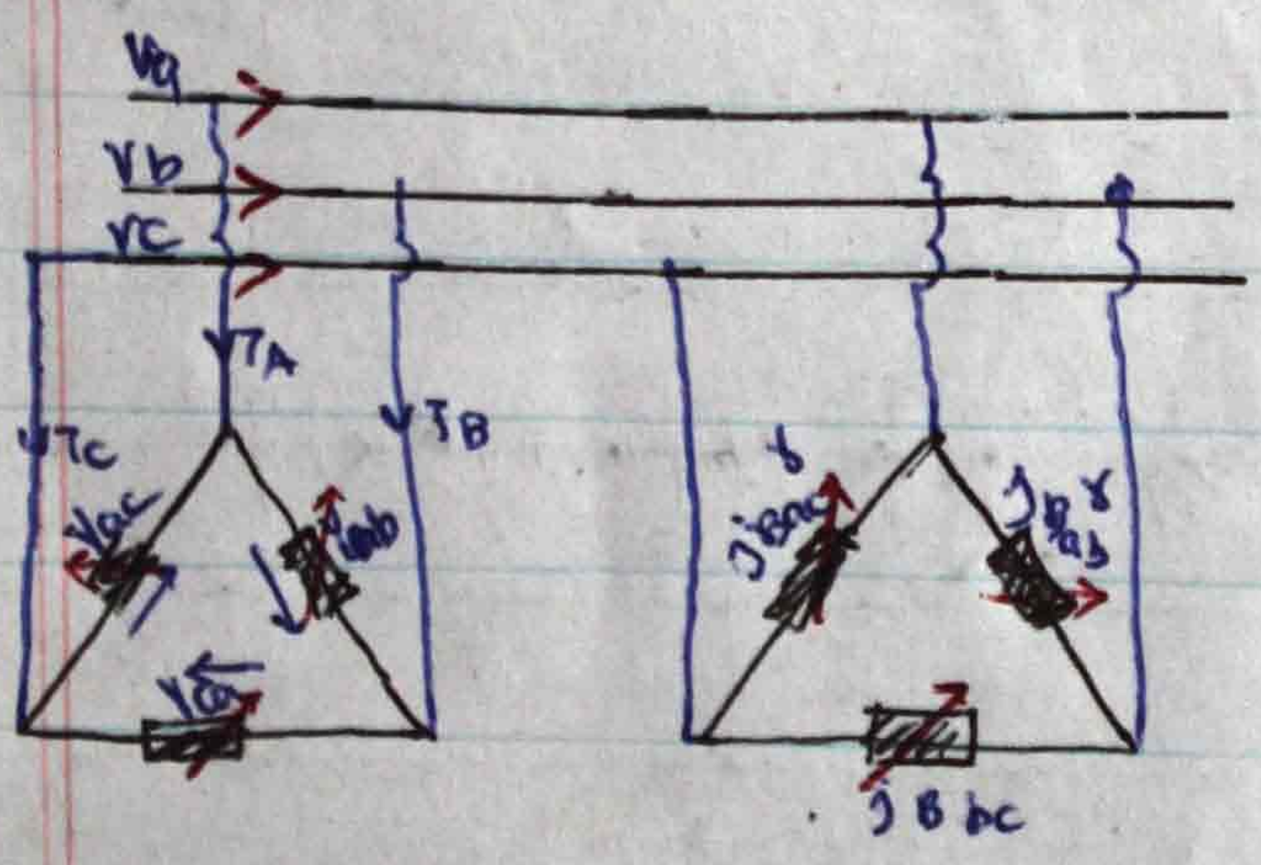
$$\begin{pmatrix}I^+\\ I^-\\ I^0\end{pmatrix} = \frac{1}{3}\begin{pmatrix}1 & a & a^2\\ 1 & a^2 & a\\ 1 & 1 & 1\end{pmatrix}\begin{pmatrix}I_A\\ I_B\\ I_C\end{pmatrix}$$

از (4)(5) $I^0 = 0$ چون ستاره است

$I^+ = \vec{V}_a\,(Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca})$

$I^- = \vec{V}_a\,(-a^2 Y_{ab} - Y_{bc} - aY_{ca})$

از این رو هدف بعدی ما آن است که $I^- + I^{-\gamma} = 0$ صفر شود.
چون توالی مثبت می‌خواهیم داشته باشیم پس توالی منفی را صفر می‌کنیم. آنگاه، $B^\gamma_{ab} = ?$ $B^\gamma_{bc} = ?$ $B^\gamma_{ac} = ?$.
در هر لحظه از زمان را پایش می‌کنیم.



∴ می‌خواهیم جریانهای خط متقارن شود.

مثل محاسبه بالا : $I^{-\gamma} = j\vec{V}_a\,(-a^2 B^\gamma_{ab} - B^\gamma_{bc} - aB^\gamma_{ca})$

جریانهای بار I^- و $I^{-\gamma}$ که از آن بدست آمده هم قرینه و دارای اندازه و زاویه هستند.

$$I^- + I^{-\gamma} = 0 \longrightarrow \begin{cases} Re[I^-] + Re[I^{-\gamma}] = 0 \\ Im[I^-] + Im[I^{-\gamma}] = 0 \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} (1)\ Re[I^-] - \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{V}_a B^\gamma_{ab} + \frac{\sqrt{3}}{2}\vec{V}_a B^\gamma_{ca} = 0 \\ (2)\ Im[I^-] + \frac{1}{2}\vec{V}_a B^\gamma_{ab} - \vec{V}_a B^\gamma_{bc} + \frac{1}{2}\vec{V}_a B^\gamma_{ca} = 0 \end{cases}$$

که این راه حساب نکردم چون مایل نیستیم به محاسبه ادمیتانس بپردازیم.

شرط سوم: جبران سازی بطوری انجام شود که $\cos\varphi = 1$ (جمع توالی I_A است)

$\cos\varphi = 1 \longrightarrow Im[I^+]$ شبکه $= 0 \xrightarrow{\text{پس}} Im[I^+] + Im[I^{+\gamma}] = 0$

$I^{+\gamma} = jV_a\,(B_{ab} + B_{bc} + B_c)$

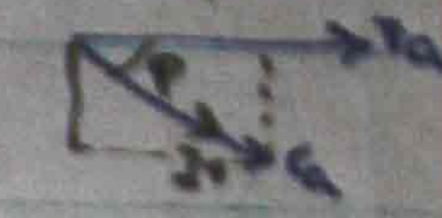
می‌دانیم:

(3) معادله $Im[I^+] + V_a B_{ab} + V_a B_{bc} + V_a B_{ca} = 0$

(8)

* $\cos\varphi = 1 \rightarrow I^{\circ}_{a} = 0 \quad , \quad I^{-} = 0$ این را با حذف کردن (I^-) صفر کردیم $I_a = I^+ + I^- + I_0 \Rightarrow I_a = I^+$

$I^+ = I^+_{(\text{بار})} + I^+_{(\text{جبرانساز})}$



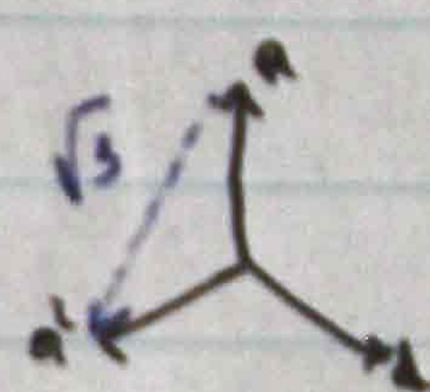
$$\begin{bmatrix} B^{\gamma}_{ab} \\ B^{\gamma}_{bc} \\ B^{\gamma}_{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3V_a} \begin{bmatrix} \sqrt{3} & -1 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \\ -\sqrt{3} & -1 & -1 \end{bmatrix} \overbrace{\begin{bmatrix} Re[I^-] \\ Im[I^-] \\ Im[I^+] \end{bmatrix}}$$

بر اساس مقادیر کمیت‌های شبکه اندازه‌گیری
ماتریس این ۳ ترم چگونه محاسبه می‌شود؟

جلسه نهم ۹۰/۸/۹

می‌خواهیم ارتباط جریان‌ها را با ترانسفورمر مثبت پیدا کنیم سپس مقادیر این ترم‌ها را بر حسب جریان‌ها بنویسیم.

$$\begin{cases} \text{I} & \vec{I}_a = \vec{I}^+ + \vec{I}^- + \vec{I}_0 \\ \text{II} & \vec{I}_b = a^2\vec{I}^+ + a\vec{I}^- + \vec{I}_0 \\ \text{III} & \vec{I}_c = a\vec{I}^+ + a^2\vec{I}^- + \vec{I}_0 \end{cases} \quad ; \quad a = 1e^{j120} \quad , I_0 = 0$$



$$B^{\gamma}_{ab} = -\frac{1}{3V_a}\Big[\overbrace{Im[I^+] + Im[I^-]}^{Im[I^+ + I^-]} - \sqrt{3}Re[I^-]\Big] = -\frac{1}{3V_a}\Big[Im[\vec{I}_a] + Im[\vec{a}\vec{I}_b - a^2\vec{I}_c]\Big]$$

$$B^{\gamma}_{bc} = -\frac{1}{3V_a}\Big[Im[I^+] - 2Im[I^-]\Big] = $$

$$\vec{B}_{ca} = -\frac{1}{3V_a}\Big[Im[I^+] + Im[I^-] + \sqrt{3}Re[I^-]\Big]$$

$$\text{I)} \rightarrow Im[I_a] = Im[I^+ + I^-]$$

$$\begin{matrix} \text{II} \times a \\ \text{III} \times a^2 \end{matrix} \xrightarrow{\text{II}-\text{III}} a\vec{I}_b - a^2\vec{I}_c = (a^2 - a)I^- = -j\sqrt{3}\,I^-$$

$$Re[a\vec{I}_b - a^2\vec{I}_c] + j\,Im[a\vec{I}_b - a^2\vec{I}_c] = -j\sqrt{3}Re[\vec{I}^-] + \sqrt{3}Im[\vec{I}^-]$$

$$\therefore -\sqrt{3}Re[I^-] = Im[\vec{a}\vec{I}_b - a^2\vec{I}_c]$$

حال باید ببینیم این ترم از جریان‌ها چه ارتباطی با جریان‌های اندازه‌گیری شده در هر لحظه از زمان دارد

سؤال: $Im[\vec{I_a}] = ?$

اگر فازور جریان در فاز a ، $\vec{I_a}$ باشد، داریم: $\vec{I_a} = I_{ar} + jI_{ax}$

جریان نشده از فاز a بار تغییر

$$\vec{i_a}(t) = Real\left[\sqrt{2}I_a \cdot e^{j\omega t}\right] = Real\sqrt{2}\left[(I_{ar}+jI_{ax})\cdot(\cos\omega t + j\sin\omega t)\right]$$

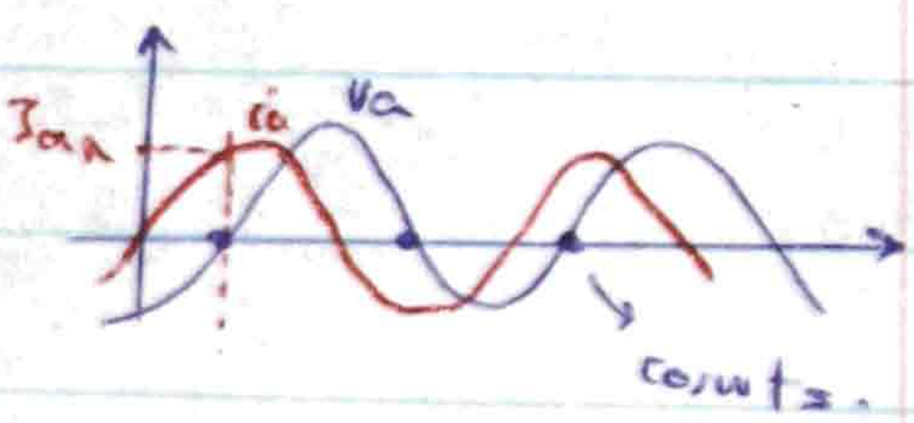
$$\rightarrow i_a(t) = \sqrt{2}(I_{ar}\cos\omega t - I_{ax}\sin\omega t) \rightarrow \frac{i_a(t)}{\sqrt{2}} = I_{ax} \left| \begin{array}{l} \sin\omega t = -1 \\ \cos\omega t = 0 \end{array} \right.$$

لحظه‌ای را پیدا کنیم که $i_a(t) = i_{ax}$ باشد که:

$\vec{V_a} = V_m\cos\omega t = \sqrt{2}V_a\cos\omega t$ ولتاژ $\vec{V_a}$ به عنوان مرجع اندازه‌گیری محاسبات فرض کردیم پس:

می‌خواهم لحظه $\left| \begin{array}{l} \sin\omega t = -1 \\ \cos\omega t = 0 \end{array} \right.$ را نسبت به مرجع اندازه‌گیری کنیم.

شرط: $\left| \begin{array}{l} \sin\omega t = -1 \\ \cos\omega t = 0 \end{array} \right. \equiv \left| \begin{array}{l} \frac{dv_a(t)}{dt} > 0 \\ v_a(t) = 0 \end{array} \right. \Rightarrow I_{ax} = I_m[I_a] = i_a(t)$



$$\frac{dv_a}{dt} = -\omega\sqrt{2}V_a\sin\omega t > 0$$

$$I_m[\vec{a}\,\vec{I_b}] = ? \equiv I_m[e^{j120}\,\vec{I_b}] = ?$$

$$\rightarrow i_b(t) = Re\left[\sqrt{2}\,\vec{I_a}\cdot e^{j\omega t}\right] = Re\left[\sqrt{2}\,\underbrace{\vec{a}\,\vec{I_b}}_{A_r + jA_x}\;\underbrace{e^{j(\omega t - 120)}}_{\cos(\omega t - 120) + j\sin(\omega t - 120)}\right]$$

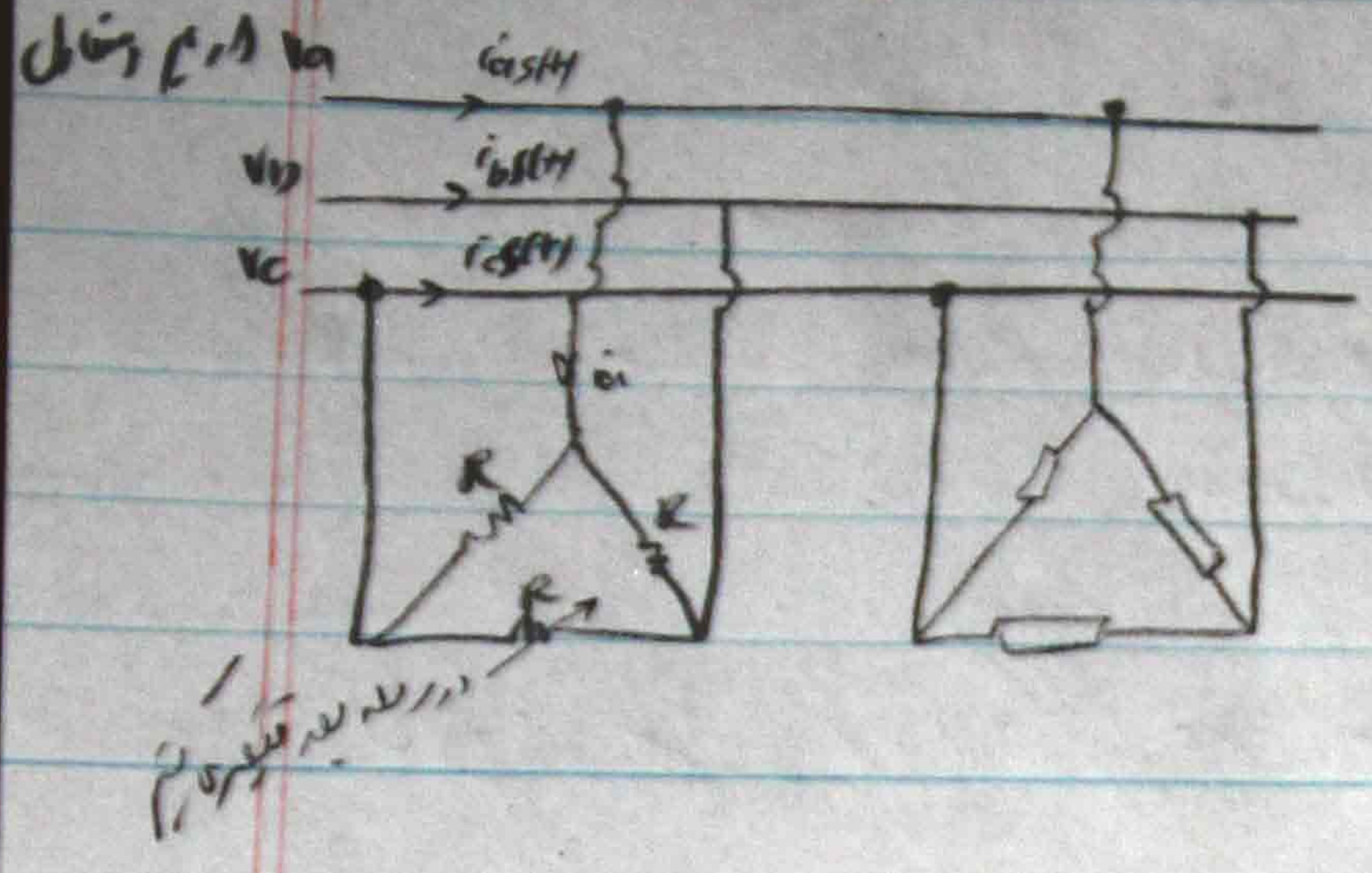
$$i_b(t) = \sqrt{2}\left[A_r\cos(\omega t - 120) - A_x\sin(\omega t - 120)\right] \quad \therefore A_x = \frac{i_b(t)}{\sqrt{2}} \left| \begin{array}{l} \sin(\omega t - 120) = -1 \\ \cos(\omega t - 120) = 0 \end{array} \right.$$

$$\therefore A_x = \frac{1}{\sqrt{2}}\, i_b(t) \left| \begin{array}{l} v_b(t) = 0 \\ \frac{dv_b(t)}{dt} > 0 \end{array} \right.$$

$$\Rightarrow B_{ab}^{\gamma} = -\frac{1}{\sqrt{2}\times 3V_a}\left[i_a(t) \left| \begin{array}{l} v_a(t) = 0 \\ \frac{dv_a(t)}{dt} > 0 \end{array} \right. + i_b(t) \left| \begin{array}{l} v_b(t) = 0 \\ \frac{dv_b(t)}{dt} > 0 \end{array} \right. + i_c(t) \left| \begin{array}{l} v_c(t) = 0 \\ \frac{dv_c(t)}{dt} > 0 \end{array} \right. \right]$$

جریان اندازه‌گیری مقادیر بالا یک تاخیر وجود دارد که تاخیر ذاتی جبران کننده است (بین v_a ، v_c ، v_b با لحاظ زمانی متعادل است)

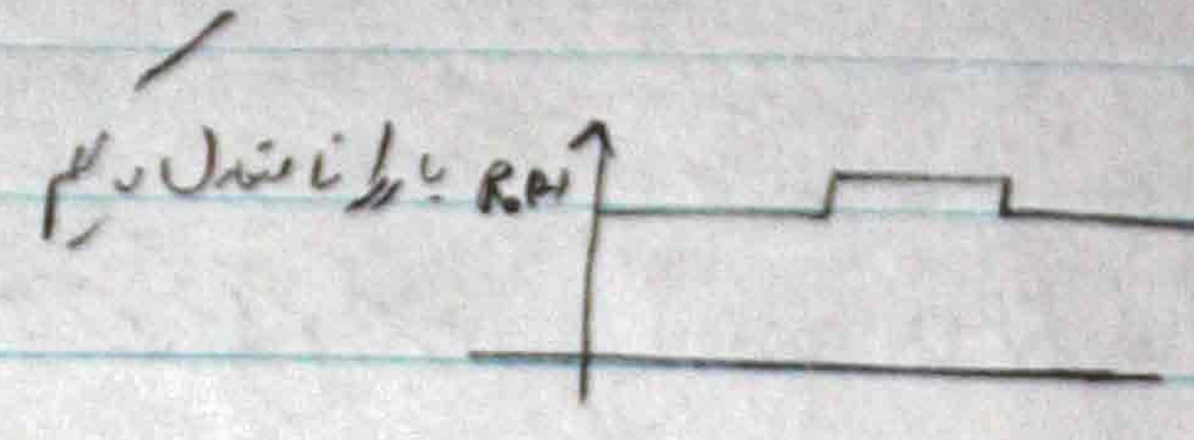
دو روش برای اندازه گیری B^2 است 1- روش نمونه برداری از جریان 2- روش انتگرال گیری



تکنیک: در مطلب با سه تکنیک بسته دارد

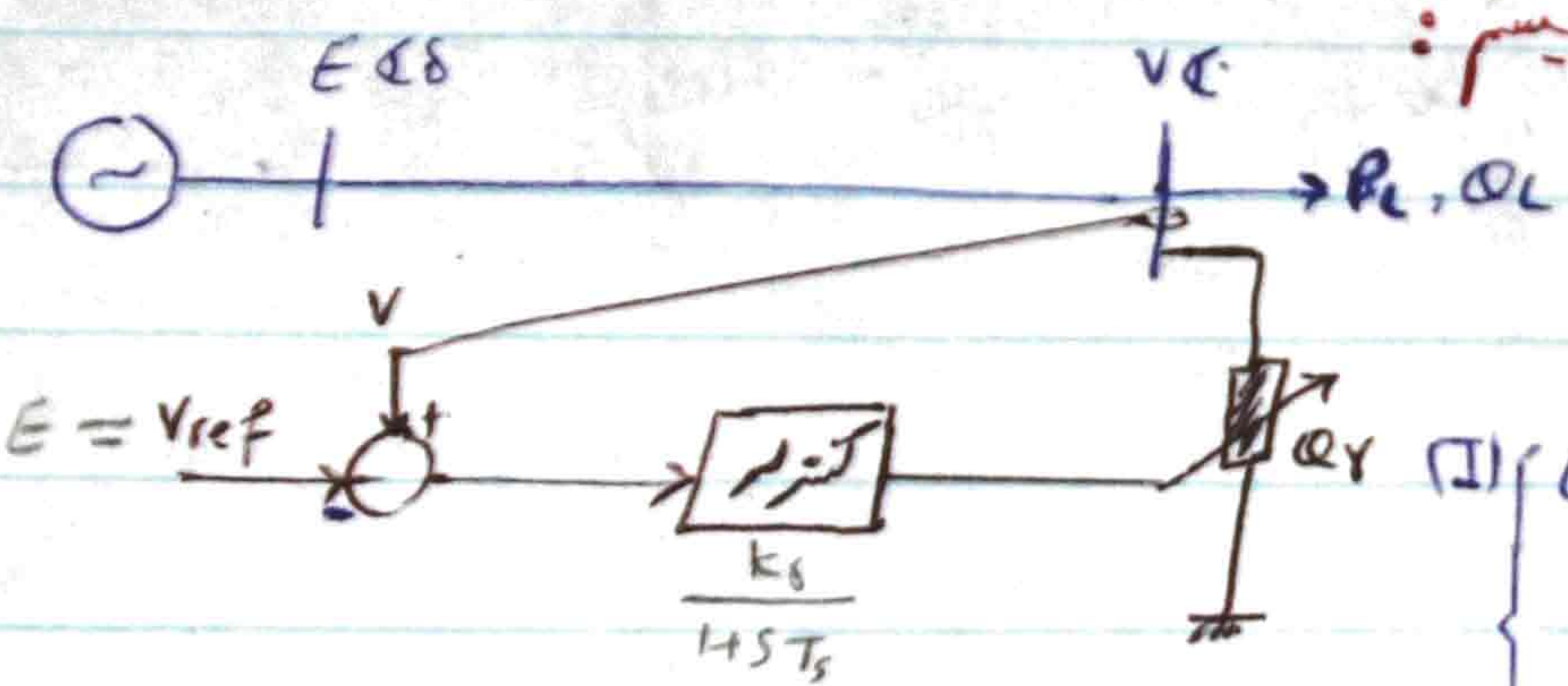
R R R ⇐ i_{as}, i_{bs}, i_{cs}

$B_{ab} = B_{bc}, B_{ac} =$ ⇐ $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$



مقادیر سوسپتانس را بدست می آوریم.

تأثیر کنترل خودکار ولتاژ بر خط بار سیستم:



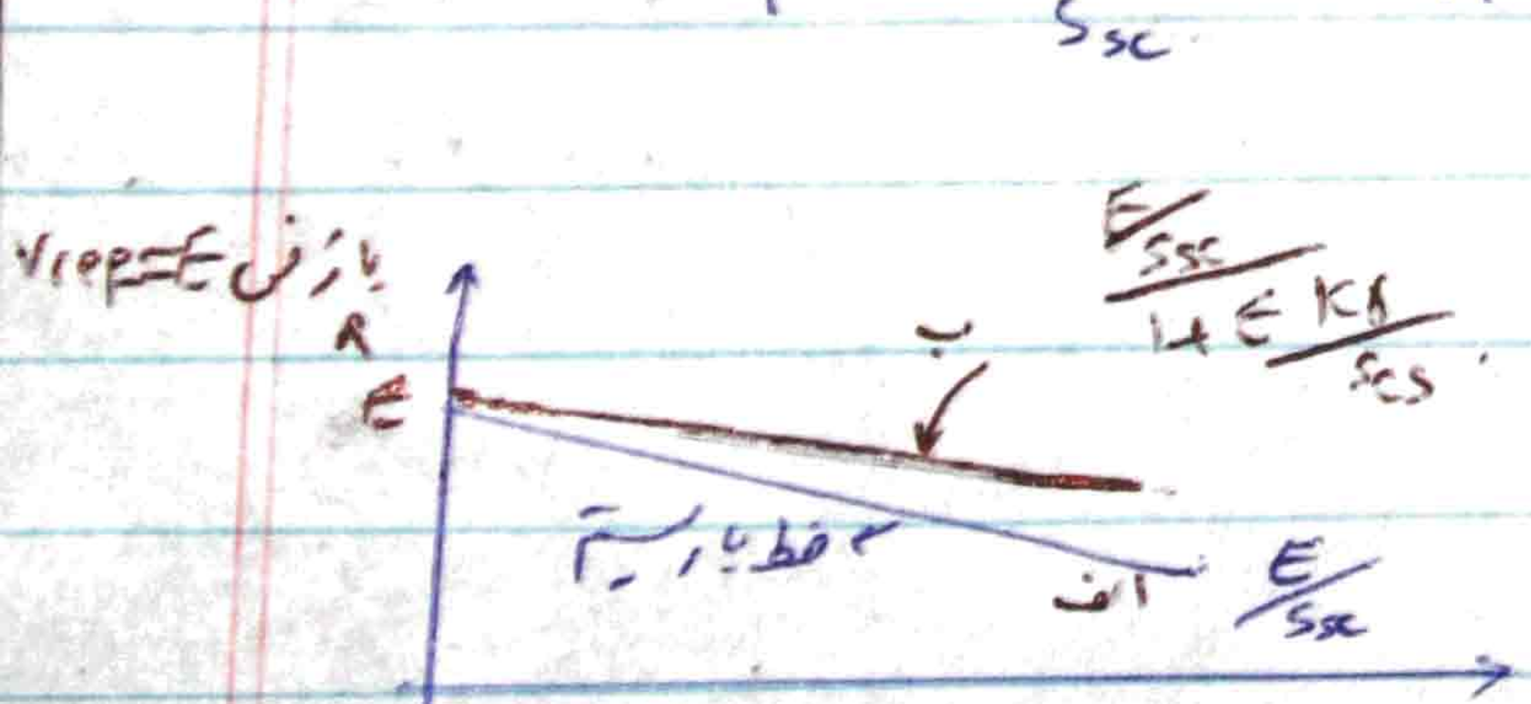
اگر مشخصه عملکرد کنترل در حالت ماندگار به صورت روبرو باشد:

$$\text{(I)}\quad Q_\gamma = -k_\gamma (V_{ref} - V)$$

$$\text{(II)}\quad V = E\left(1 - \frac{Q_\gamma + Q_L}{S_{sc}}\right)$$

$$\rightarrow \text{I, II} \rightarrow V \cong |E| \left(1 - \frac{k_\gamma (V_{ref} - V) + Q_L}{S_{sc}}\right)$$

$$\rightarrow V \cong \left(\frac{1 + \frac{k_\gamma V_{ref}}{S_{sc}}}{1 + \frac{k_\gamma E}{S_{sc}}} - \frac{\frac{Q_L}{S_{sc}}}{1 + \frac{E k_\gamma}{S_{sc}}} \right)$$



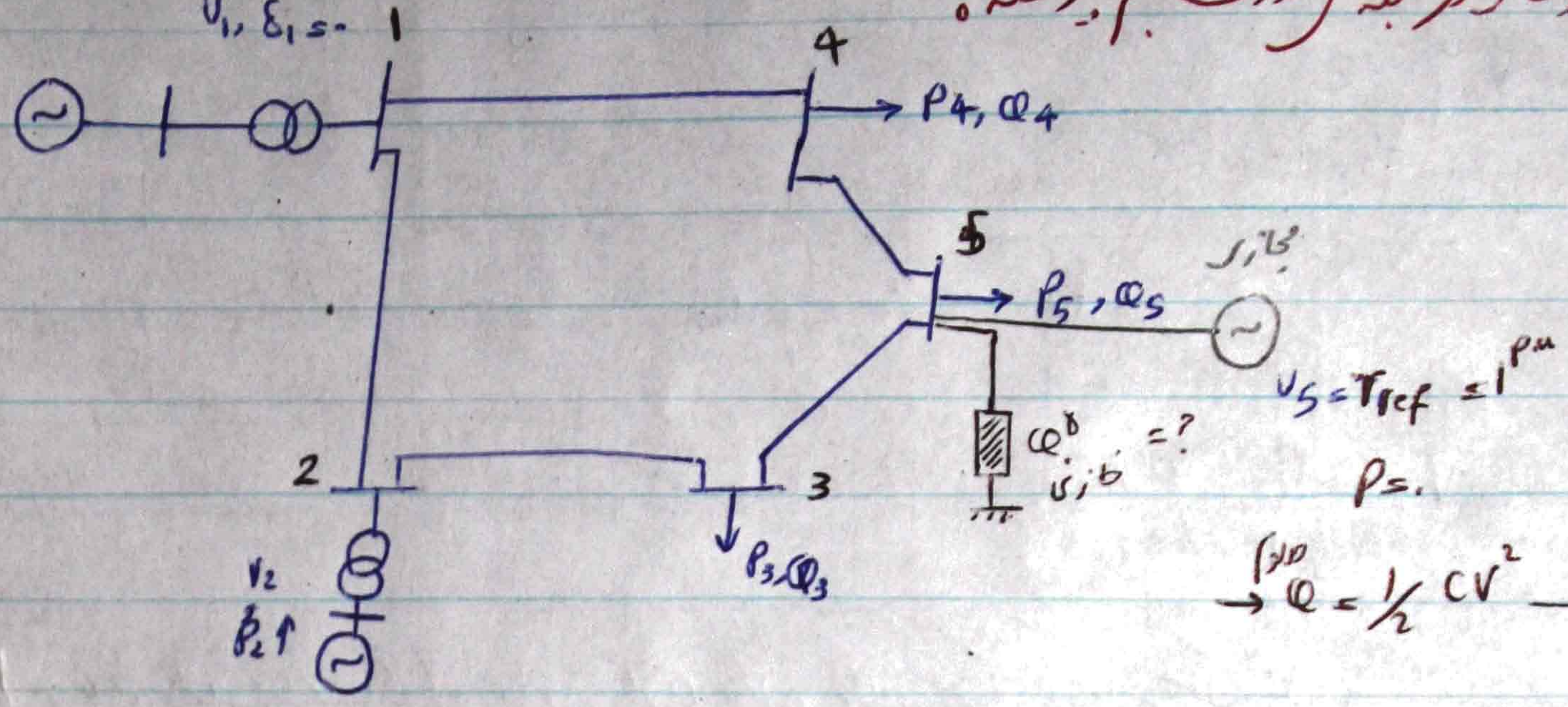
الف: اگر سیستم فاقد کنترل خودکار ولتاژ باشد:

ب: با کنترل:

با توجه به رابطه بدست آمده شیب خط بار سیستم با ضریب بهره کنترلر ارتباط معکوس دارد

پس کنترلر را نمی توان بزرگ انتخاب کرد چون اولاً سیستم را ناپایدار می کند در ضمن سیستم (در رابطه (۱)) ضمانت سیستم سود را با کوچکتر بین تغییر ولتاژ باید مقادیر زیادی توان راکتیو تزریق کنیم که هم مسائل فنی و هم مسائل اقتصادی را به دنبال دارد. در سوال داریم: ضمن درنظر گرفتن جبران کننده و مقدار مناسب ظرفیت جبران کننده چقدر باشد. و مقدار تزریق چقدر باشد. (جای تحقیق دارد).

کنترل ولتاژ در شبکه‌های قدرت بهم پیوسته:



$\xrightarrow{\text{مدار}} Q = \frac{1}{2} CV^2 \rightarrow B_C = j\omega C$

PF → | V_3 ٪۹۵ < < ۱٫۰۵

| V_4

| V_5 ٪۹۵ → ۱٫۰ p.u.

تعیین ظرفیت راکتور مناسب در شبکه | - استفاده از برنامه پخش بار (مقدار تغییرات ولتاژ در سیستم‌ها را مشخص می‌کند)

| - تحلیل مداری

- در باس ۵ که یک ژنراتور مجازی گذاشتیم (هم این باس را PV می‌کنیم) پخش بار را انجام داده (حجم Q مناسب معلوم می‌شود)
مشکلی که در مورد ۵ باید کنترلی بر روی ولتاژ شین‌های ۳ و ۴ نداریم. بنابراین نگاه‌مان باید محلی باشد چون
کنترل ولتاژ در یک نقطه بر ولتاژ سایر نقاط؟ تأثیر نمی‌گذارد.

تحلیل مداری:

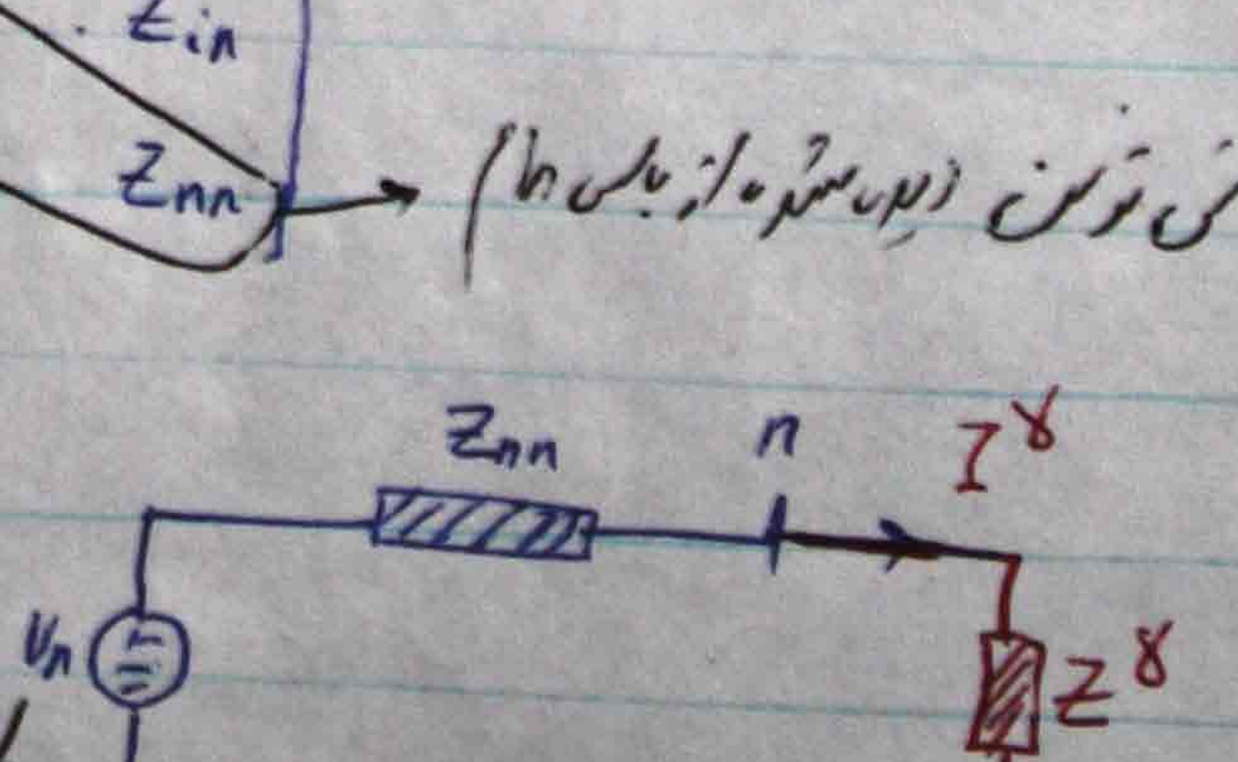
برای یک شبکه قدرت مفروض:

$$\underset{n\times n}{Y_{bus}} \cdot \underset{n\times 1}{V} = \underset{n\times 1}{I}$$

تزریقی جریان‌ها در باس‌ها

$$Z_{bus} = Y_{bus}^{-1} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} \cdots & Z_{in} \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \rightarrow$$ معرف امپدانس تونن دیده‌شده از باس n ام

از دید شین شماره n ام مدار معادل تونن بسازیم



ولتاژ باس n که از نتیجه پخش بار

جذبی - تزریقی

$$\vec{V}_n^{new} = V_n - Z_{nn} I^r \longrightarrow \overset{\uparrow}{I^r} = \frac{\vec{V}_n}{\vec{Z}_{nn} + \vec{Z}_r}$$

$$\vec{V}_n^{new} = V_n \left(\frac{Z^r}{\vec{Z}_{nn} + \vec{Z}_r} \right)$$

در یک سیستم قدرت واقعی $r = 0$ ؛ $\vec{Z}_{nn} = j X_{nn}$ ، $\vec{Z}_r = -j X_C$

$$\vec{V}_n^{new} = V_n \left(\frac{X_C}{X_C - X_{nn}} \right)$$ مثلا $\rightarrow 1 = 19 \left(\frac{X_C}{X_C - X_{nn}} \right) \rightarrow X_C \rightarrow C \rightarrow Q_C$

تاثیر بهبودی ولتاژ در ارتباط از جبران سازی توان راکتیو در یک باس شبکه :

$$Y_{bus} \cdot V = I_{bus} \longrightarrow \vec{V} = \vec{Z}_{bus} \cdot \vec{I}_{bus}$$

بردار تزریق جریان

$$\begin{bmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_i \\ \vdots \\ \Delta V_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \cdots & Z_{1i} & \cdots & Z_{1n} \\ Z_{21} & Z_{22} & \cdots & Z_{2i} & \cdots & Z_{2n} \\ \vdots \\ Z_{i1} & Z_{i2} & \cdots & Z_{ii} & \cdots & Z_{in} \\ \vdots \\ Z_{n1} & Z_{n2} & \cdots & Z_{ni} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ -I^r \end{bmatrix}$$

(به خاطر تزریقی بودن)

$\therefore$ جبران راکتیو در باس n ام $\Big|$ $\Delta V_i = -Z_{in} I^r = -Z_{in} \times V_n \left(\frac{Z^r}{Z_{nn} + Z_r} \right)$

$$\therefore \quad V_i^{new} = V_i + \Delta V_i = V_i - V_n \left(\frac{Z_{in} Z_r}{Z_{nn} + Z_r} \right)$$

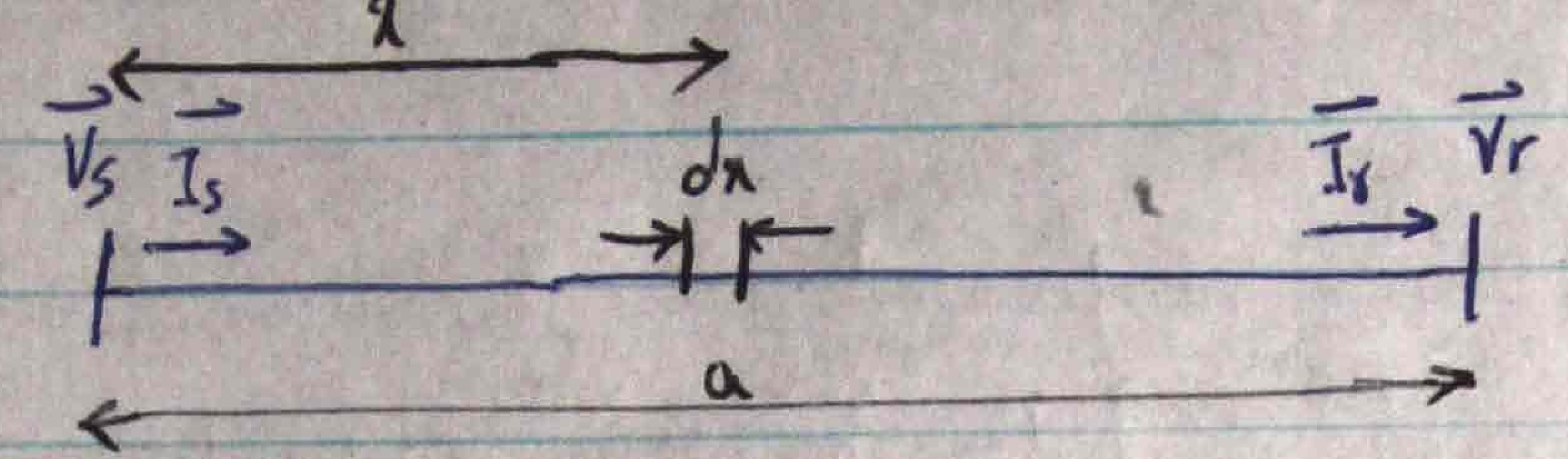
تحلیل مداری اثر بار را در نظر نگیرد. امپدانس یا ادمیتانس های بار در ماتریس امپدانس لحاظ نمی‌شود

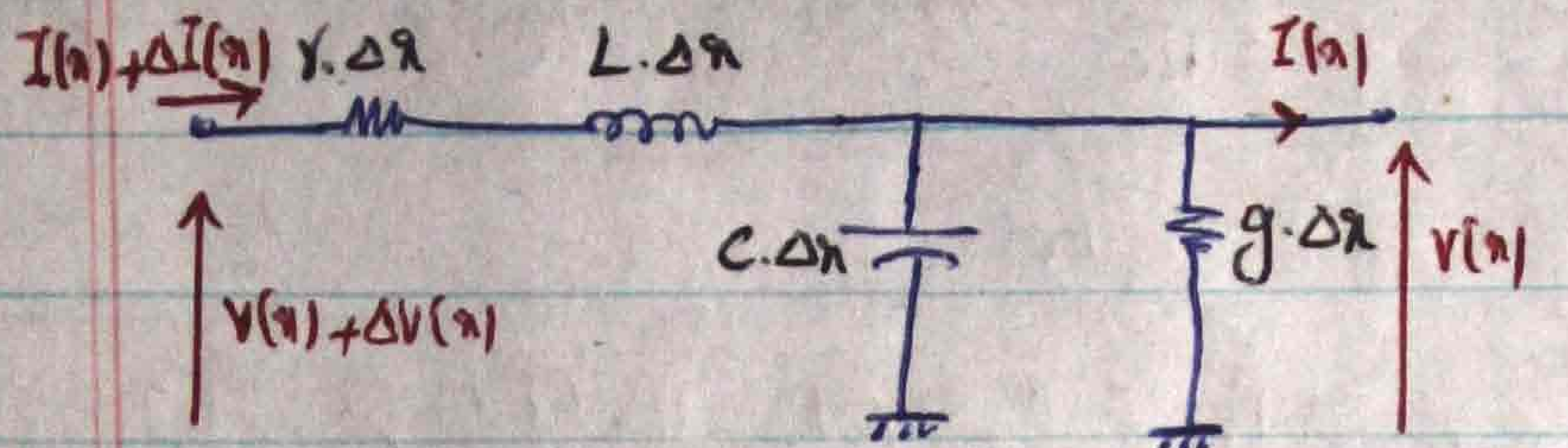
(با matpower برنامه پخش بار است. در کتاب هادی سعادت برنامه‌های پخش بار وجود دارد. در اینترنت هم هست)

جلسه ششم ۹۰/۸/۲۳

کنترل توان راکتیو شبکه‌ی انتقال در حالت ماندگار:

1- مدل ریاضی خط انتقال:





r: مقاومت در واحد طول خط Ω/km

L: اندوکتانس در واحد طول خط H/km

C: خازن در واحد طول خط F/km

g: هدایت در واحد طول خط $℧/km$

① $\Delta V(x) = (r+j\omega L)\cdot\Delta x \cdot (I(x)+\Delta I(x)) \rightsquigarrow \Delta V(x) = (r+jL\omega)\cdot\Delta x\cdot I(x)$

② $\Delta I(x) = (g+jC\omega)\Delta x\,(V(x)) \rightsquigarrow \Delta I(x) = (g+jC\omega)\cdot\Delta x\cdot V(x)$

① $\rightsquigarrow \dfrac{\Delta\vec{V}(x)}{\Delta x} = \vec{Z}\cdot\vec{I}(x)$; $r+jL\omega = Z$ امپدانس خط در واحد طول

② $\dfrac{\Delta\vec{I}(x)}{\Delta x} = \vec{y}\cdot\vec{V}(x)$; $g+jC\omega = y$ ادمیتانس خط در واحد طول

$\xrightarrow{\frac{d^2}{dx^2}}$ $\dfrac{d^2V(x)}{dx^2} = \vec{Z}\cdot\vec{y}\cdot\vec{V}(x)$, $\dfrac{d^2I(x)}{dx^2} = \vec{Z}\cdot\vec{y}\cdot\vec{I}(x)$

"$\Gamma^2 = Z\cdot y$" ثابت انتشار خط ①: $(s^2-\Gamma^2)\vec{V}(s) = 0 \longrightarrow s=\pm\Gamma$

$$\begin{cases} \therefore\ V(x) = Ae^{\Gamma x} + Be^{-\Gamma x} \\ \dfrac{dV(x)}{dx} = \vec{Z}\cdot\vec{I}(x) \Rightarrow \vec{Z}\,\vec{I}(x) = A\Gamma e^{\Gamma x} - B\Gamma e^{-\Gamma x} \rightsquigarrow I(x) = A\sqrt{\frac{y}{Z}}\,e^{\Gamma x} - B\sqrt{\frac{y}{Z}}\,e^{-\Gamma x} \\ \text{شرایط مرزی مشخص}:\ x=a \rightsquigarrow V(x=a)=V_r\ ;\ I(x=a)=I_r \end{cases}$$

$$\rightsquigarrow V(x) = \frac{\vec{V_r}+Z_0I_r}{2}e^{\Gamma(a-x)} + \frac{\vec{V_r}-Z_0I_r}{2}e^{-\Gamma(a-x)}\ ;\ Z_0=\sqrt{\frac{Z}{y}}$$ امپدانس مشخصه خط انتقال

$$\rightsquigarrow I(x) = \frac{\vec{V_r}/Z_0+\vec{I_r}}{2}e^{\Gamma(a-x)} - \frac{\vec{V_r}/Z_0-\vec{I_r}}{2}e^{-\Gamma(a-x)}$$

معادلات ولتاژ و جریان برای خط بدون تلفات: $g=0\ ,\ r=0$

$Z\cdot y = -LC\omega^2 = \Gamma^2$

$\Gamma = j\underbrace{\omega\sqrt{LC}}_{B} \longrightarrow \Gamma = jB$; $Z_0 = \sqrt{\dfrac{jL\omega}{jC\omega}} = \sqrt{\dfrac{L}{C}}$

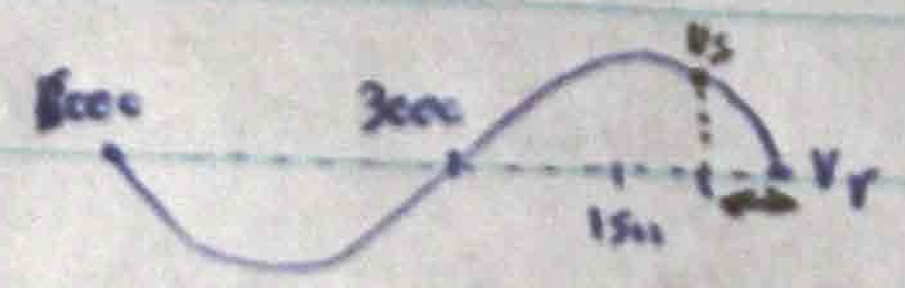
$$\begin{cases} \vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 \vec{I}_r \sin\beta(a-x) \\ \vec{I}(x) = \vec{I}_r \cos\beta(a-x) + j\dfrac{\vec{V}_r}{Z_0}\sin\beta(a-x) \end{cases}$$

[illegible] $\lambda = \dfrac{2\pi}{\beta} = \dfrac{2\pi}{\omega\sqrt{LC}} = \dfrac{2\pi}{2\pi f\sqrt{LC}} \Rightarrow \begin{cases} \lambda = \dfrac{1}{f\sqrt{LC}} = \dfrac{v}{f} \\ \dfrac{1}{\sqrt{LC}} = v \end{cases}$ سرعت نور — عموماً سرعت انتشار موج

مثال: در خطوط انتقال هوایی معمولاً $250^{\Omega} < Z_0 < 400^{\Omega}$ (756^{kv} ، 63^{kv}) اگر $f = 50Hz$ ، $\dfrac{1}{\sqrt{LC}} = 3\times10^5 \dfrac{km}{sec}$ ، $a = 100^{km}$

$\lambda = \dfrac{3\times10^5 \frac{km}{sec}}{50} = 6000$

$a < 700$



$\Gamma = j\omega\sqrt{LC} = j\beta$; $\beta = j\,\overset{\angle 2\pi}{2\pi f}\sqrt{LC} = 0.06 \dfrac{Deg}{km}$

طول الکتریکی خط: $\theta = \beta . a = 100 \times 0.06 = 6^{\circ} deg$

پس: $a \ll \lambda$; $\theta = \beta a \ll 2\pi$

a را با λ مقایسه می‌کنیم، θ را با 2π

$\vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 I_r \sin\beta(a-x)$

$I(x) = \vec{I}_r \cos\beta(a-x) + j\dfrac{\vec{V}_r}{Z_0}\sin\beta(a-x)$

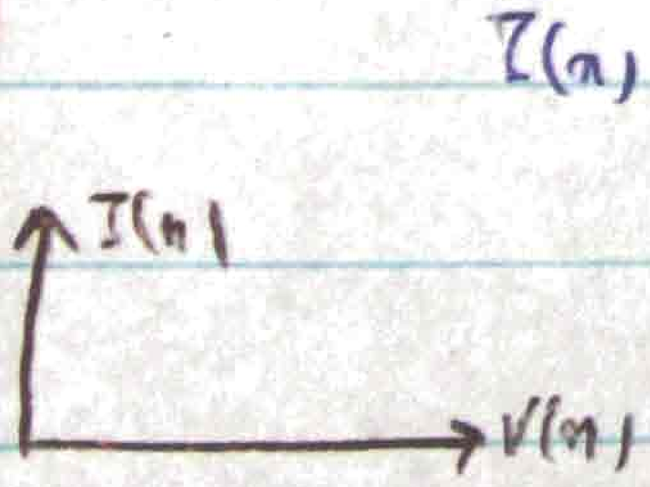
برای عملکرد خط از سو تغذیه می‌شود، در حالت بی‌باری:

روابط فازوری ولتاژ و جریان در هر نقطه از خط

$\vec{I}_r = 0 \rightarrow \vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x)$

$\vec{I}(x) = j\dfrac{\vec{V}_r}{Z_0}\sin\beta(a-x)$

در هر نقطه از خط به جریان و ولتاژ نسبت به هم بر هم عمود هستند.



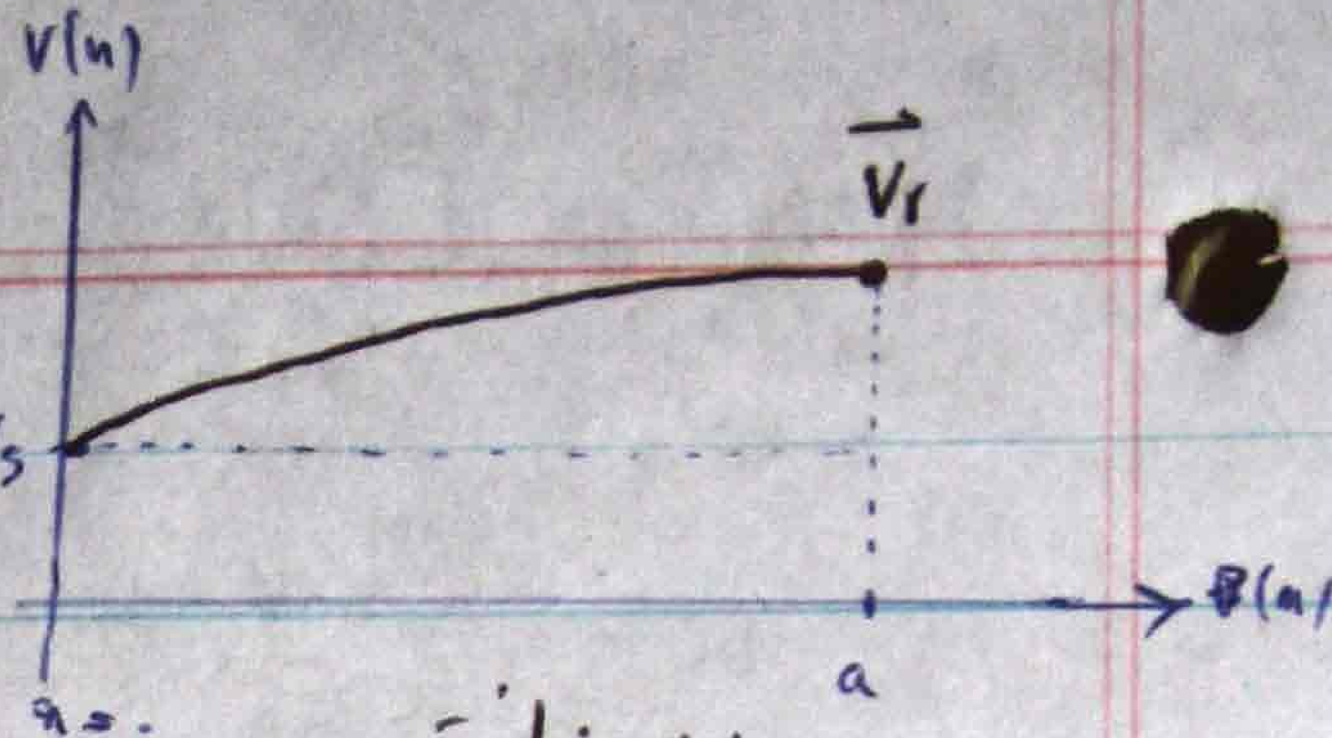
$P(x) = 0$

$Q(x) = -\dfrac{|V_r|^2}{Z_0}\cos\beta(a-x)\sin\beta(a-x)$

در ابتدای خط $x = 0$ ، $\vec{V}(x) = \vec{V}_s$

$\therefore \; \vec V_s = \vec V_r \cos\beta a$

اگر V_s معلوم : $\vec V_r = \frac{\vec V_s}{\underbrace{\cos\beta a}_{\theta}}$ $\qquad |\vec V_r| > |\vec V_s|$



پدیده فرانتی

محاسبات توان در ابتدا و انتهای خط:

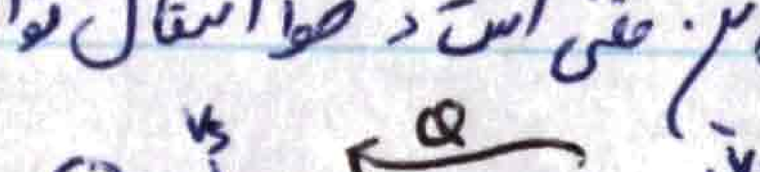
تولیدی $\vec S_s = \vec V_s \cdot \vec I_s^* = V_s \cdot \left(j\frac{\vec V_r}{Z_0}\sin\beta a\right)^* \rightarrow S_s = \vec V_s \cdot \left(j\frac{\vec V_s}{\cos\beta a}\cdot\frac{\sin\beta a}{Z_0}\right)^*$

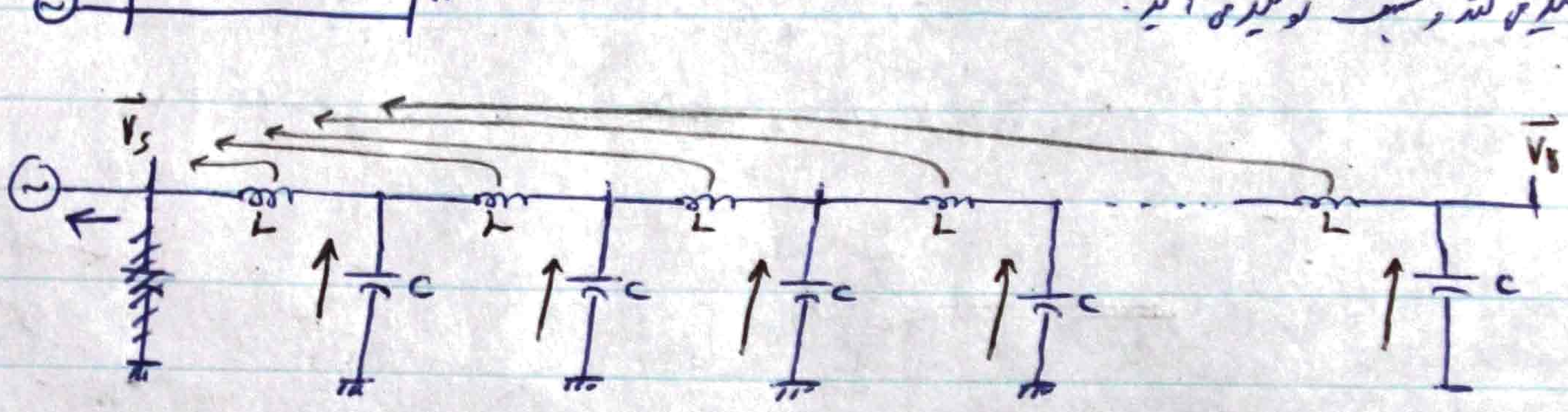
$I_s = j\frac{\vec V_r}{Z_0}\sin\beta\cdot a$

$S_s = 0 - j\frac{|V_s|^2}{Z_0}tg\beta a$ $\begin{cases} P_s = 0 \\ Q_s = -j\frac{|V_s|^2}{Z_0}tg\beta a \end{cases}$ توان تولیدی

و $S_r = \vec V_r \vec I_r =$ $\begin{cases} P_r = 0 & \text{توان تحویل داده} \\ Q_r = 0 & \text{هنگام بی باری} \end{cases}$ توان مصرفی

- توان راکتیو تولیدی در ابتدای خط منفی است یعنی توان راکتیو جذب کردیم این بدین معنی است که در خط انتقال توان راکتیو تولید می‌کند و سمت تولیدی می‌آید.





توان راکتیو تولیدی خط بیشتر از توان مصرفی خط است و باید یک ولتاژ زننده وظیفه در ابتدای خط باشد. (هر جای شبکه که یک ولتاژ ثابت وجود دارد آن ولتاژ را مد نظر قرار می‌دهیم لازم نیست حتماً ابتدای خط باشد)

هر چه طول الکتریکی خط بیشتر باشد توان راکتیو انتقالی به تجهیز دارای ولتاژ ثابت (ابتدای خط) است پیدا افزایش پیدا می‌کند پس بحثی که پیش می‌آید تعیین ظرفیت جذب راکتیو منبع تثبیت کننده ولتاژ را باید بدانیم؟

$Q_s = f\left(V_s^2 \cdot \frac{1}{Z_0} \cdot tg\beta a\right)$

مثال: در یک خط انتقال به طول 400^{km} در فرکانس 50^{Hz} داریم:

$\beta = \omega\sqrt{LC} = 2\pi f\sqrt{LC}$, $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ = سرعت نور $= 3\times10^5 \frac{km}{sec} \rightarrow \beta = \frac{2\pi\times50}{3\times10^5}$

$\theta = \beta\cdot a = 24°$ درجه

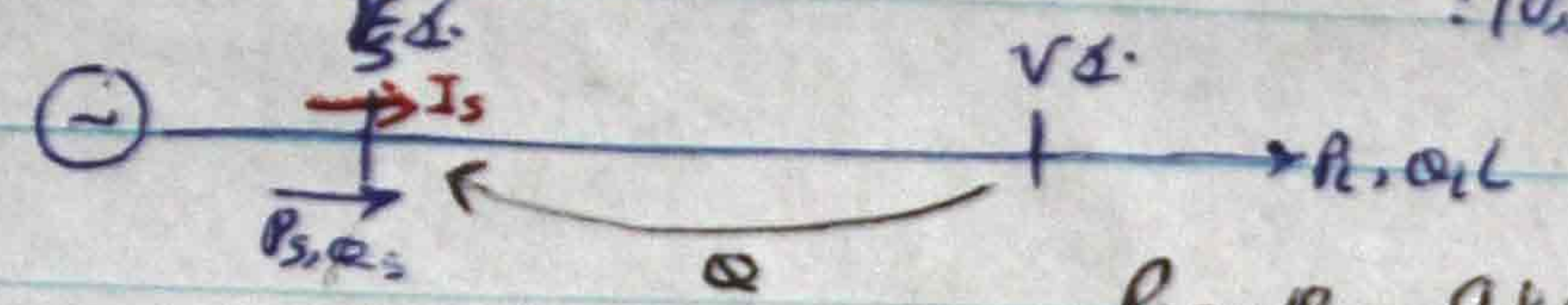
در حالت بی باری $\vec V_r = \frac{\vec V_s}{\cos\beta a} = \frac{1\angle 0^{p.u}}{\cos 24°} = 1.094^{pu} = 9.4\%$ افزایش ولتاژ در انتهای خط ; اگر $V_s = 1\angle0^{pu}$

در حالت بی باری $Q_s = -j\dfrac{|V_s|^2}{Z_0}\tan\theta = -j(1)(0.455) = -j\,0.455$

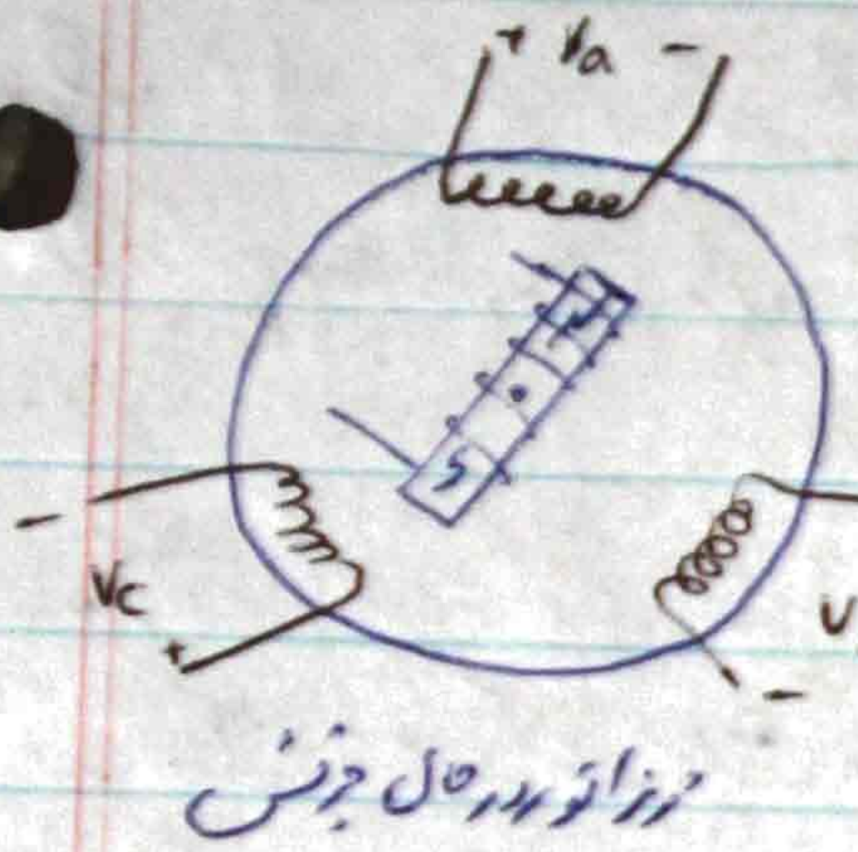
توجه: $Z_0 = 1^{pu}$ ژنراتور می‌بایست بتواند نصف توان راکتیو تولیدی خط را جذب کند.

جلسه هفتم ۹۰/۸/۳۰

منحنی قابلیت بار ژنراتور سنکرون (دیاگرام دایره‌ای):

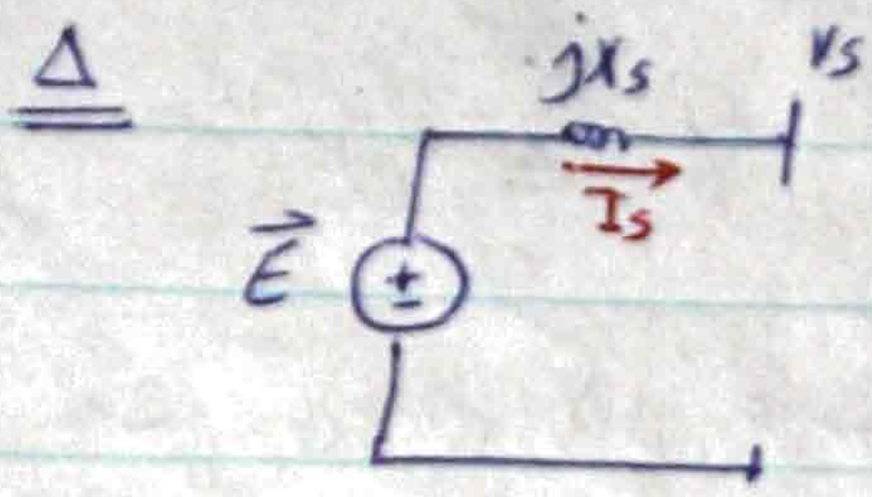


در بی باری $P_L = 0, Q_L = 0$



ژنراتور در حال چرخش

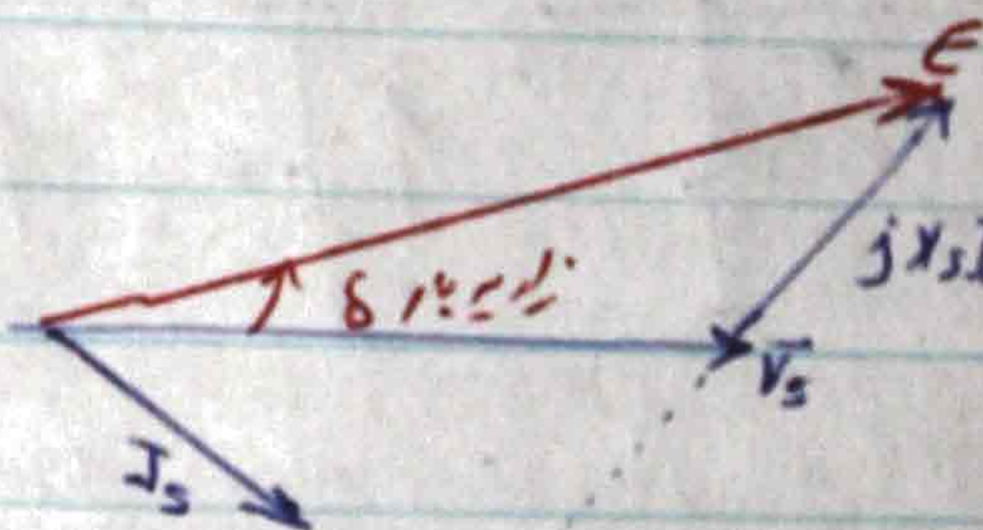
$\triangleq$



$\vec{E} = jX_s\vec{I}_s + \vec{V}_s \quad ; \quad \vec{I}_s = \dfrac{P_s - jQ_s}{\vec{V}_s^*}$

زاویه بار $\longrightarrow \vec{E} = E\angle\delta \quad , \quad \vec{V}_s = V_s\angle 0$ اگر مبدأ در نظر گرفته شود.

اگر $I_s = 0$ (ژنراتور بی بار) $\longrightarrow \vec{V}_s , E$; اگر $I_s \neq 0$



سوال: روش‌های اندازه‌گیری زاویه δ، روش تنظیم زاویه δ ژنراتور (یعنی چطور از ژنراتور بار می‌گیریم) ؟

$$E\cos\delta + jE\sin\delta = jX_s\frac{P_s - jQ_s}{V_s} + V_s \longrightarrow \begin{cases} P_s = \dfrac{E \cdot V_s}{X_s}\cos\delta \\ Q_s = \dfrac{V_s(E\cos\delta - V_s)}{X_s} = \dfrac{V_s E}{X_s}\cos\delta - \dfrac{V_s^2}{X_s} \end{cases}$$

① $P_s^2 + \left(Q_s + \dfrac{V_s^2}{X_s}\right)^2 = \left(\dfrac{V_s E}{X_s}\right)^2$

اگر $E = cte$, $V_s = cte$, X_s: معلوم

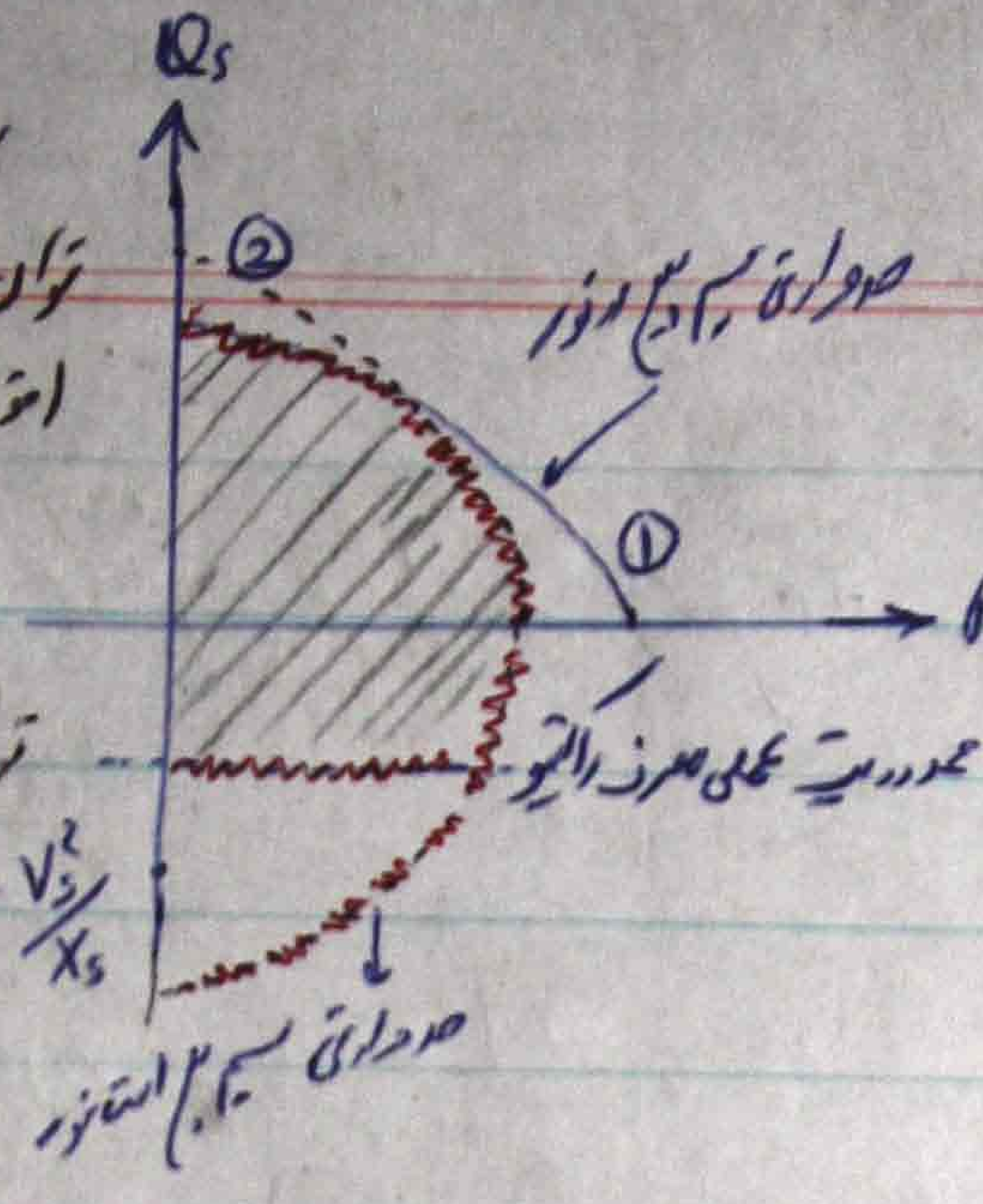
محدودیت سازنده ژنراتور را می‌توان در صفحه P, Q نشان داد.

$P_s^2 + Q_s^2 = S^2 = (V_s I_s)^2$ ②

مثلاً $P_s^2 + Q_s^2 \leqslant 200^{MVA}$

با فرض ثابت بودن V جریان حد مجاز دارد از استاتور

یا حد حرارتی سیم‌پیچ استاتور



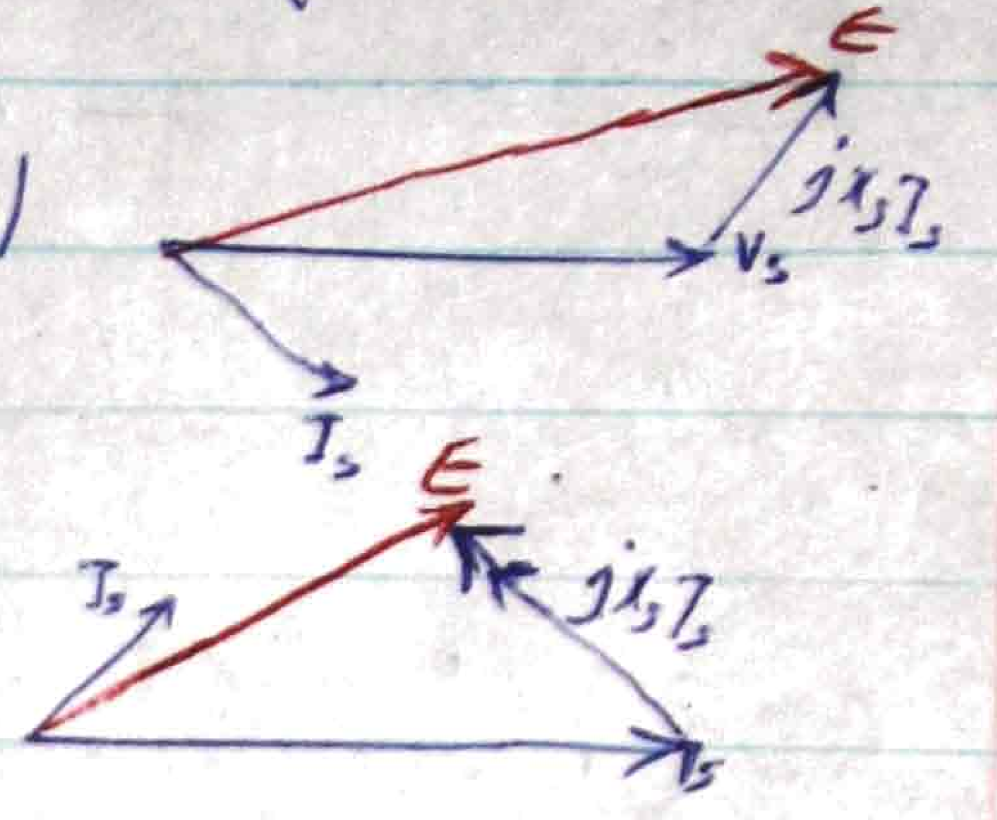
ولتاژ E به سیم‌پیچ میدان روتور بستگی دارد.

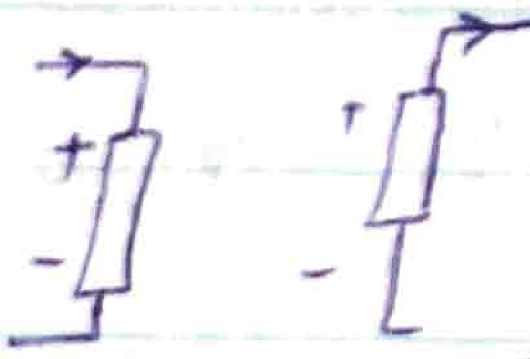
$|E| > |V_s|$ فوق تحریک

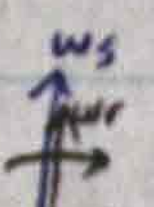
توان راکتیو تولید می‌شود.

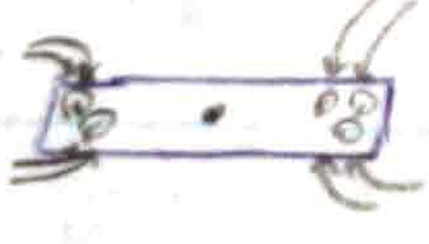
$|V_s| > |E|$ زیر تحریک

توان راکتیو جذب می‌کند







در حالت زیر تحریک ژنراتور استقرار ناپایدار بیشتری دارد چون میدان حاصله از روتور ضعیف است.
اگر میدان حاصله از روتور کم باشد شار حاصل در میدان حاصله از استاتور از کنار روتور رد شده و اثر روتور شدت کم خواهد
به سمت ایجاد چرخش موتور.  (دلایل عدم استفاده یا عدم اینکه ژنراتور نمی‌خواهد توان راکتیو جذب کند)

خط شعاعی از یک سو تغذیه شده در حالت باباری:

$$\vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 I_r \sin\beta(a-x)$$

$$\vec{I}(x) = \vec{I}_r \cos\beta(a-x) + j\frac{\vec{V}_r}{Z_0}\sin\beta(a-x) \qquad \because \vec{V}_r = Z_0 \vec{I}_r$$

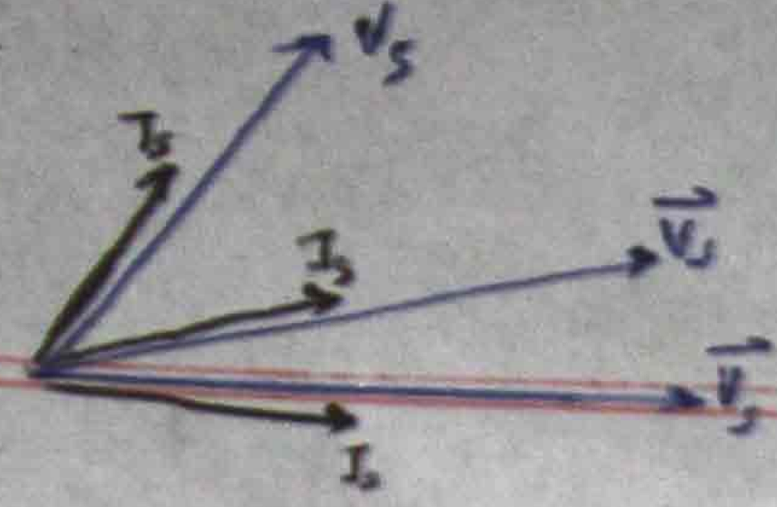
$$\vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + j\vec{V}_r \sin\beta(a-x) \longrightarrow \vec{V}(x) = \vec{V}_r e^{j\beta(a-x)}$$

$$\vec{I}(x) = \vec{I}_r \cos\beta(a-x) + jI_r \sin\beta(a-x) \longrightarrow \vec{I}_r(x) = \vec{I}_r e^{j\beta(a-x)}$$

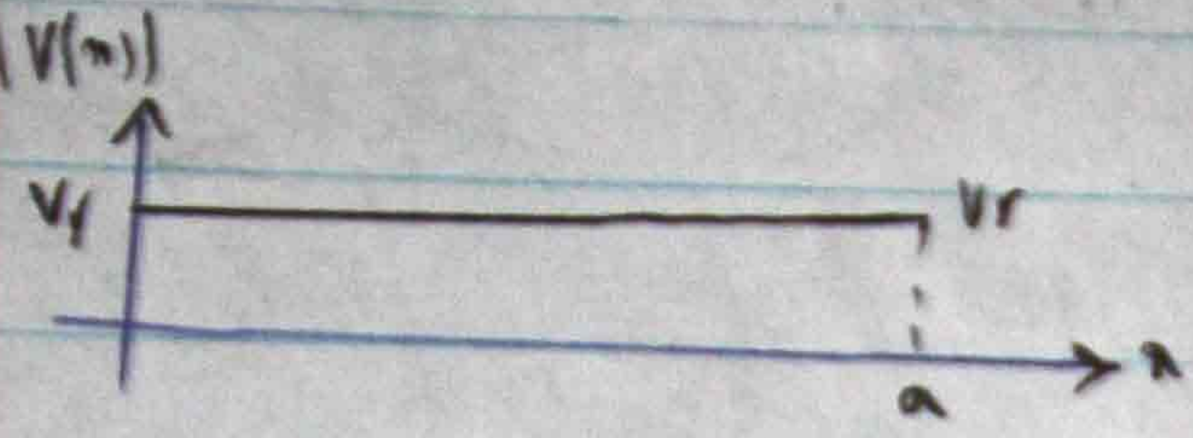
در نتیجه با برقراری مقاومت به اندازه امپدانس مشخصه خط انتقال در انتهای خط خواهیم داشت:

$$\frac{\vec{V}(x)}{\vec{I}(x)} = \frac{\vec{V}_r}{I_r} = R$$

۱) ولتاژ و جریان در دو نقطه (مکان) از خط انتقال با هم هم‌فاز خواهند بود.



در هر نقطه هم فاز هستند.



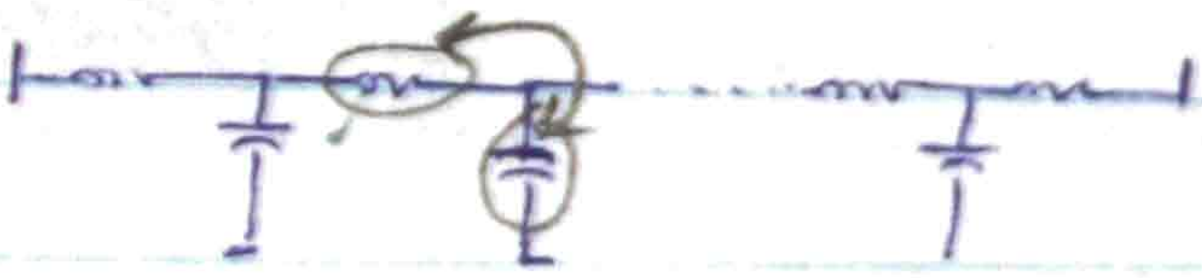
2) اندازه‌ی ولتاژ در سراسر خط در هر مکان ثابت است.

توان راکتیو و اکتیو ابتدا و انتهای خط:

$$P_r = \vec V_r \vec I_r^{\,*} = \vec V_r \cdot \left(\frac{V_r}{R}\right)^* = \frac{V_r^2}{R} + j0$$

$$P_s = \vec V_s \vec I_s^{\,*} = (\vec V_r e^{j\beta a}) \cdot (\vec I_r e^{j\beta a})^* = V_r \cdot I_r^* = \frac{V_r^2}{R} = \frac{V_r^2}{Z_0}$$

3) توان راکتیو تولید شده در هر نقطه خط، با توان راکتیو مصرفی در همان نقطه برابر است. لذا توان راکتیو اضافی یا کمبود توان راکتیو در سراسر خط مشاهده نمی‌شود.



$$\boxed{P_0 = \frac{V_s^2}{Z_0}}$$

4) در این شرایط خاص توانی که از خط انتقال عبور می‌کند بار طبیعی خط نام دارد.

بارگذاری خط در مقادیر P_r, Q_r:

$$\vec V(x) = \vec V_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 \vec I_r \sin\beta(a-x)$$

$$\begin{cases} \vec V_s = \vec V_r \cos\beta a + jZ_0 \vec I_r \sin\beta a \\ \vec I_r = \dfrac{P_r - jQ_r}{\vec V_r^{\,*}} \end{cases}$$

اگر V_r مبنا باشد؛

$$\rightsquigarrow \quad \vec V_s = \vec V_r \cos\beta a + jZ_0 \left(\frac{P_r - jQ_r}{V_r}\right) \sin\beta a$$

$$\begin{cases} P_r = \left(\dfrac{V_s \cdot V_r}{Z_0 \sin\beta a}\right) \sin\delta \\ Q_r = \dfrac{V_r (V_s \cos\delta - V_r \cos\beta a)}{Z_0 \sin\beta a} \end{cases} \to V_r, \delta$$

برحسب نامعلوم

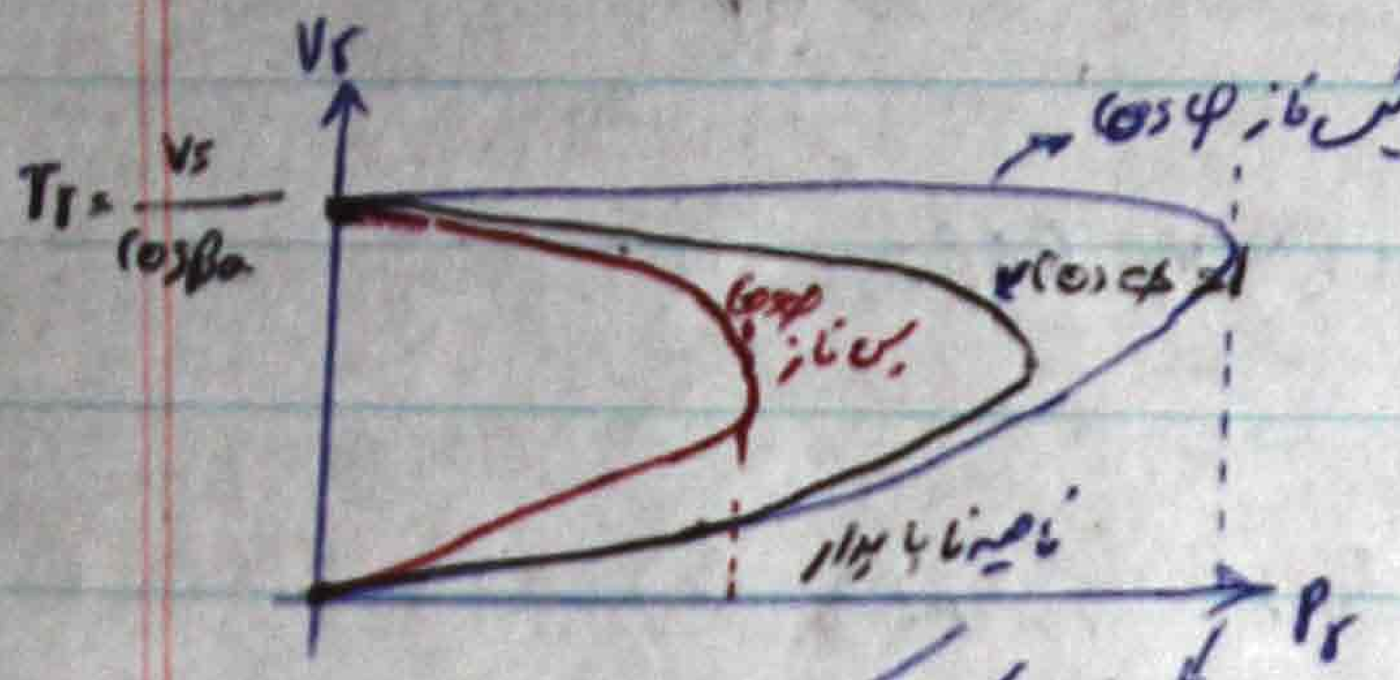
$$V_r = f(P_r, Q_r, \overset{\text{معلوم}}{V_s}, \overset{\text{ثابت}}{Z_0}, \overset{\text{ثابت}}{\beta a})$$

$$V_r = f(P_r)$$

در رسم منحنی $V_r = f(P_r)$ فرض کنید $\cos\varphi_r = 1$

$Q_r = 0 \longrightarrow V_r = 0$

$\longrightarrow V_s\cos\delta - V_r\cos\beta a = 0$



حداکثر توانی که از خط می‌تواند عبور کند

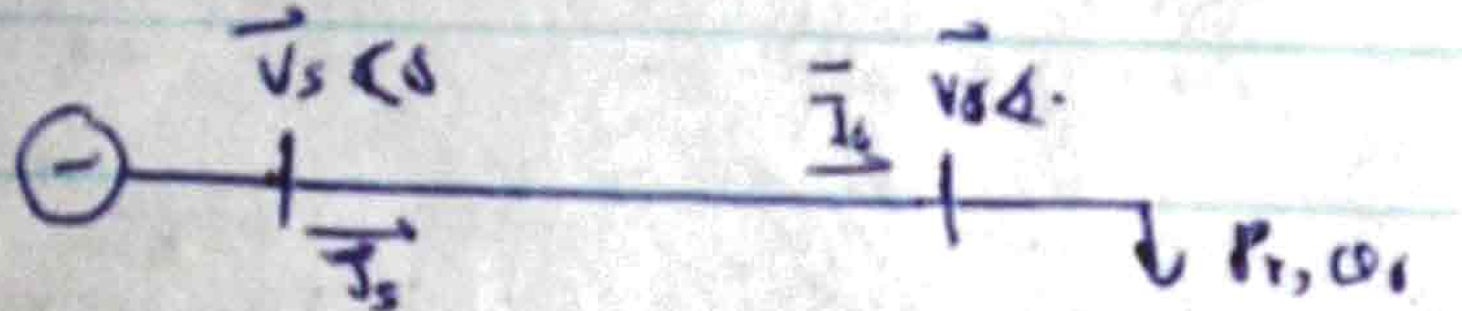
حال فرض کنید $P_r = 0 \longrightarrow V_r = 0$

$\delta = 0$

$\therefore V_s = V_r\cos\beta a \longrightarrow V_r = \frac{V_s}{\cos\beta a}$

جلسه هشتم ۹۰/۷/۹

خط‌هایی که از دو سو تغذیه می‌شوند:

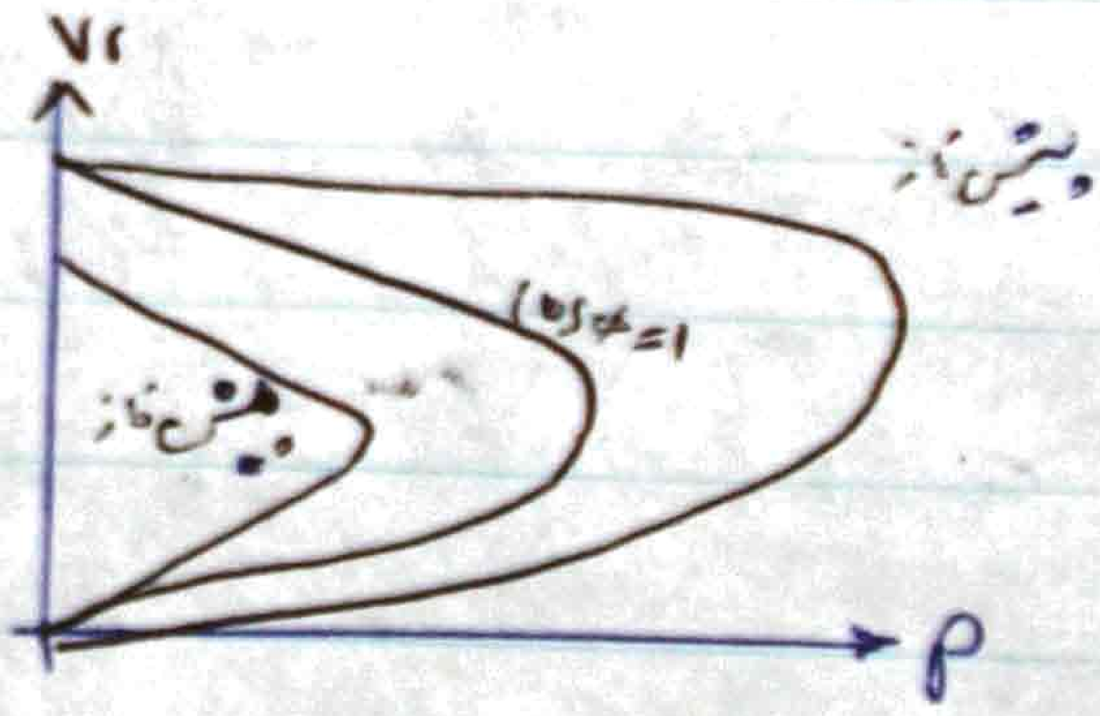


$\vec V(x) = \vec V_r\cos\beta(a-x) + jZ_0\vec I_r\sin\beta(a-x)$

$\vec I(x) = \vec I_r\cos\beta(a-x) + j\frac{\vec V_r}{Z_0}\sin\beta(a-x)$

$\vec I_r = \frac{P_r - jQ_r}{\vec V_r^*}$

$$\begin{cases} P_r = \dfrac{V_s \cdot V_r}{Z_0\sin\beta a}\sin\delta \\ Q_r = \dfrac{V_r(V_s\cos\delta - V_r\cos\beta a)}{|Z_0\sin\beta a|} \end{cases}$$

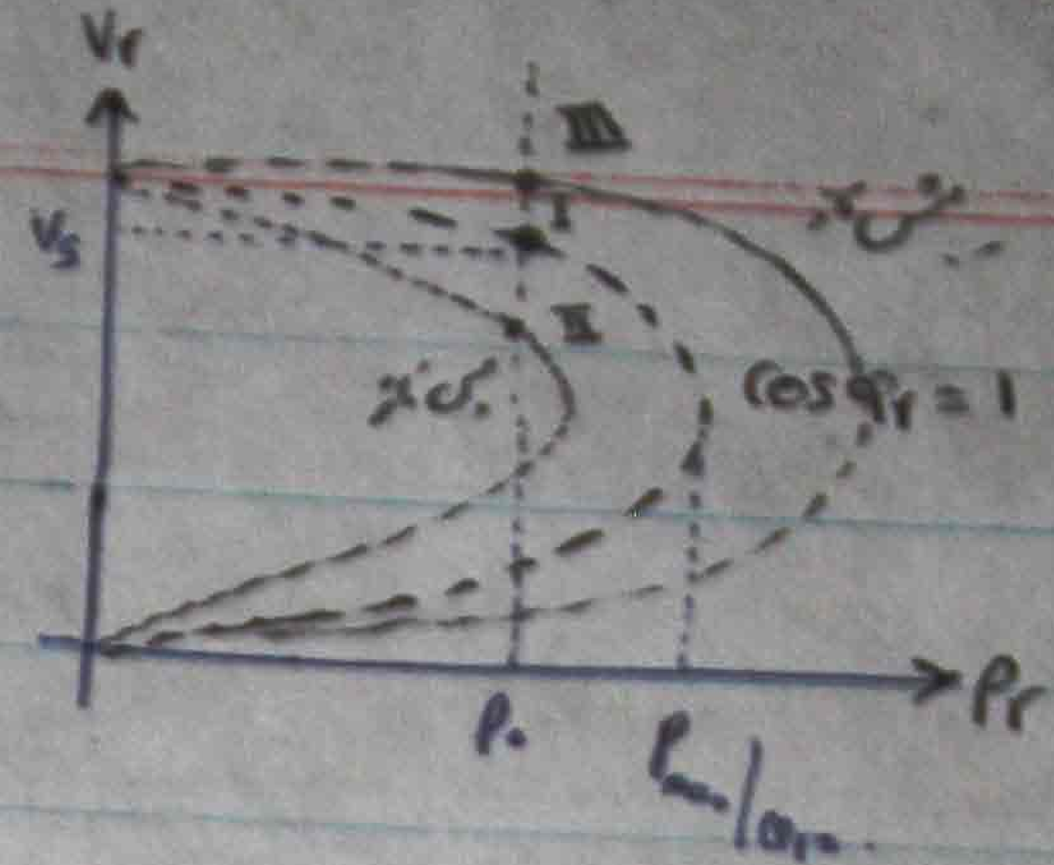


فرض کنید از خط توان P_0 عبور کند $Q_r = 0$ $(\cos\varphi_r = 1)$

اگر $Q_r = 0 \longrightarrow V_s\cos\delta - V_r\cos\beta a = 0 \longrightarrow V_s\cos\delta = V_r\cos\beta a$ (1)

اگر $P_r = P_0 \longrightarrow \frac{V_s \cdot V_r}{Z_0\sin\beta a}\sin\delta = \frac{V_r \cdot V_r}{Z_0} \longrightarrow V_s\sin\delta = V_r\sin\beta a$ (2)

(1)(2) $\rightsquigarrow tg\delta = tg\beta a \longrightarrow \delta = \beta a$ (3)



$$\delta = \beta a \rightarrow V_s = V_r \quad (4)$$

$$P_0 = \frac{V_s^2}{Z_0} \quad (5)$$

∴ فرض کنید از خط توان P_0 عبور کند ، $Q_r > 0$ (پس‌فاز ، $\cos\varphi_r < 1$)

if $Q_r > 0 \rightarrow V_s \cos\delta - V_r \cos\beta a > 0 \rightarrow V_s \cos\delta > V_r \cos\beta a \quad (1)$

if $P_r = P_0 \rightarrow \frac{V_s V_r}{Z_0 \sin\beta a} \sin\delta = \frac{V_r \cdot V_r}{Z_0} \rightarrow V_s \sin\delta = V_r \sin\beta a \quad (2)$

$$\cot\delta > \cot\beta a \rightarrow \delta < \beta a \quad (3)$$

$$(3),(2) \rightarrow V_r < V_s \quad (4)$$

∴ فرض کنید از خط توان P_0 عبور کند ، $Q_r < 0$ (پیش‌فاز ، $\cos\varphi_r < 1$)

اگر $Q_r < 0 \rightarrow V_s \cos\delta - V_s \cos\beta a < 0 \rightarrow V_s \cos\delta < V_s \cos\beta a \quad (1)$

اگر $P_r = P_0 \rightarrow \frac{V_s V_r}{Z_0 \sin\beta a} \sin\delta = \frac{V_r \cdot V_r}{Z_0} \Longrightarrow V_s \sin\delta = V_r \sin\beta a \quad (2)$

$$(1)(2) \rightarrow \cot\delta < \cot\beta a \rightarrow \delta < \beta a \quad (3)$$

$$(3),(2) \rightarrow V_r > V_s \quad (4)$$

حداکثر توان عبوری از خط به ازای $\cos\varphi_r$ های مختلف :

$$(I) \rightarrow Q_r = 0 \rightarrow V_s \cos\beta a = V_r \cos\beta a \rightarrow V_r = \frac{V_s \cos\beta a}{\cos\beta a}$$

$$\therefore P_r = \frac{V_s \cdot V_s \frac{\cos\delta}{\cos\beta a}}{Z_0 \sin\beta a} \sin\beta a \rightarrow P_r = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin 2\beta a} \sin 2\delta$$

$$\cos\varphi_r = 1 \ (Q_r = 0) \rightarrow P_{max} = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin 2\beta a}$$

$(II)\ Q_r > 0 \rightarrow V_s \cos\delta > V_r \cos\beta a \longrightarrow V_r < \dfrac{V_s \cos\delta}{\cos\beta a}$

$\cos\varphi_r = 1$ در نتیجه نسبت به $\longrightarrow P_{r\,max(II)} < \dfrac{V_s^2}{Z \cdot \sin 2\beta a}$

$(III)\ Q_r < 0 \rightarrow V_s \cos\delta < V_r \cos\beta a \rightarrow V_r > \dfrac{V_s \cos\delta}{\cos\beta a}$

$\cos\varphi_r = 1$ در نتیجه نسبت به حالت $\longrightarrow P_{r\,max(III)} > \dfrac{V_s^2}{Z \cdot \sin 2\beta a}$

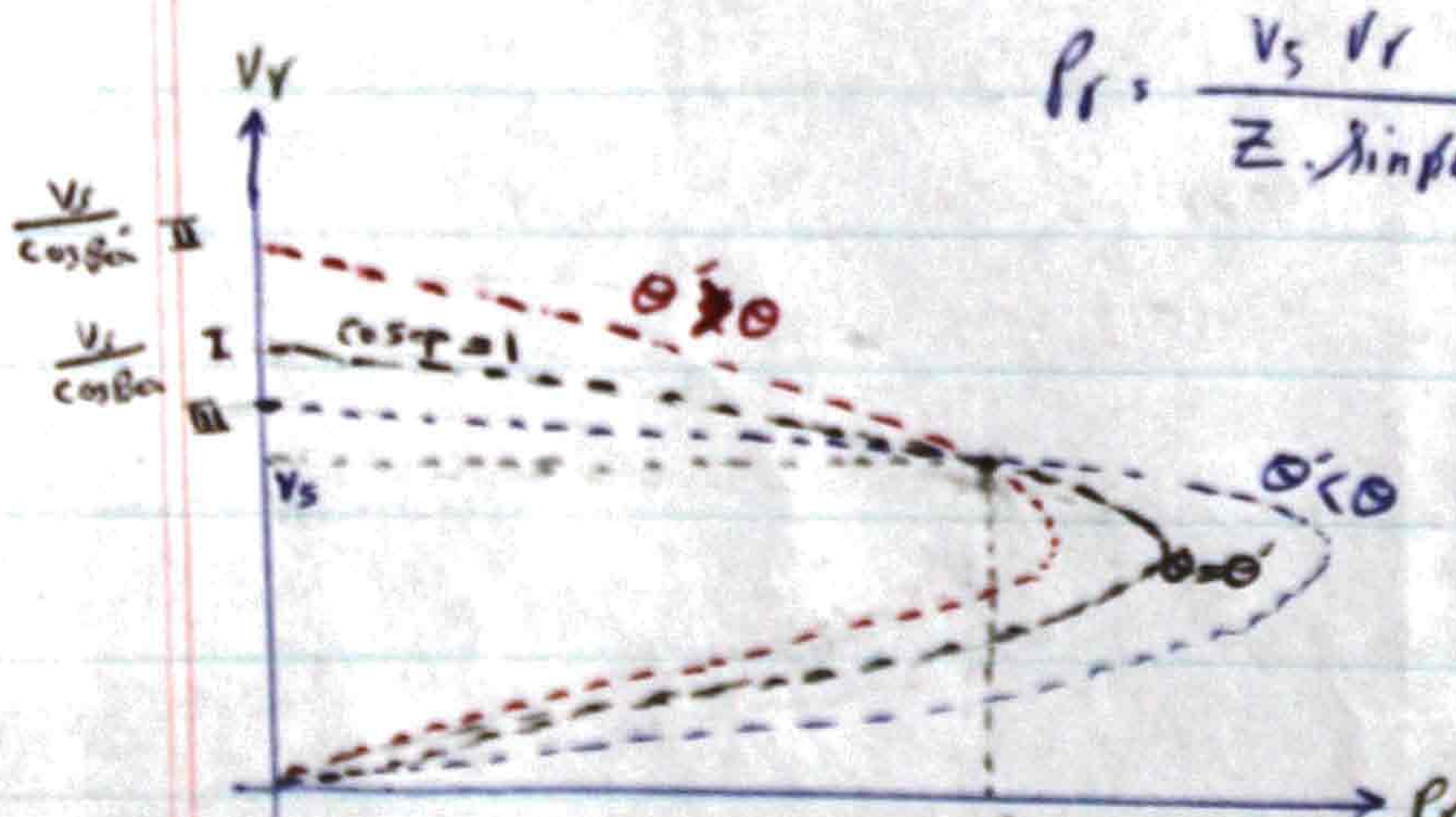
توان راکتیو یک سرویس جانبی در سیستم قدرت است. Ancillary service

تأثیر طول خط (βa) در انتقال حداکثر توان:

فرض: $\cos\varphi_r = 1$ ، $Q_r = 0$

$V_s \cos\delta = V_r \cos\beta a \ ; \ P_r = \dfrac{V_s^2}{Z \cdot \sin 2\beta a} \sin 2\delta$

$P_r = \dfrac{V_s V_r}{Z \cdot \sin\beta a} \sin\delta \ ; \ P_r = P_0 \longrightarrow \delta = \beta a$



βa: طول الکتریکی خط

a: طول خط (جغرافیایی)

حال فرض می‌کنیم طول الکتریکی خط افزایش پیدا کند

$\theta' > \theta \rightarrow \beta a' > \beta a$

(II) در حالت پایداری $P_r = P_0 \rightarrow V_r = \dfrac{V_s}{\cos\beta a}$

$(III)\ \theta' < \theta \rightarrow \beta a' < \beta a$

خط انتقال، حداکثر توانی که از خط قابل عبور است به سه عامل مهم ربط (بستگی) دارد:

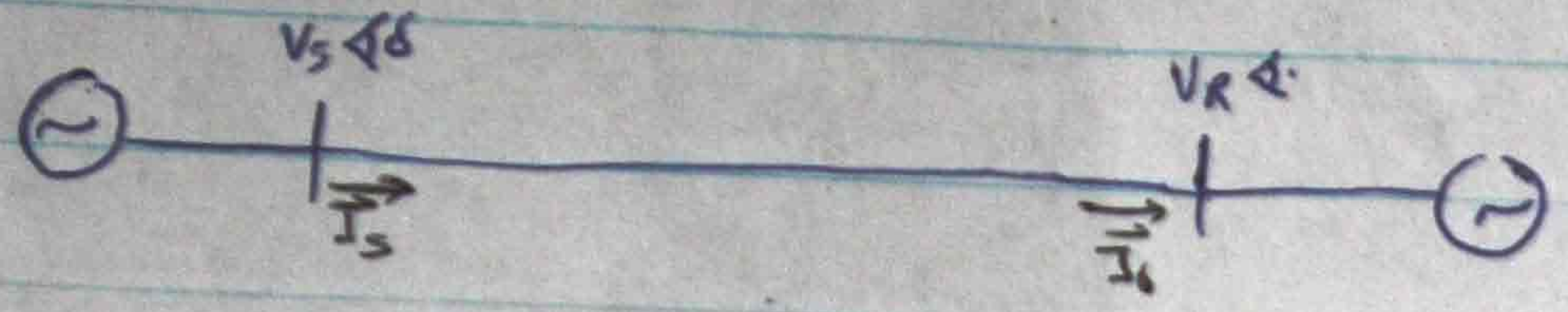
1- حد حرارتی خط انتقال: در خطوط انتقال کوتاه $a \le 80^{km}$ (به طور مطلق می‌توانیم کل توان را انتقال دهیم)

2- حد ولتاژ خط: خطوط کوتاه، خطوط متوسط $80^{km} \le a < 250^{km}$

3- حد پایداری زاویه‌ای: خطوط بلند، توان با δ زیاد می‌شود.

جلسه نهم ۹۰/۹/۲۱

مطالعه خط از دو سو تغذیه شده :



$$\vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 I_r \sin\beta(a-x) \rightarrow \vec{V}_s = V_r \cos\beta a + jZ_0 I_r \sin\beta a$$

$$\vec{i}(x) = \vec{I}_r \cos\beta(a-x) + j\frac{\vec{V}_r}{Z_0}\sin\beta(a-x) \Longrightarrow \vec{I}_r = \frac{\vec{V}_s - \vec{V}_r\cos\beta a}{jZ_0 \sin\beta a}$$

$$\rightarrow \vec{V}(x) = \vec{V}_r \cos\beta(a-x) + jZ_0 \cdot \frac{V_s - V_r\cos\beta a}{jZ_0 \sin\beta a}\cdot \sin\beta(a-x)$$

$$\vec{V}(x) = \frac{\sin\beta(a-x)}{\sin\beta a}\vec{V}_s + \frac{\sin\beta x}{\sin\beta a}\cdot\vec{V}_r$$ ولتاژ در هر نقطه از خط

$$\vec{i}(x) = -j\frac{\vec{V}_s}{Z_0}\frac{\cos\beta(a-x)}{\sin\beta a} + j\frac{\vec{V}_r}{Z_0}\frac{\cos\beta x}{\sin\beta a}$$ جریان در هر نقطه از خط

دو حالت را بررسی می‌کنیم: حالت اول : $\vec{V}_s = \vec{V}_r$ $\left[\sin a + \sin b = 2\sin\left(\frac{a+b}{2}\right)\cos\left(\frac{a-b}{2}\right)\right]$

$$\vec{V}(x) = \frac{\sin\beta(a-x) + \sin\beta x}{\sin\beta a}\cdot\vec{V}_s \longrightarrow \vec{V}(x) = \frac{\cos\beta\left(\frac{a}{2}-x\right)}{\cos\beta\frac{a}{2}}\cdot\vec{V}_s$$

$$\vec{i}(x) = -j\frac{V_0}{Z_0}\frac{\cos\beta(a-x) - \cos\beta x}{\sin\beta a} \rightarrow \vec{i}(x) = +j\frac{V_0}{Z_0}\frac{\sin\beta\left(\frac{a}{2}-x\right)}{\cos\beta\frac{a}{2}}$$

اگر $x = 0 \rightarrow \vec{I}_s = +j\frac{V_s}{Z_0}\,tg\frac{\beta a}{2}$

اگر $x = a \rightarrow \vec{I}_r = -j\frac{V_s}{Z_0}\,tg\frac{\beta a}{2}$

اگر $x = \frac{a}{2} \rightarrow V_m = \frac{1}{\cos\frac{\beta a}{2}}\cdot V_s \;;\; \vec{I}_m = 0$

محاسبات توان در ابتدا، انتها و وسط خط :

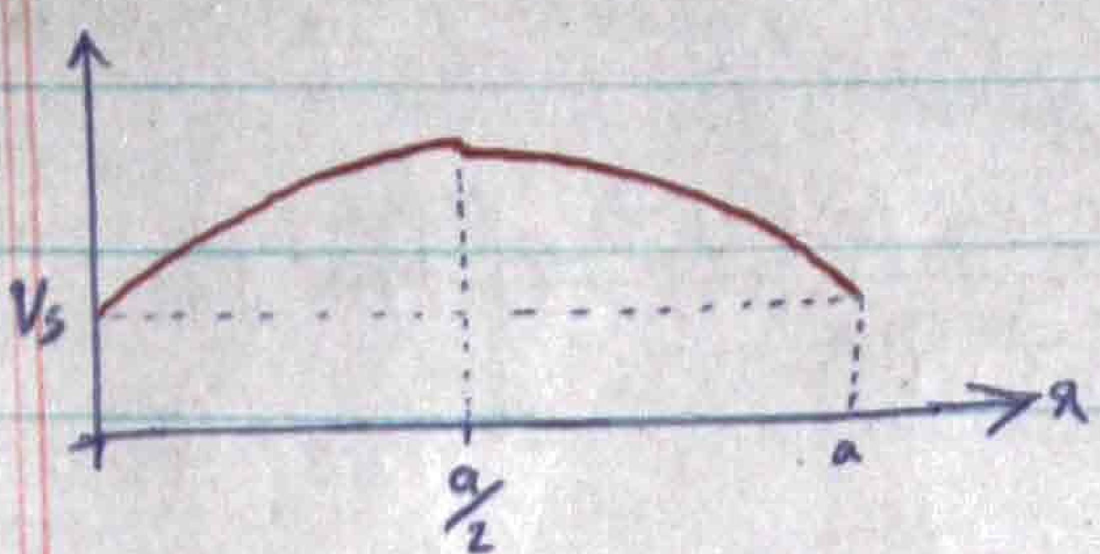
تولیدی $\vec{S}_s = \vec{V}_s\cdot\vec{I}_s^{\,*} = 0 - j\frac{V_s^2}{Z_0}\,tg\frac{\beta a}{2}$, جذبی $\vec{S}_r = \vec{V}_r\cdot\vec{I}_r^{\,*} = 0 + j\frac{V_s^2}{Z_0}\,tg\frac{\beta a}{2}$

$$S_m = \vec{V}_m\vec{I}_m^{\,*} = 0 + j0$$

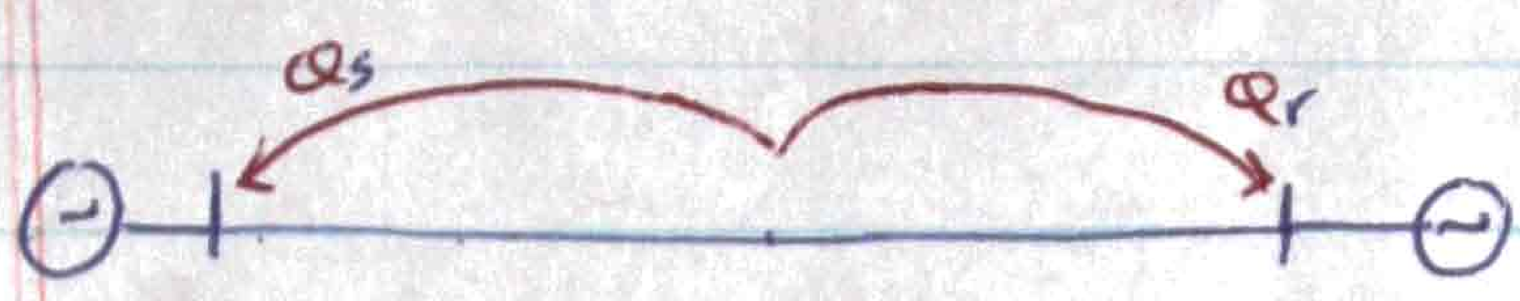
نتایج جمع‌بندی:

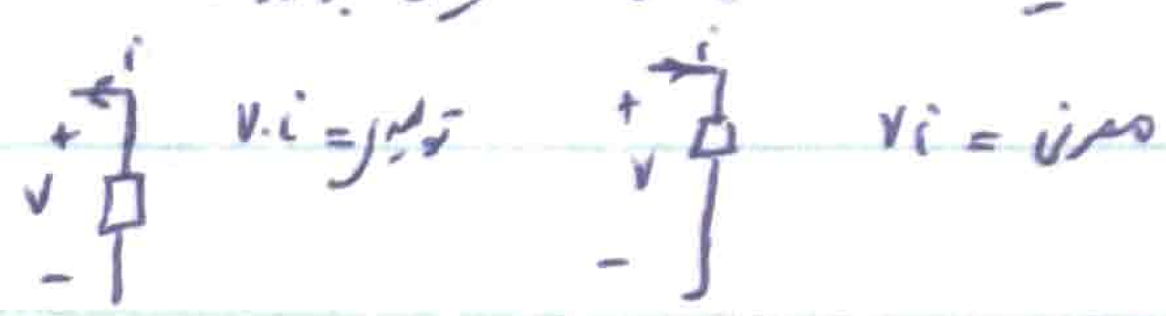
۱- اگر در خط دوسو تغذیه شده $\vec{V}_s = \vec{V}_r$ باشد آنگاه خط در شرایط بی‌باری $P_{\frac{r}{m}} = 0$ قرار دارد.

2- در حالت بی‌باری $\vec{V}_m = \frac{1}{\cos\frac{\beta a}{2}} \cdot \vec{V}_s$ و در ضمن پروفیل ولتاژ به صورت زیر خواهد بود:



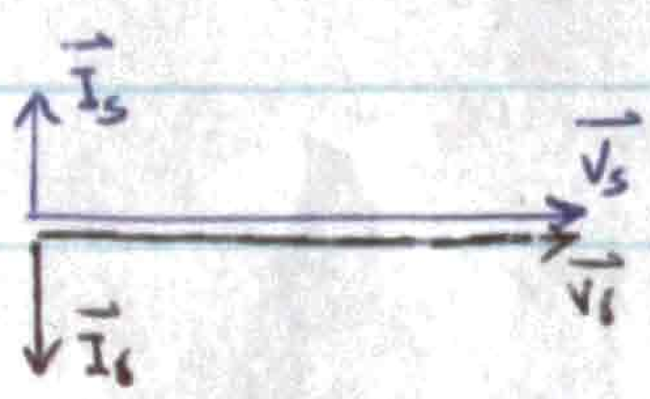
3- مسیر عبور تولید راکتیو بر روی خط:





۴- رفتار خط از دو سو تغذیه شده در حالت بی‌باری درست شبیه رفتار خط از یک سو تغذیه شده است ولی با طول نصف.

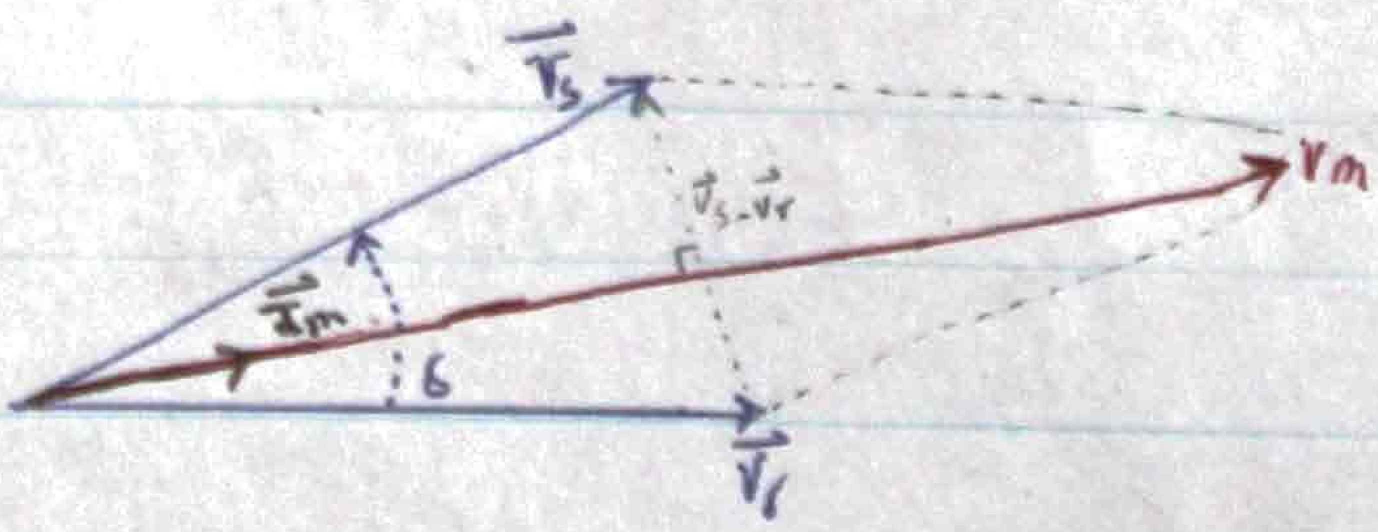
5- فازور ولتاژ و جریان‌ها در ابتدا و انتهای خط:



حالت ب: $|V_s| = |V_r|$

$$x = \frac{a}{2} \rightarrow \vec{V}_m = \frac{\sin\beta\frac{a}{2}}{\sin\beta a} \cdot \vec{V}_s + \frac{\sin\beta\frac{a}{2}}{\sin\beta a} \cdot \vec{V}_r = \frac{\sin\beta\frac{a}{2}}{\sin\beta a}\left(\vec{V}_s + \vec{V}_r\right) = \frac{1}{2\cos\beta\frac{a}{2}}\left(\vec{V}_s + \vec{V}_r\right)$$

$$\vec{I}_m = -j\frac{\cos\beta\frac{a}{2}}{Z_0\left(2\sin\beta\frac{a}{2}\cos\beta\frac{a}{2}\right)}\left(\vec{V}_s - \vec{V}_r\right) = -j\frac{1}{2Z_0 \sin\beta\frac{a}{2}}\left(\vec{V}_s - \vec{V}_r\right)$$



$$\vec{S}_m = \vec{V}_m \cdot \vec{I}_m^* = \overset{\neq 0}{P} + j0$$

حتماً خط در شرایط بارداری کار می‌کند.

محاسبات توان در ابتدا و انتهای خط:

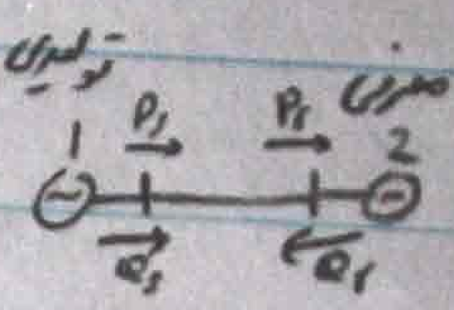
$$\vec{I}_s = \vec{I}(x)\Big|_{x=0} = -j\frac{\vec{V}_s}{Z_0}\frac{\cos\beta a}{\sin\beta a} + j\frac{\vec{V}_r}{Z_0}\frac{1}{\sin\beta a}$$

$$\vec{S}_s = \vec{V}_s \cdot \vec{I}_s^* = +j\frac{V_s^2}{Z_0}\frac{\cos\beta a}{\sin\beta a} - j\frac{1}{Z_0 \sin\beta a}\cdot\left(|V_s||V_r|\right)\left(\cos\delta + j\sin\delta\right) = P_s + jQ_s$$

$$P_s = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}\cdot \sin\delta \quad ; \quad Q_s = \frac{V_s^2\,(\cos\beta a - \cos\delta)}{Z_0 \sin\beta a} \quad , \; P_0 = \frac{V_s^2}{Z_0}$$

$$\vec{I}_r = I(x)\Big|_{x=a} = -j\,\frac{\vec{V}_s}{Z_0}\,\frac{1}{\sin\beta a} + j\,\frac{\vec{V}_r}{Z_0}\,\frac{\cos\beta a}{\sin\beta a} \Rightarrow \vec{S}_r = \vec{P}_r + j\,Q_r$$

$$P_r = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}\cdot \sin\delta \quad ; \quad Q_r = \frac{\overbrace{V_s^2}^{P_0}\,(\cos\delta - \cos\beta a)}{Z_0 \sin\beta a} \Rightarrow \begin{cases} P_r = P_s \\ Q_r = -Q_s \end{cases}$$

اگر  در ناحیه ۱ توان تولید می‌شود در ناحیه ۲ همان مقدار توان جذب می‌شود. در ناحیه ۱ راکتیو تزریق داریم و از ۲ هم تزریق می‌شود

حال فرض کنیم خط در شرایط ایده‌آل با باری بهره‌برداری می‌گردد:

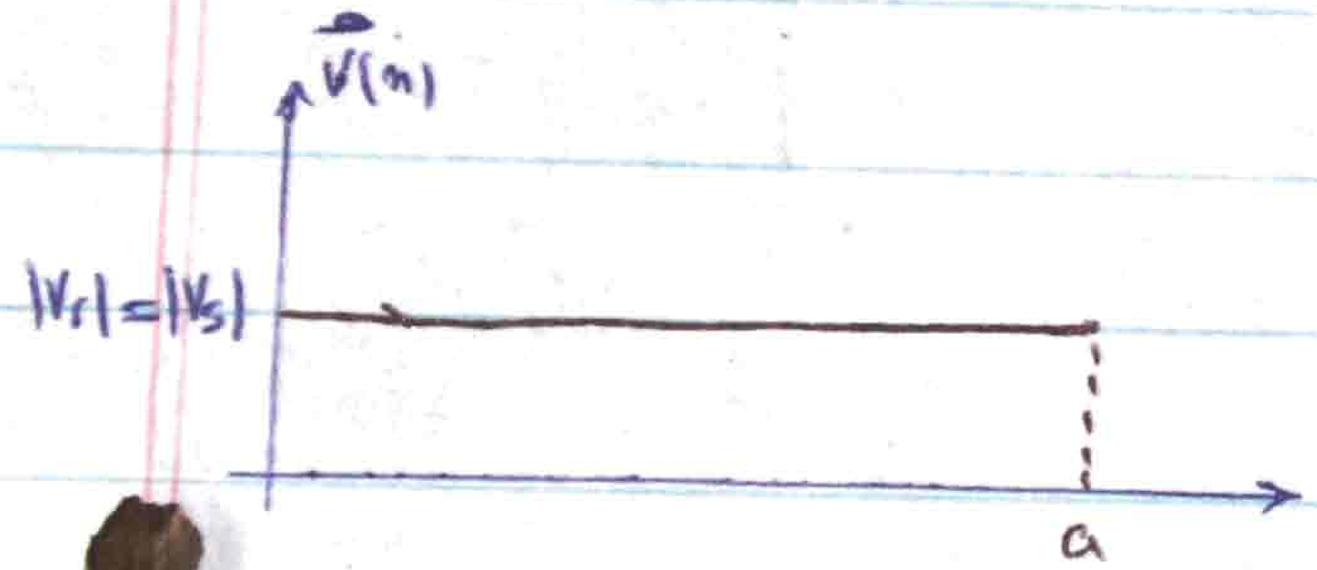
الف: $P = P_0$

$$P_s = P_r = P_0 \Rightarrow \frac{P_0}{\sin\beta a}\cdot\sin\delta \Longrightarrow \delta = \beta a$$

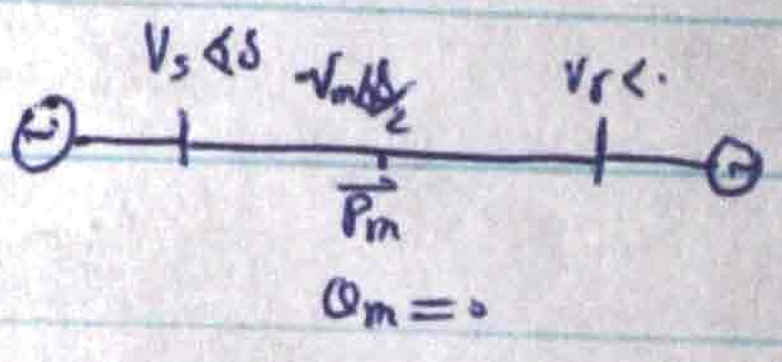
در این حالت خط نه توان راکتیو تولید و نه جذب می‌کند. $Q_s = -Q_r = 0$ ::

ولتاژ در میانه خط:

$$P_m = \frac{V_s\cdot V_m}{Z_0 \sin\frac{\beta a}{2}}\cdot \sin\frac{\delta}{2} = P_0 \xrightarrow{\delta=\beta a} = \frac{V_s^2}{Z_0} \Longrightarrow |V_m| = |V_s|$$



$$P_s = P_r = P_0 = \frac{V_s^2}{Z_0}$$



ب: $P < P_0$ (کم باری)

$$P = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}\cdot\sin\delta < \overbrace{\frac{V_s^2}{Z_0}}^{P_0} \Longrightarrow \sin\delta < \sin\beta a \rightarrow \delta < \beta a$$

$$Q_s = \frac{P_0}{\sin\beta a}(\cos\beta a - \cos\delta) \Longrightarrow Q_s < 0$$

توان راکتیو در ابتدای خط جذب می‌شود.

$$Q_r = \frac{P_0}{\sin\beta a}(\cos\delta - \cos\beta a) \Longrightarrow Q_r > 0$$

توان راکتیو در انتهای خط جذب می‌شود.

$$Q_m = \frac{V_m\left(V_s\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0 \sin\frac{\beta a}{2}} = 0 \rightarrow V_s\cos\frac{\delta}{2} = V_m\cos\frac{\beta a}{2} \xrightarrow{\delta<\beta a} V_m > V_s$$

ج: $P > P_0$

$$P > P_0 \sim \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}\cdot\sin\delta > \frac{V_s^2}{Z_0} \longrightarrow \delta > \beta a$$

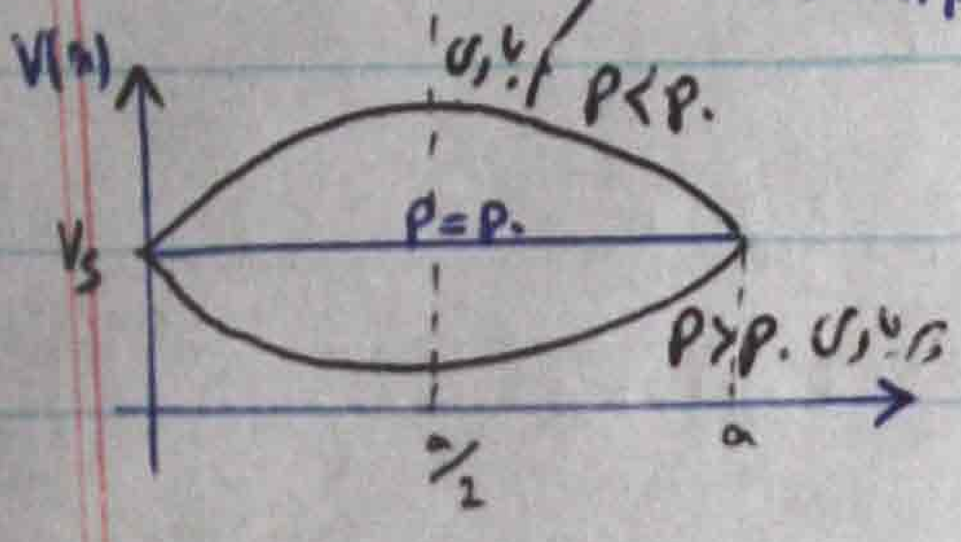
$$Q_s = \frac{P_0}{\sin\beta a}\left(\cos\beta a - \cos\delta\right) > 0$$

توان راکتیو در ابتدای خط تولید می‌شود.

$$Q_r = \frac{P_0}{\sin\beta a}\left(\cos\delta - \cos\beta a\right) < 0$$

توان راکتیو در انتهای خط تولید می‌شود.

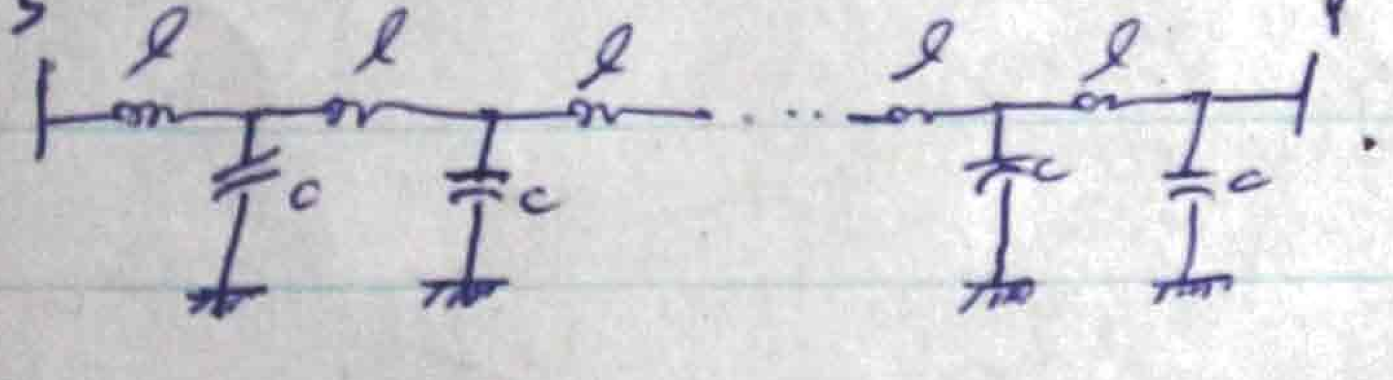
$$Q_m = 0 = \frac{V_m\left(V_s\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0\sin\beta a} \longrightarrow V_s\cos\frac{\delta}{2} = V_m\cos\frac{\beta a}{2} \xrightarrow{\delta > \beta a} V_m < V_s$$



جلسه دهم ۹۰/۹/۲۸

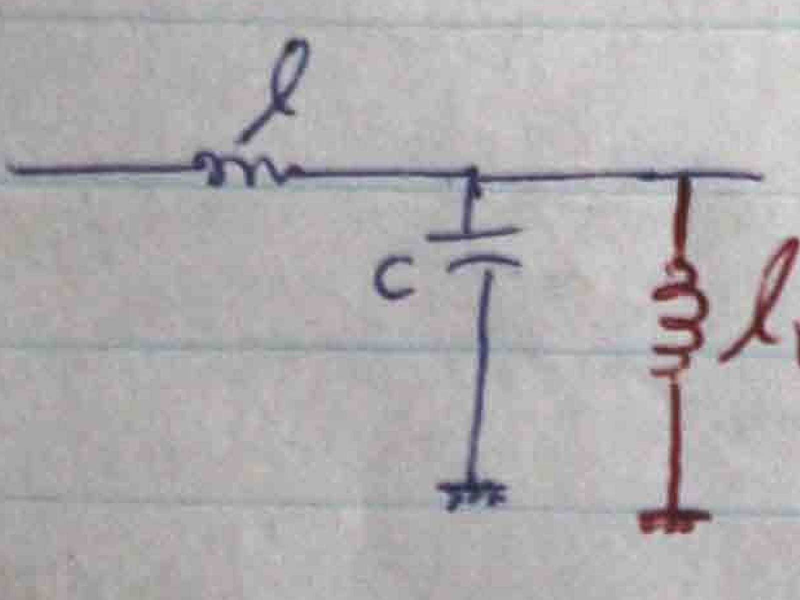
جبران سازی خطوط انتقال:

با تلفات صفر



جبران سازی موازی متمرکز خط:

جبران گسترده خط انتقال $\begin{cases}\text{جبران موازی خط} \\ \text{جبران سری خط}\end{cases}$



قبل از جبران: l : امپدانس $jl\omega$ ؛ c : ادمیتانس $jc\omega$

بعد از جبران سازی: l : $l\omega$

c' : $jc'\omega = jc\omega + \frac{1}{j\omega l_r}$

$$jc'\omega = jc\omega\left(1 - \frac{\frac{1}{l_r\omega}}{c\omega}\right)$$

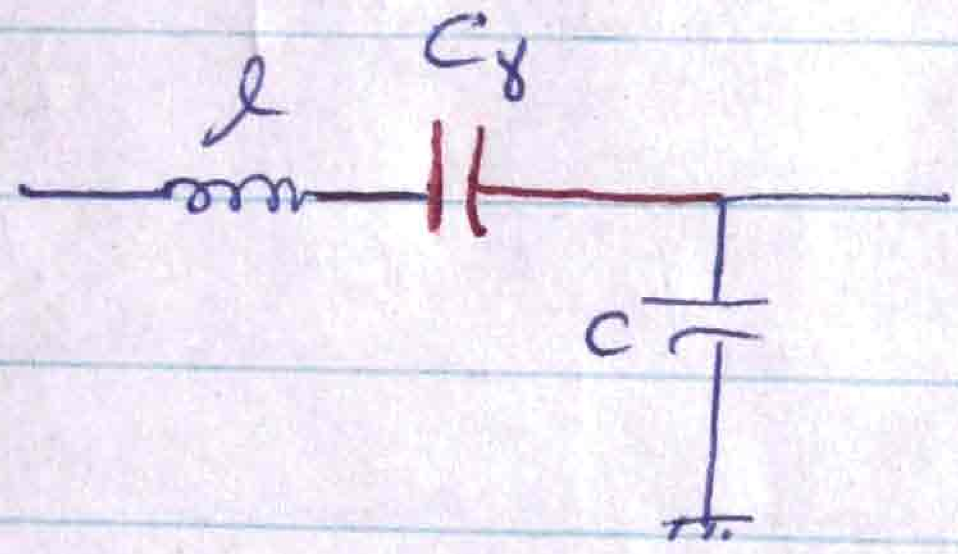
$$c' = c\left(1 - \frac{\frac{1}{l_r\omega}}{c\omega}\right)$$

اگر $\frac{\frac{1}{l_r\omega}}{c\omega} = k_{sh}$ (ضریب جبران سازی موازی)

$\longrightarrow c' = c(1 - k_{sh})$

نوع جبران: موازی	ثابت فاز (الکتریکی خط) $\beta = \omega\sqrt{LC}$	امپدانس مشخصه خط $Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$
سلفی $K_{sh}>0$	$\downarrow \beta' = \beta\sqrt{1-K_{sh}}$	$\uparrow Z_0' = \frac{Z_0}{\sqrt{1-K_{sh}}}$
خازنی $K_{sh}<0$	$\uparrow \beta' = \beta\sqrt{1-K_{sh}}$	$\downarrow Z_0' = \frac{Z_0}{\sqrt{1-K_{sh}}}$

نوع جبران سری	$\beta = \omega\sqrt{LC}$	$Z_0 = \sqrt{\frac{l}{c}}$
سلفی $K_{se}<0$	$\uparrow \beta' = \beta\sqrt{1-K_{se}}$	$\uparrow Z_0' = Z_0\sqrt{1-K_{se}}$
خازنی $K_{se}>0$	$\downarrow \beta' = \beta\sqrt{1-K_{se}}$	$\downarrow Z_0' = Z_0\sqrt{1-K_{se}}$



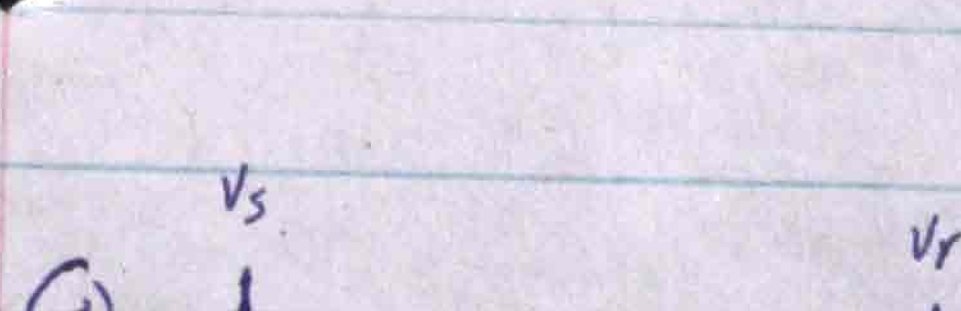
ب: جبران سری خط انتقال (گسترده):

قبل از جبران: $c \to jc\omega$ ، $l \to jl\omega$

بعد از جبران: $c \to c\omega$

$$jl'\omega = jl\omega + \frac{1}{jC_\gamma\omega} \longrightarrow l'\omega = l\omega\left(1-\frac{\frac{1}{C_\gamma\omega}}{l\omega}\right)$$

ضریب جبران سازی سری خط اثر: $l' = l(1-K_{se}) \longrightarrow K_{se} = \frac{\frac{1}{C_\gamma\omega}}{l\omega}$



1. اثر جبران سازی خط بر روی مشخصه‌ی عملکرد آن در بی‌باری:

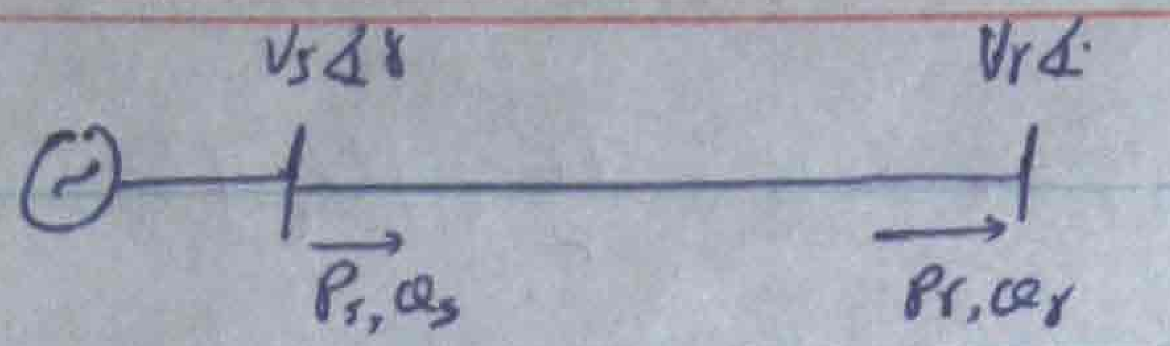
در زمان بی باری:
$$V_r = \frac{V_s}{\cos\beta a}$$
$$Q_s = -j\frac{V_s^2}{Z_0}\tan\beta a$$

از دیدگاه کنترل ولتاژ با نسبت ولتاژ باید β کاهش داده شود در برابر کاهش V_r:
1- جبران موازی سلفی
2- جبران سری خازنی

از دیدگاه کنترل یا کاهش توان راکتیو جذبی توسط منبع (ولتاژ ابتدا و انتها):
1- جبران موازی سلفی
2- جبران سری سلفی
افزایش Z_0 باید صورت گیرد.

در حالت کلی برای رسیدن به هر دو هدف: ← جبران موازی سلفی

2_ تاثیر جبران سازی گسترده در بهبود عملکرد خط در زمان بی باری :



$$P_s = P_r = \frac{V_s \cdot V_r}{Z_0 \cdot \sin\beta a}\sin\delta$$

$$Q_s = -\frac{V_s(V_r\cos\delta - V_s\cos\beta a)}{Z_0 \sin\beta a} \quad ; \quad Q_r = \frac{V_r(V_s\cos\delta - V_r\cos\beta a)}{Z_0 \sin\beta a}$$

فرض : هدف تثبیت ولتاژهای خط در زمان بی باری باشد یعنی $|V_s| = |V_r|$

$$P_s = P_r = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}\sin\delta \longrightarrow P_0 = \frac{V_s^2}{Z_0} \quad ; \quad P_{max} = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a}$$

با توجه به روابط زیر می توان دریافت هدف اصلی در بهره برداری آن است که P_0 یا P_{max} تا حد ممکن افزایش پیدا کند.

$$Q_s = -Q_r = \frac{V_s^2(\cos\beta a - \cos\delta)}{Z_0 \sin\beta a}$$

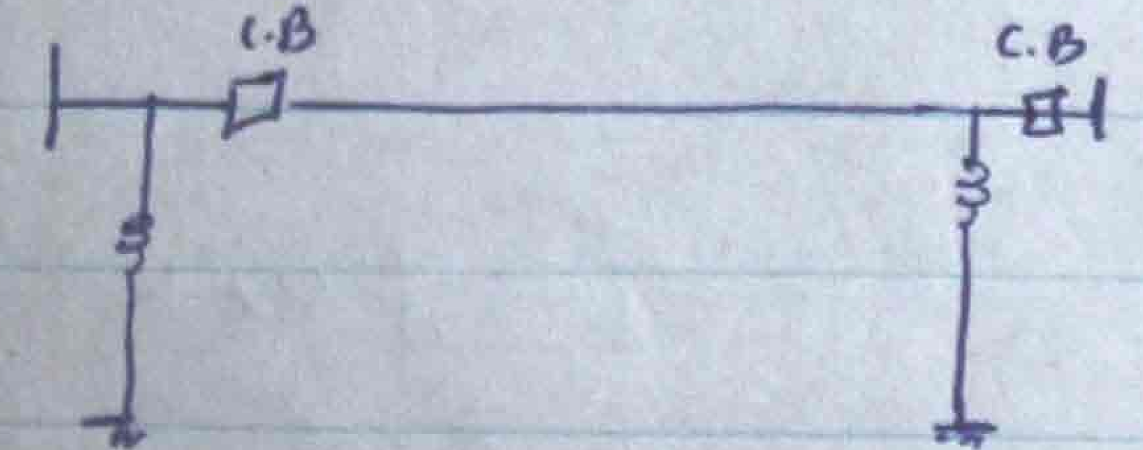
جبران سری خازنی

هدف افزایش P_0 :
1- جبران موازی خازنی
2- جبران سری خازنی

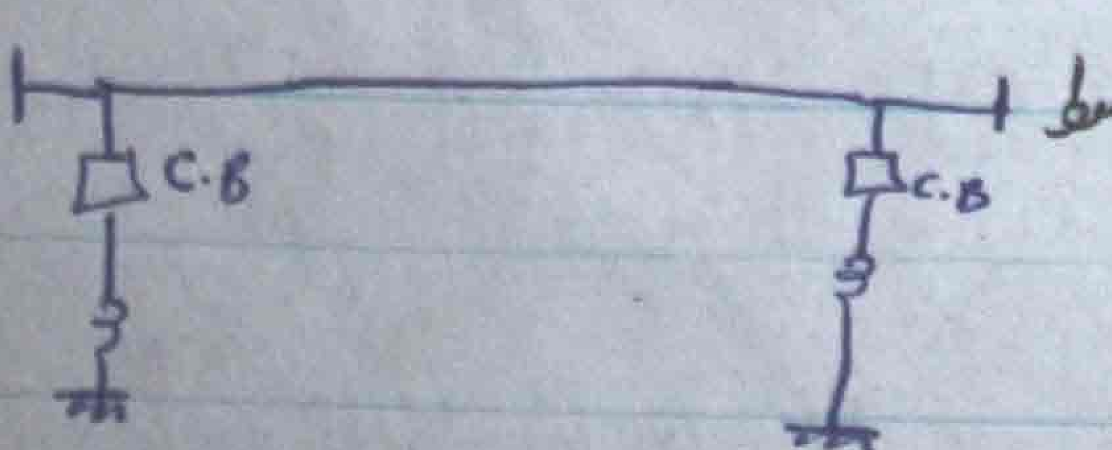
هدف افزایش P_{max} :
1- جبران سری خازنی
2-

جبران متمرکز خطوط انتقال :

از دید ولتاژ : خطوط انتقال بلند ، متوسط ، کوتاه

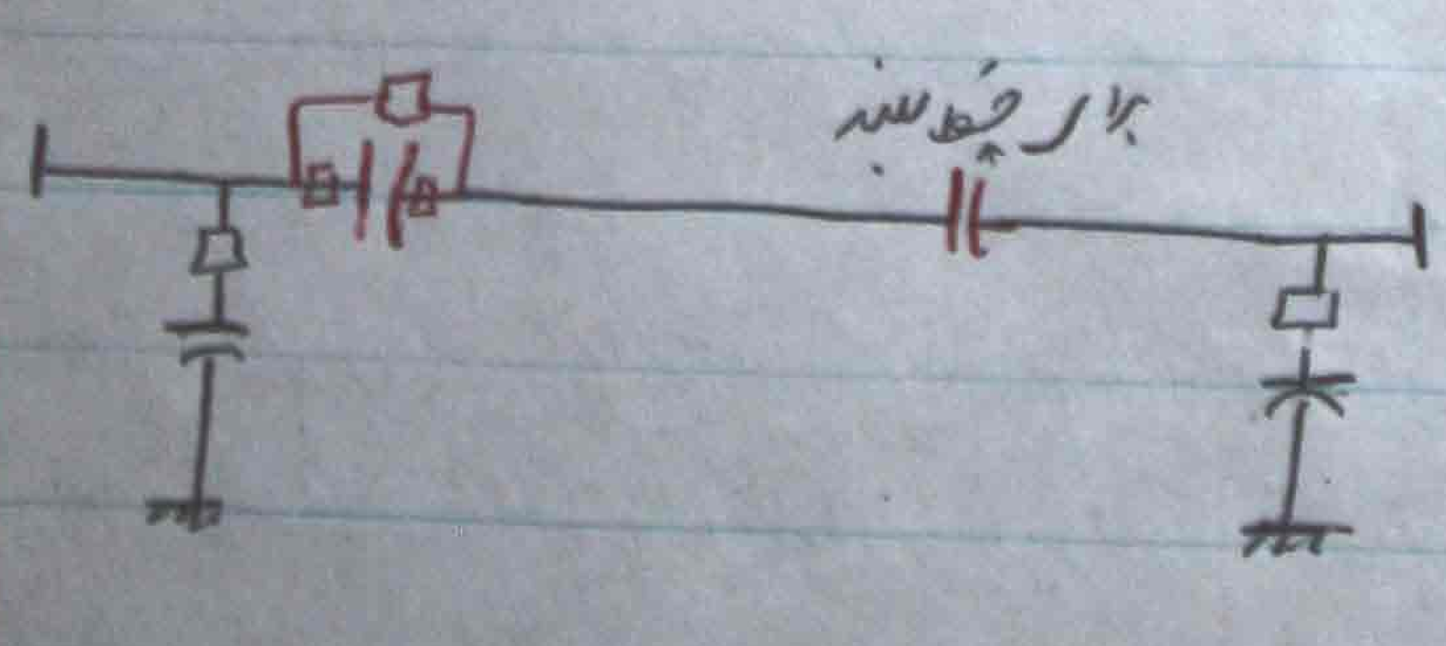


خط انتقال بلند



خط متوسط

در خطوط انتقال بلند همواره شنت راکتور لازم است بنابراین ادوات جبران ساز مستقیماً وصل شده است. در خطوط انتقال متوسط بعضی مواقع با افزایش ولتاژ و بعضی از مواقع با کاهش ولتاژ مواجه هستند بنابراین بانک CB وصل شده اند.



برای خط بلند

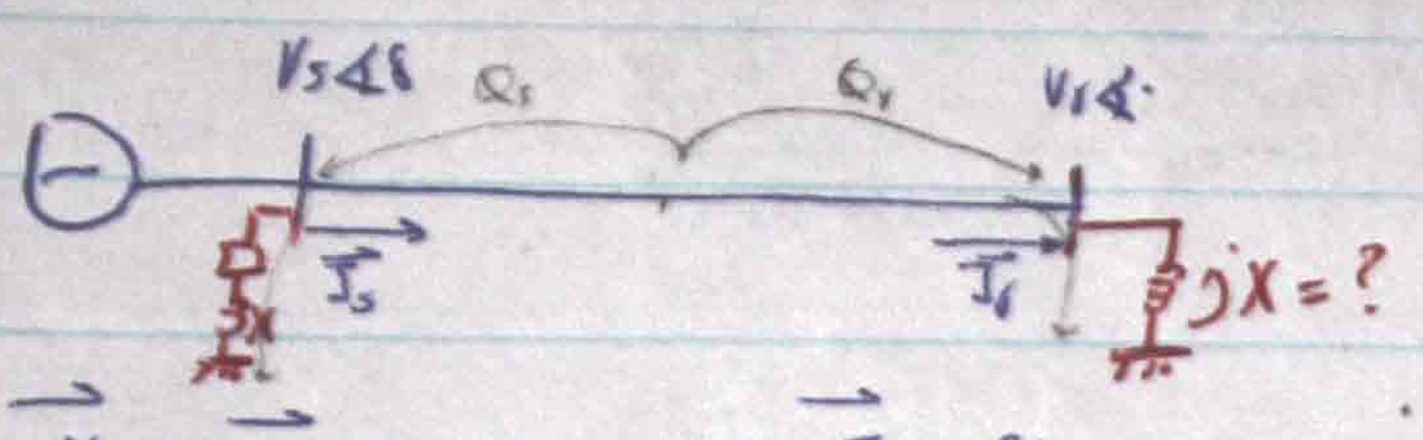
برای خط متوسط

هدف :

جبران توان راکتیو و تثبیت ولتاژ در زمان بی باری :

جبران سلفی موازی :

① محل { خط از یک سو تغذیه شده : انتهای خط
خط از دو سو تغذیه شده :



$\vec{V_s} = \vec{V_r}\cos\beta a + jZ_0 \cdot \vec{I_r}\sin\beta a$ اگر راکتور در انتهای خط نباشد $\longrightarrow$ $V_r = \frac{V_s}{\cos\beta a}$

$\vec{I_s} = \vec{I_r}\cos\beta a + j\frac{V_r}{Z_0}\sin\beta a$

هدف ، مقدار X را طوری تعیین کنید که در زمان بی باری ولتاژ V_r با ولتاژ V_s برابر شود. $\vec{V_r} = \vec{V_s}$

$$\vec{V_s} = \vec{V_r}\cos\beta a + jZ_0 \cdot \overbrace{\frac{\vec{V_r}}{jX}}^{\vec{I_r}} \cdot \sin\beta a \longrightarrow \vec{V_s} = \vec{V_r} \longrightarrow V_s = V_s\left(\cos\beta a + \frac{Z_0}{X}\sin\beta a\right)$$

$$\therefore \cos\beta a + \frac{Z_0}{X}\sin\beta a = 1 \longrightarrow X = \frac{Z_0 \sin\beta a}{1-\cos\beta a}$$

قبل از جبران $Q_s = -\frac{V_s^2}{Z_0}\tan\beta a$ بعد از جبران سازی با مقدار X در انتهای خط $Q_s = ?$

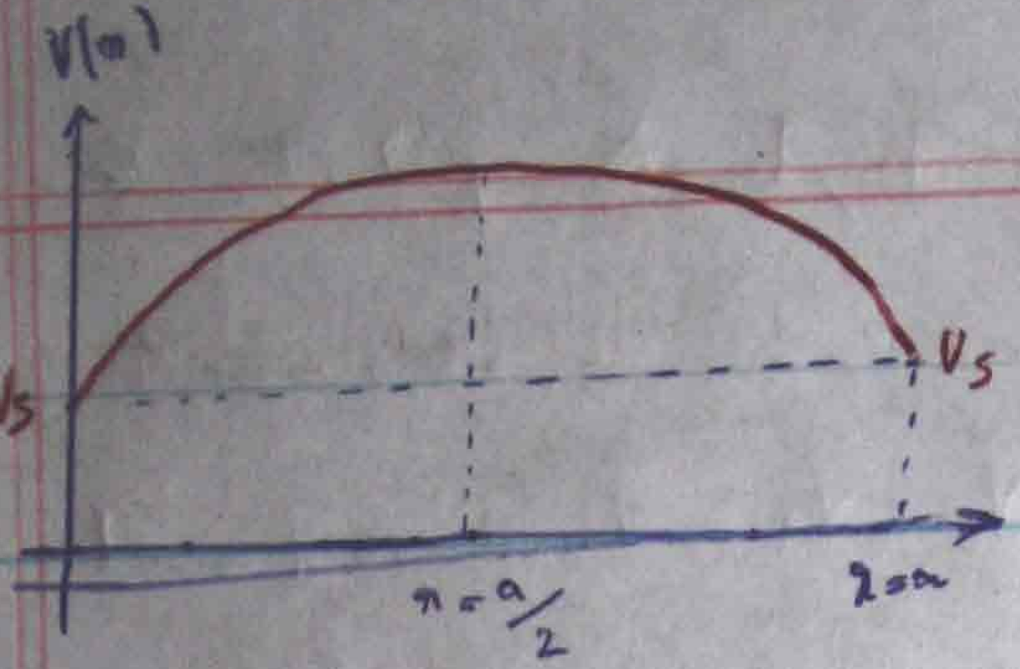
$P_s = P_r = \frac{V_s V_r}{Z_0 \sin\beta a}\sin\delta$, $Q_s = -\frac{V_s(V_r\cos\delta - V_s\cos\beta a)}{Z_0\sin\beta a}$ در بی باری $\boxed{\delta = 0}$

$P_s = 0$; $Q_s = -\frac{V_s^2(1-\cos\beta a)}{Z_0\sin\beta a}$ بعد از جبران سازی $(V_s = V_r)$

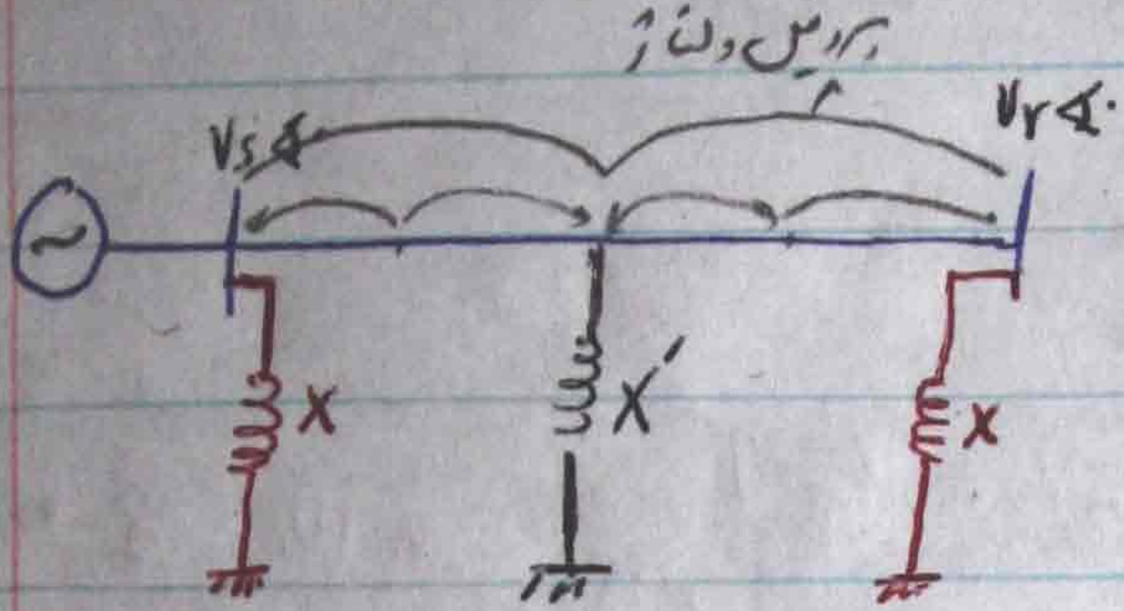
$\longrightarrow Q_s = -\frac{V_s^2}{Z_0}\tan\frac{\beta a}{2}$ نتایج این جبران سازی $V_r = V_s$ و
توان راکتیو جذبی در سمت ارسال کاهش پیدا کرده است.

یک راکتور در ابتدای خط قرار دادیم تا توان راکتیو تولیدی انتهای خط به ابتدای خط می آید جذب کرده
و ظرفیت تولید توان راکتیو ژنراتور آزاد گردد.

پروفیل ولتاژ خط بعد از جبران موازی در انتهای خط:



معمولاً در این حالت درست شبیه معمول یک خط از دو سو تغذیه شده در حالت بی باری می باشد.

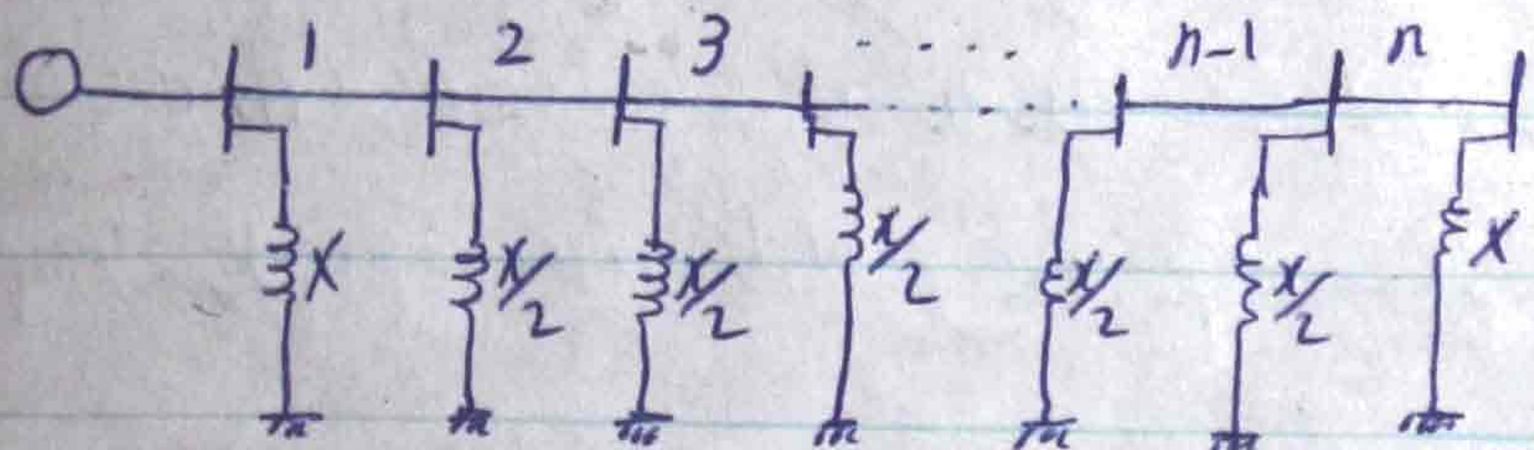


با توجه به پروفیل ولتاژ پس از جبران سازی موازی این ایده را بیان کرد که ولتاژ میانه خط را نیز با جبران موازی سلفی به مقدار V_s تثبیت کنیم.

بدین ترتیب هدف آن است به مقدار $X' = ?$ و $V_m = V_s$

مقدار را می‌توان با این که X' ضریب معادل دو برابر توان اندوکتور ابتدا و انتهای خواست: $X' = \frac{1}{2} X$ اما در این حالت $X = ?$

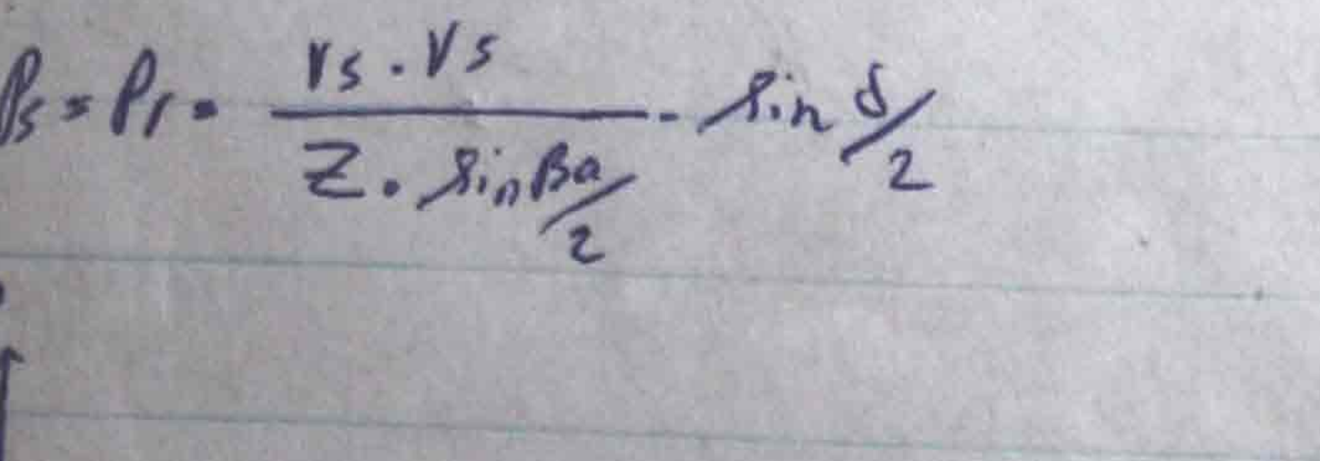
$$X = Z_0 \left(\frac{\sin \beta a/2}{1 - \cos \beta a/2} \right)$$



در حالت کلی (ایده آل):

$$X = Z_0 \frac{\sin \theta/n}{1 - \cos \theta/n}$$ (اثبات در منبع)

تأثیر جبران موازی بر مشخصه خط در زمان باباری:

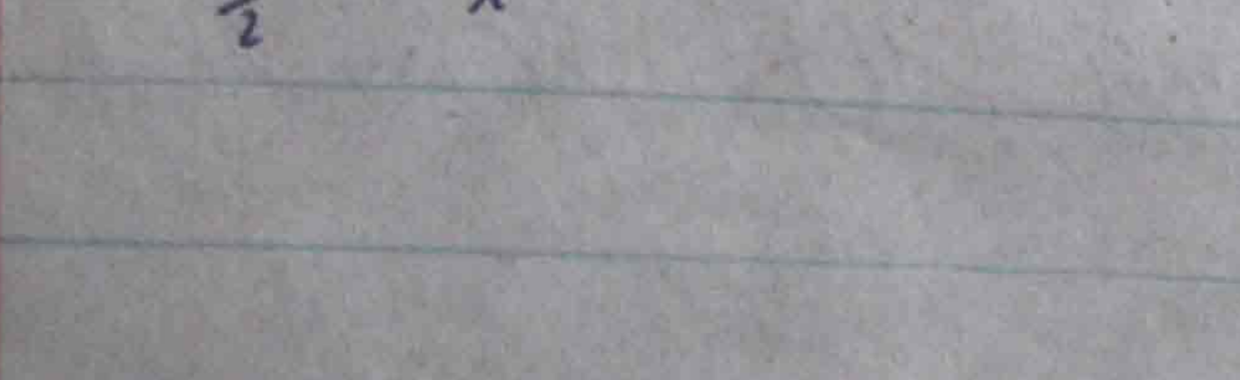


$$P_s = P_r = \frac{V_s \cdot V_r}{Z_0 \sin\beta a} \sin\delta \Rightarrow P_s = \frac{V_s^2}{Z_0 \sin\beta a} \sin\delta$$

حال اگر یک جبران ساز موازی در میانه خط قرار داده شود:

$$P_s = P_r = \frac{V_s \cdot V_s}{Z_0 \sin\beta a/2} \sin \delta/2$$

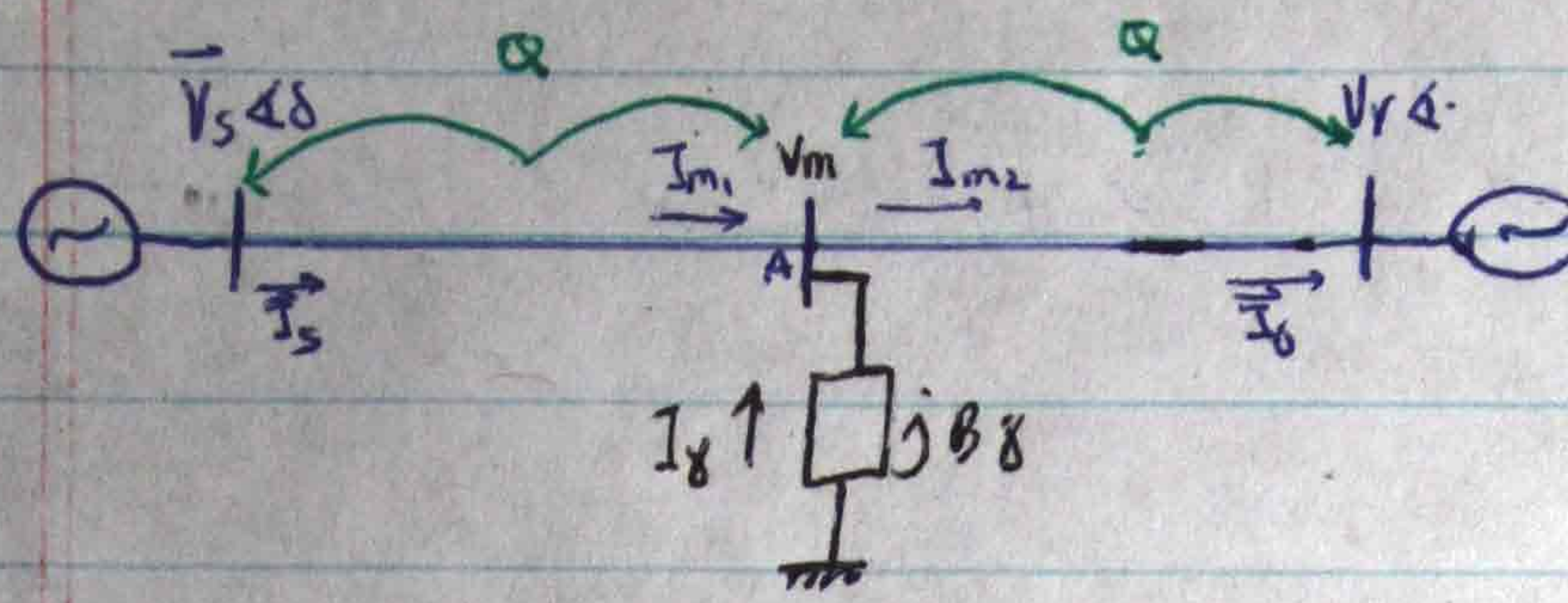
X' و X را طوری بدست می‌آوریم که ولتاژ میانه خط تثبیت گردد.



در حالت دوم حد پایداری بهبود یافته و توان ماکسیمم دو برابر شده است.

جلسه یازدهم ۹۰/۱۰/۵

تثبیت ولتاژ میانه خط دو سو تغذیه شده:



الف) هدف: $\vec V_m = \vec V_r = \vec V_s$ تثبیت ولتاژ

در حالت بی باری هم $\vec V_s = \vec V_r$ ، هم $\delta = 0$

$$P_s = P_{m1} = P_{m2} = P_r = 0 \quad ; \quad \delta = 0$$

$$Q_{m1} = \frac{V_m\left(V_s\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0 \sin\frac{\beta a}{2}} \quad ; \quad Q_s = -\frac{V_s\left(V_m\cos\frac{\delta}{2} - V_s\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}} \quad ; \quad Q_{m2} = -\frac{V_m\left(V_r\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}$$

در نقطه A داریم: $Q_{m1} + Q_\gamma = Q_{m2} \longrightarrow Q_\gamma = Q_{m2} - Q_{m1}$

با جایگذاری $V_s = V_m = V_r$ ، $\delta = 0$ در روابط توان بالا داریم:

$$Q_\gamma = -2\frac{V_s^2}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\left(1-\cos\frac{\beta a}{2}\right) = \boxed{-2\frac{V_s^2}{Z_0}\tan\frac{\beta a}{4}} \qquad Q_{\text{ژنراتور}} = -\frac{V_s^2}{Z_0}\tan\frac{\beta a}{4}$$

در حالت بی باری اگر ولتاژ میانه تثبیت شود، راکتیوی که در سر ژنراتور باید جذب کند با $\frac{\beta a}{4}$ (با طول $\frac{1}{4}$ خط) متناسب است.
هم ژنراتورها (منابع تولیدی در ابتدا و انتهای خط) و هم جبرانساز وسط خط، راکتیو جذبی هستند.

نتایج: ۱- طول الکتریکی خط به $\frac{1}{4}$ تقلیل می یابد 2- راکتیو در ابتدا، انتها و میانه خط باید جذب گردد.
هر جا تثبیت ولتاژ باشد در حقیقت طول الکتریکی خط را کاهش داده ایم.

ب) حالت باباری $|\vec V_s| = |\vec V_r|$ ، $\delta \neq 0$; هدف: $|V_s| = |V_r| = |V_m|$ تثبیت ولتاژ

$$P_s = \frac{V_s \cdot V_m}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\sin\frac{\delta}{2} = P_{m1} = P_{m2} = \frac{V_m V_r}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\sin\frac{\delta}{2} \xrightarrow{\text{با هدف تثبیت ولتاژ}}$$

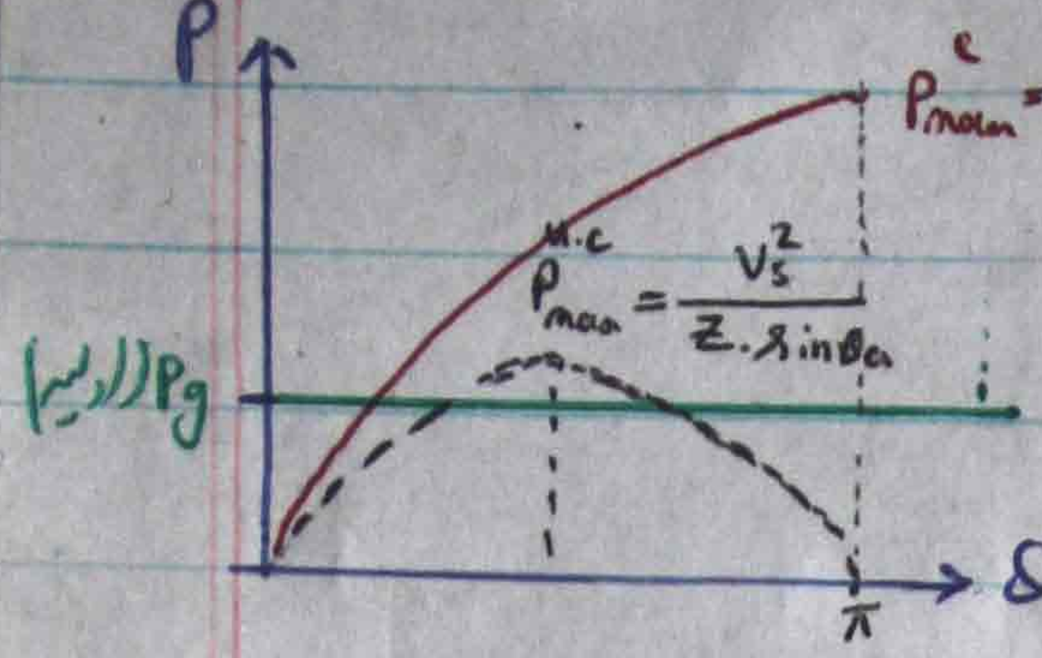
$$P_s = P_{m1} = P_{m2} = P_r = \frac{V_s^2}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\sin\frac{\delta}{2}$$

un composat

۱- اگر ولتاژ خط در میانه آن تثبیت نشده بود: $P_C^{u.c} = \frac{V_s^2}{Z_0\sin\beta a}\sin\delta$

2- اگر ولتاژ خط در میانه آن تثبیت شده باشد: $P_S^{C} = \frac{V_s^2}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\sin\frac{\delta}{2}$ که تقریباً دو برابر توان است.

نتایج: 1- حداکثر توان ارسالی در همان خط با همان شرایط ذکر شده با در نظر گرفتن محدودیت‌ها ی بهره برداری در ثابت ثمود به شدت افزایش می‌یابد (در واقع جریان مجاز 2 برابر شده است تا توان قابل انتقال در خط تا 2 برابر افزایش می‌یابد.



$P_{max}^{c} = \frac{V_s^2}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}}$

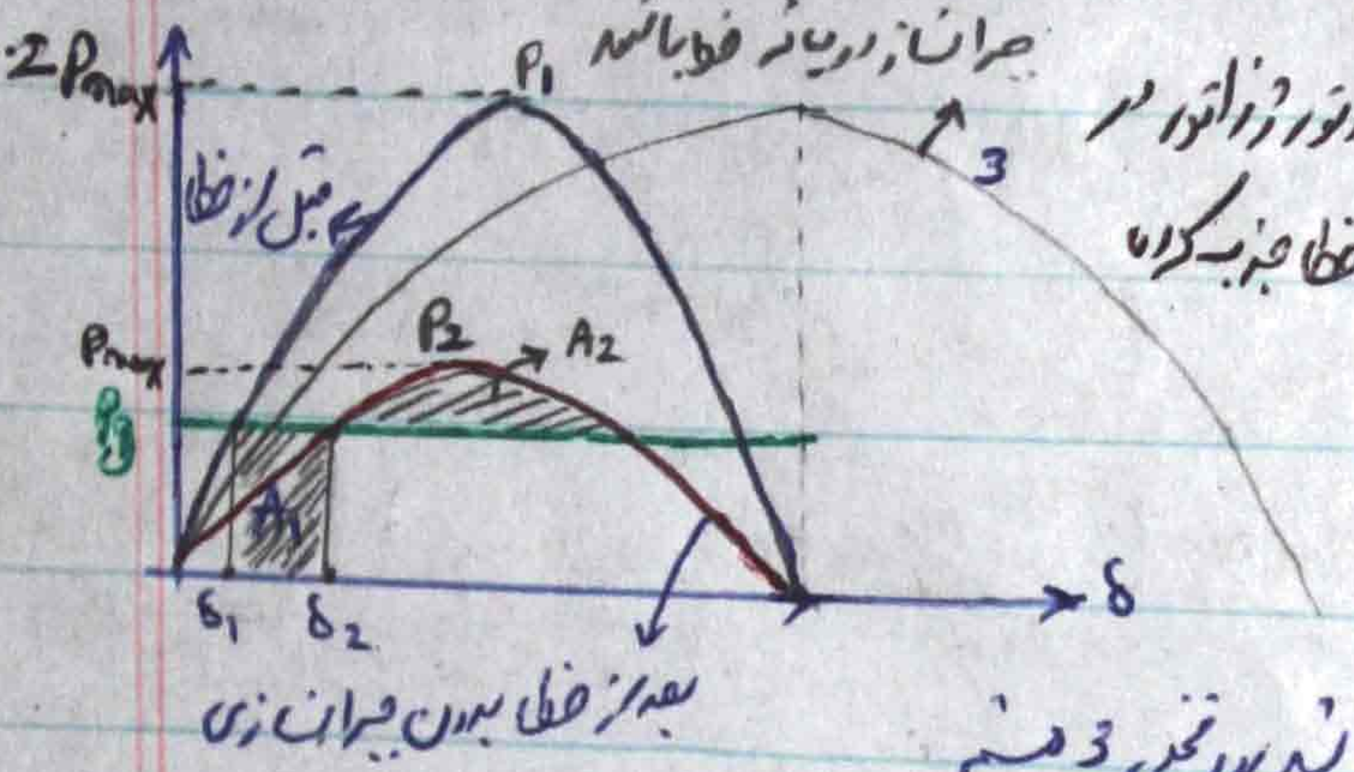
2- حد پایداری گذرای سیستم قدرت به شدت افزایش می‌یابد.

تفاوت میان حداکثر توان راکتیو خط، توان اکتیو تولیدی ژنراتور (الدیما) = حد پایداری گذرای سیستم می‌باشد

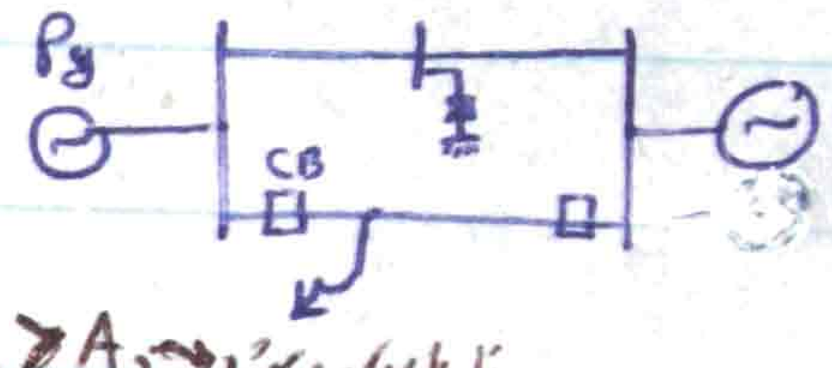
یادآوری: ارزیابی پایداری گذرا: (معیار سطوح مساوی)

اگر خطای اتصال کوتاهی رخ داد، CB عمل کرده و قطع می‌شود ⇐ توان ژنراتور تولید کننده صفر می‌شود تا زمانی که CB دوباره وصل شود.

در زمانی که δ_1, δ_2 در صورت CB را وصل کردیم، آرایش خط عوض می‌شود که در این حالت امپدانس خط 2 برابر شده است.



انرژی که روتور ژنراتور در زمان وقوع خطا جذب کرده > انرژی پس داده که تولید می‌کند



$A_1 < A_2 \sim$ پایدار است ، $A_1 > A_2 \Rightarrow$ ناپایدار می‌شود

اگر جبران‌ساز در میانه خط نباشد (در هنگام وقوع خطا) بعد روی منحنی 2 قرار داریم. اگر جبران‌ساز در میانه خط باشد روی منحنی 3 هستیم با جبران‌ساز مساحت A_1 تغییر نمی‌کند (بعد از خطا روی منحنی 3) حرکت می‌کند اما مساحت A_2 زیاد می‌شود.

تعیین ظرفیت راکتیو مورد نیاز جهت تثبیت ولتاژ در میانه خط از دو سو تغذیه شده: (در حالت باباری $\delta \neq 0$)

$$Q_{m_1} + Q_\gamma = Q_{m_2} \longrightarrow Q_\gamma = Q_{m_2} - Q_{m_1}$$

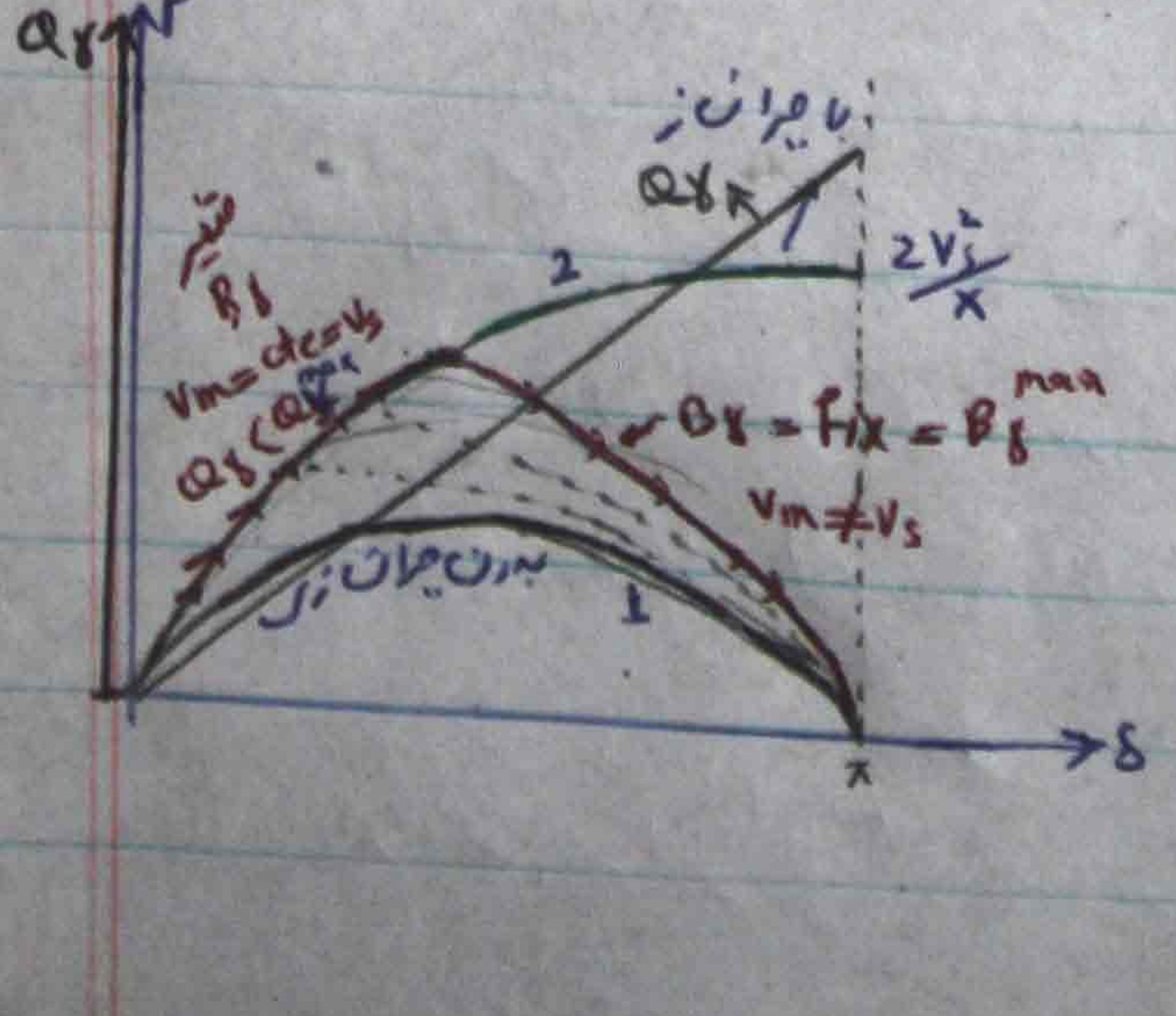
$$Q_{m_1} = \frac{V_m \left(V_s \cos \frac{\delta}{2} - V_m \cos \frac{\beta a}{2}\right)}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}} \;;\; Q_s = -\frac{V_s \left(V_m \cos \frac{\delta}{2} - V_s \cos \frac{\beta a}{2}\right)}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}} \;,\; Q_{m_2} = -\frac{V_m \left(V_r \cos \frac{\delta}{2} - V_m \cos \frac{\beta a}{2}\right)}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}}$$

$$\boxed{\Rightarrow Q_\gamma = \frac{2V_s^2}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}} \left(\cos \frac{\beta a}{2} - \cos \frac{\delta}{2}\right)} \;;\; P = \frac{V_s^2}{Z_c \sin \frac{\beta a}{2}} \sin \frac{\delta}{2}$$

با فرض اینکه طول الکتریکی خط به اندازه کافی کوچک باشد داریم:

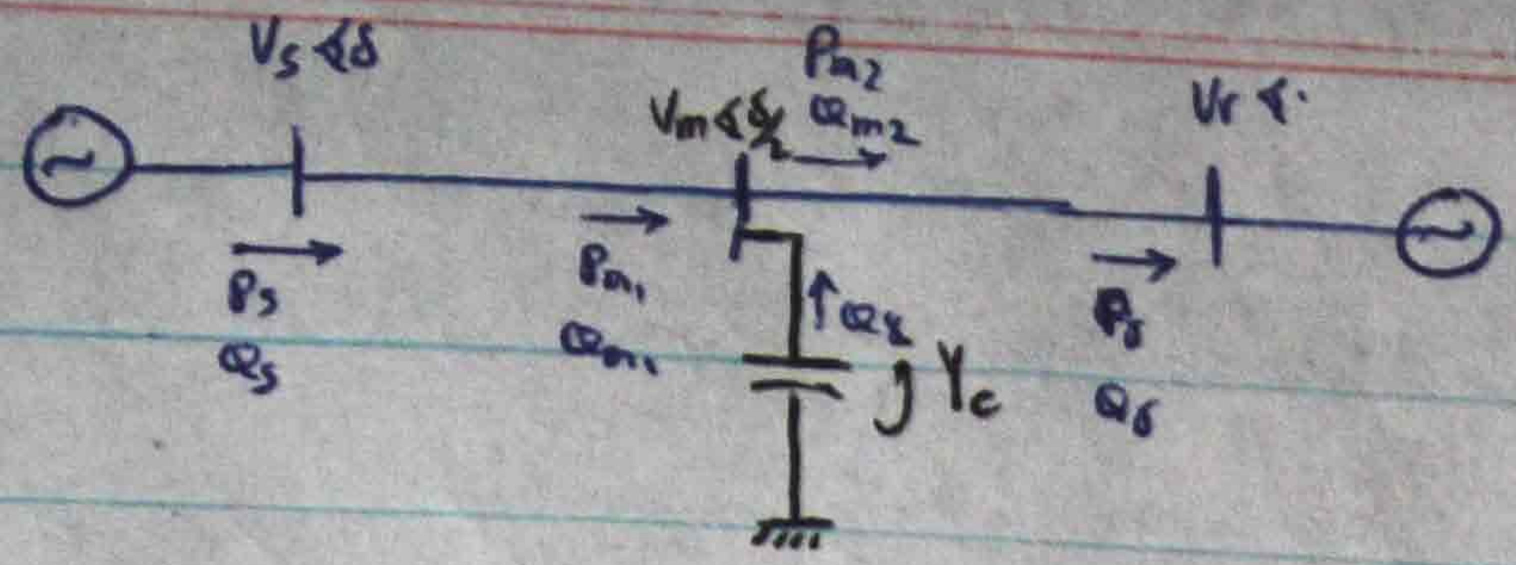
$$\sin \frac{\beta a}{2} \simeq \frac{\beta a}{2} \;;\; \cos \frac{\beta a}{2} \simeq 1$$

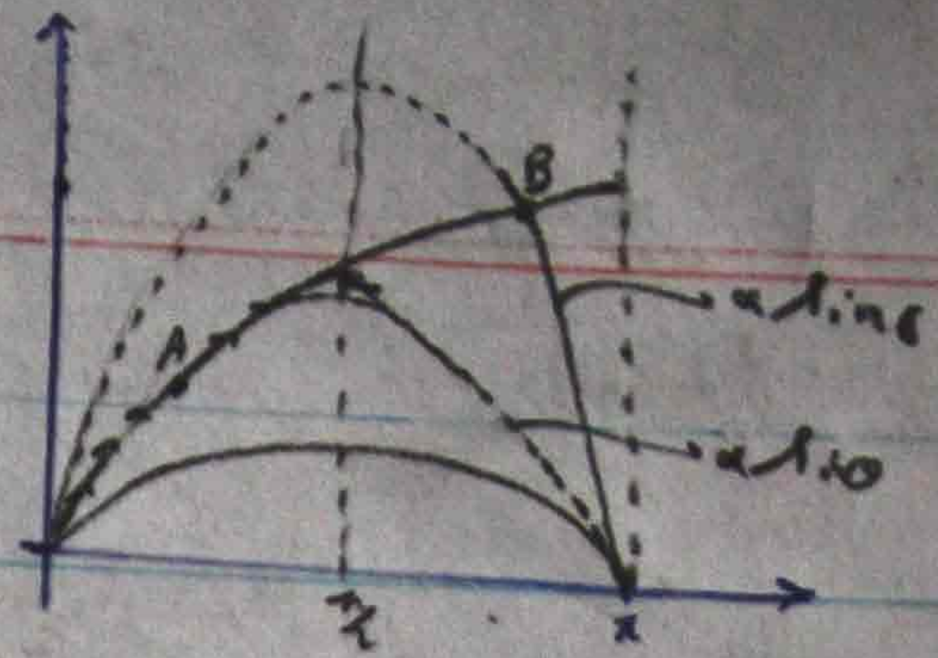
$$P = \frac{2 V_s^2}{\sqrt{\frac{L}{C}} \underbrace{(\omega \sqrt{LC})}_{\beta} a} \sin \frac{\delta}{2} = \frac{2V_s^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \;;\; Q_\gamma = \frac{4V_s^2}{X}\left(1 - \cos \frac{\delta}{2}\right)$$



اگر بخواهیم $P_{max} = \frac{2V_s^2}{X}$ را از خط عبور دهیم باید توان راکتیوی که از میانه خط عبور می‌کند $Q = \frac{4V_s^2}{X}$ باشد و این یک ایراد عمده می‌باشد $Q_\gamma = 2P_{max}$

معمولاً در عمل نمی‌توان در یک نرخ مشخص در سطح (P_{max}) P. ولتاژ را ثابت کرد چون ظرفیت راکتیوی که از خط عبور می‌کند محدود است در حالت واقعی برای Q_γ محدودیت داریم. تا زمانی که روی منحنی با جبران‌ساز حرکت می‌کنیم که $Q_\gamma < Q_\gamma^{max}$ ، $V_m = fix$. بعد از آن روی منحنی حرکت می‌کنیم که $B_\gamma = B_\gamma^{max}$ ، اما در هر نقطه‌ای می‌توان از منحنی ② جدا شد با توجه به محدودیت Q_γ)





$$Q_{m1} + Q_\gamma = Q_{m2}$$

$$Q_{m1} = \frac{V_m\left(V_s\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}$$

$$Q_{m2} = -\frac{V_m\left(V_r\cos\frac{\delta}{2} - V_m\cos\frac{\beta a}{2}\right)}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}$$

$$Q_\gamma = +Y_c V_m^2$$

$$\rightarrow \begin{cases} 2V_s\cos\frac{\delta}{2} = V_m\left(2\cos\frac{\theta}{2} - Y_c Z_0\sin\frac{\theta}{2}\right) \\ V_m = \left[\frac{2V_s}{2\cos\frac{\theta}{2} - Y_c Z_0\sin\frac{\theta}{2}}\right]\cos\frac{\delta}{2} \\ P_s = \frac{V_s \cdot V_m}{Z_0\sin\frac{\beta a}{2}}\cdot\sin\frac{\delta}{2} \end{cases} \rightarrow$$

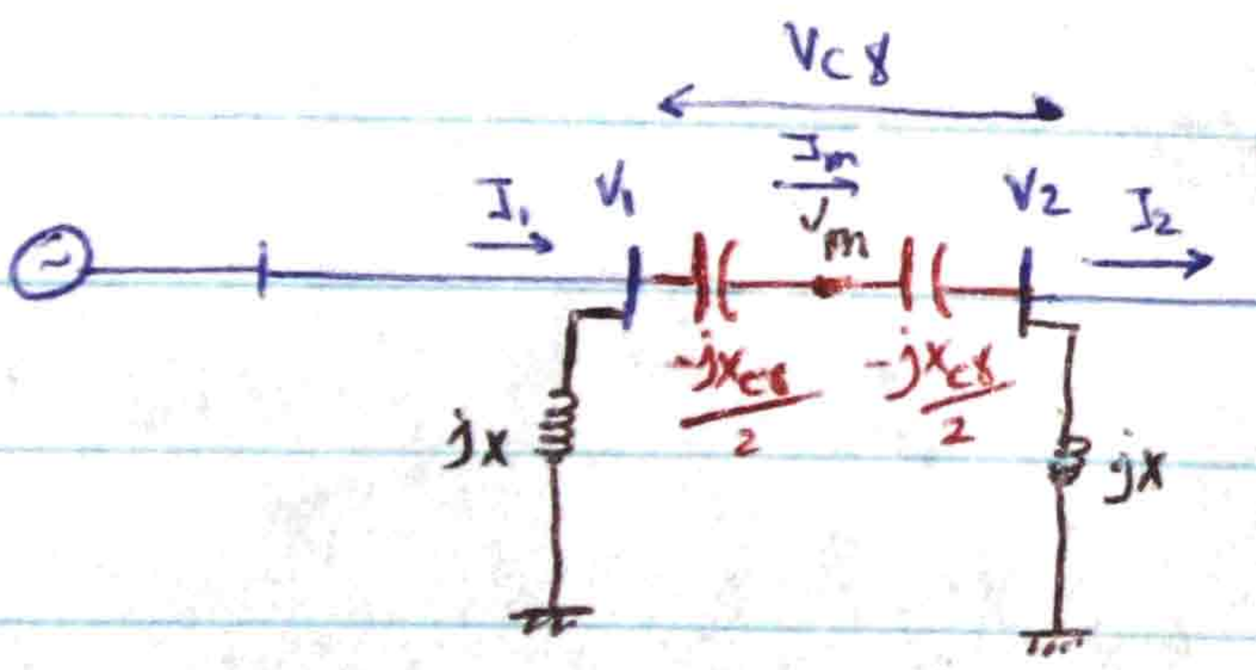
$$\rightarrow P_m = \frac{V_s^2}{Z_0\sin\frac{\theta}{2}\left(2\cos\frac{\theta}{2} - Y_c Z_0\sin\frac{\theta}{2}\right)}\sin\delta \qquad \theta = \beta a$$

$$Y_c = 0 \rightarrow P_{m1} = \frac{V_s^2}{Z_0\sin\beta a}\cdot\sin\delta \rightarrow P_m > P_{m1}$$

منحنی P-δ بصورت دینامیکی تا جایی که $Y_c = fix$ بشود حرکت می‌کند یعنی fix شدن Y_c. تغییرات منحنی P-δ برحسب رابطه بدست آمده در بالا رابطه پیدا می‌کند.

∴ میزان توان انتقال شده در حالت جبران شده در میانه خط بیشتر از موقعی است که جبران کننده ($Y_c = 0$) نباشد.

∴ رابطه تغییرات P برحسب δ یک رابطه سینوسی است.



جبران سازی سری خط بلند: (گسسته)

در مورد جبران سازی با دو سؤال رو به رو هستیم کجای خط قرار دهیم و مقدار آن چقدر است؟

می‌توانیم یا در ابتدای خط یا در وسط خط بگذاریم. اگر در ابتدای خط باشد قابل دسترسی و تعمیر و نگهداری آن آسان است.

عیب: در حالت بی باری جریان راکتیو که از انتهای خط بدست آورده جریان زیاد در ابتدای خط به یک المان تولید کننده توان راکتیو می‌رسد که ژنراتور در این حالت مجبور به جذب توان راکتیو اضافه می‌شود.

سطح جریان اتصال کوتاه در خطای ابتدا و انتهای خط بیشتر افزایش می‌یابد برای همین باید قدرت بالای قطع جریان اتصال کوتاه را داشته باشد. $I_{sh} = \frac{V}{X_{c\gamma}}$ $(X_{c\gamma} - X_L)$

در حالت‌هایی اگر بخواهند استفاده کنند در وسط خط استفاده می‌کنند.

فرض کنید خط بی بار است و فرض کنید $|\vec{V}_s| = |\vec{V}_r|$

$$1:\begin{cases}\vec{V}_s = \vec{V}_1 \cos\frac{\beta a}{2} + jZ_0 \vec{I}_1 \sin\frac{\beta a}{2} \\ \vec{I}_s = \vec{I}_1 \cos\frac{\beta a}{2} + j\frac{\vec{V}_1}{Z_0}\sin\frac{\beta a}{2}\end{cases}
\qquad
3:\begin{cases}\vec{V}_m = \vec{V}_2 + \frac{1}{2}\vec{V}_{c\gamma} \\ \vec{V}_m = \vec{V}_1 - \frac{1}{2}\vec{V}_{c\gamma}\end{cases}$$

$$2:\ \vec{V}_{c\gamma} = \vec{V}_1 - \vec{V}_2 = -jX_{c\gamma}\cdot I_m$$

$$4:\begin{cases} I_1 - \frac{V_1}{jX} = I_m = I_1 + j\frac{V_1}{X} \\ I_2 + \frac{V_2}{jX} = I_m = I_2 - j\frac{V_2}{X}\end{cases}$$

$$\therefore\ \vec{V}_s = \left(V_m + \frac{1}{2}V_{c\gamma}\right)\cdot\cos\frac{\theta}{2} + jZ_0\left(I_m + \frac{V_1}{jX}\right)\cdot\sin\frac{\theta}{2}$$

$$\vec{V}_s = \left(V_m - j\frac{1}{2}X_{c\gamma}I_m\right)\cos\frac{\theta}{2} + jZ_0\left(I_m + \frac{1}{jX}\left(V_m - j\frac{X_{c\gamma}}{2}\cdot I_m\right)\right)\cdot\sin\frac{\theta}{2}\ ;\ \vec{I}_m = \frac{P_m}{\vec{V}_m^*}$$

$Q_m = 0$

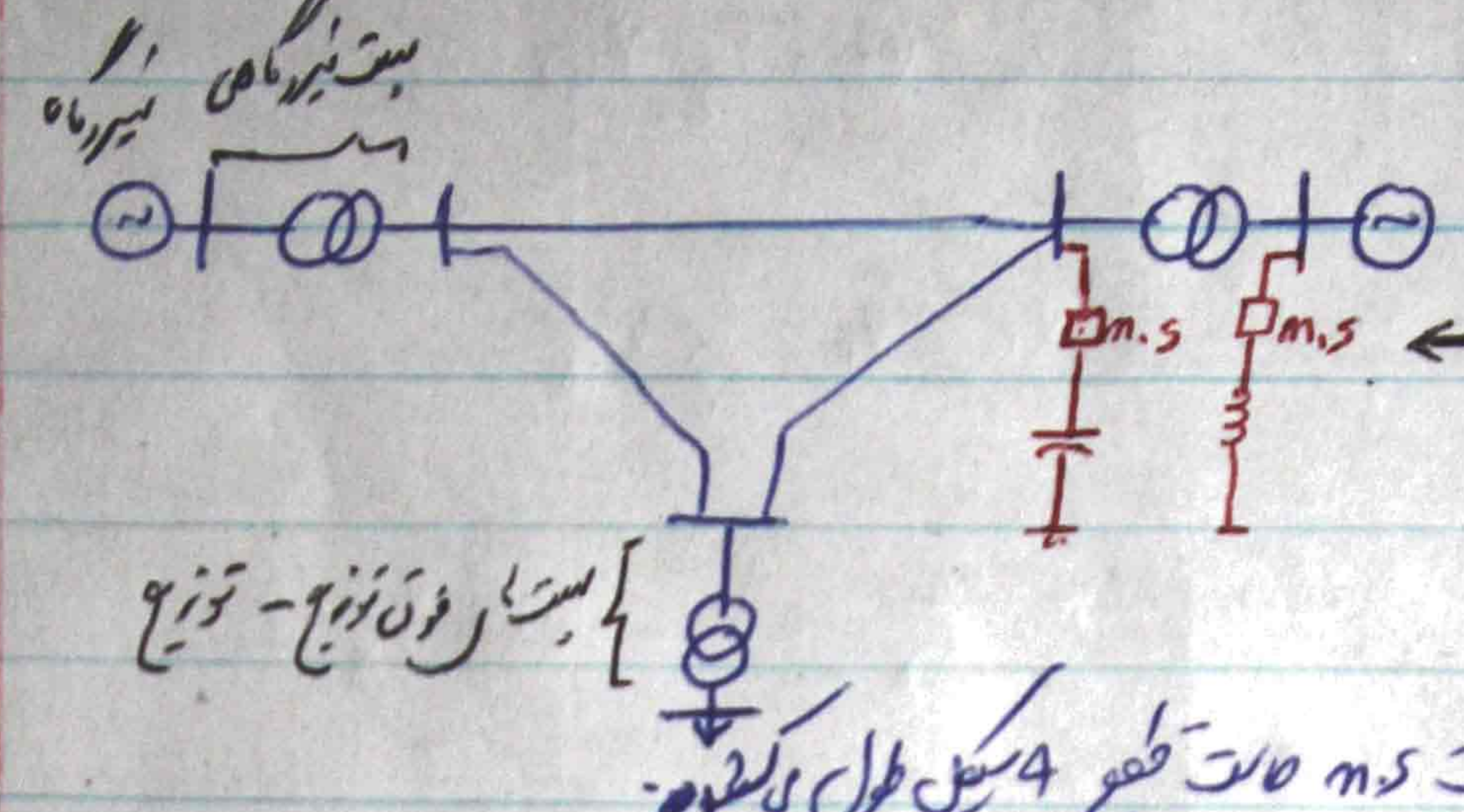
$$\begin{cases} P = \dfrac{V_s\cdot V_m}{Z_0\sin\frac{\theta}{2} - \frac{X_{c\gamma}}{2}\left(\cos\frac{\theta}{2} + \frac{Z_0}{X}\sin\frac{\theta}{2}\right)}\cdot\sin\frac{\delta}{2} \\ V_s\cos\frac{\delta}{2} = V_m\left[\cos\frac{\theta}{2} + \frac{Z_0}{X}\sin\frac{\theta}{2}\right] = V_r\cos\frac{\delta}{2}\end{cases} \rightarrow$$

$$\rightarrow\ P = \frac{V_s^2}{\left[Z_0\sin\theta - \frac{X_{c\gamma}}{2}(1-\cos\theta)/A\right]/A}\cdot\sin\delta\ ;\ A = 1 + \frac{Z_0}{X}\,\mathrm{tg}\frac{\theta}{2} = 1 + \frac{Z_0}{X}\frac{\sin\theta}{1+\cos\theta}$$

مزیت جبران سری به موازی این است که در جبران سری احتیاج به مدار کنترلی بمانند آنچه در جبران موازی است نیاز نیست و یا بعبارت دیگر جبران سری، خود جبران یا خود کنترل است.

جلسه دوازدهم ۹۰/۱۰/۱۲

سولوهای استاتیک توان راکتیو : (SVC)



مزیت استفاده از تایریستور بجای m.s :

- سرعت عملکرد قطع و وصل را بالا می‌برد. در حالت m.s حالت قطع 4 سیکل طول می‌کشد.
- سلف را می‌توانند بصورت پیوسته کنترل کنند (مجموعه سلف و خازن‌ها). در حالت m.s بصورت پله‌ای کنترل می‌شود.

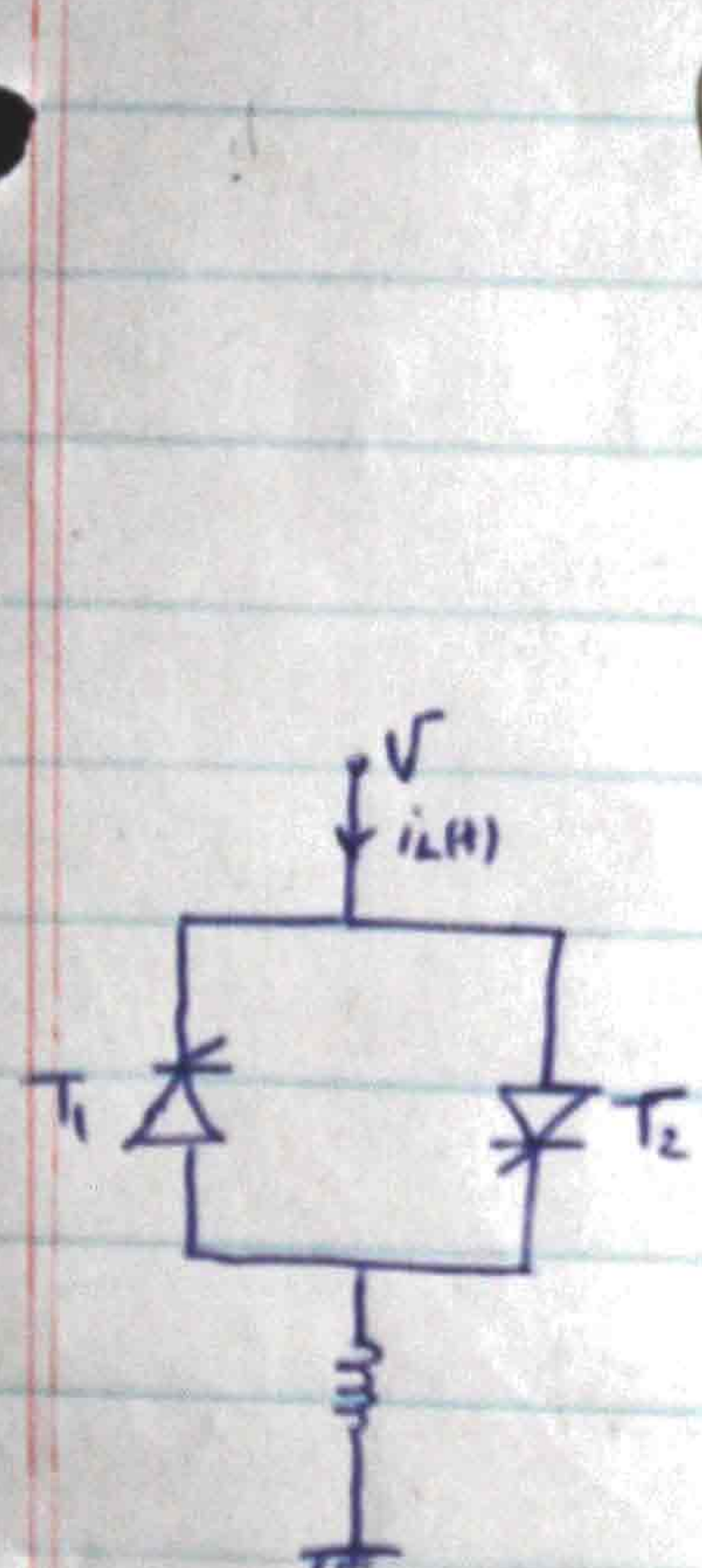
ساختارهای مختلف

اجزای static var compensator (S.V.C) هدف: (می‌خواهیم سلف و خازن متغیر بسازیم)

سلف کنترل شونده با تایریستور Thyristor controlled Reactor (T.C.R)

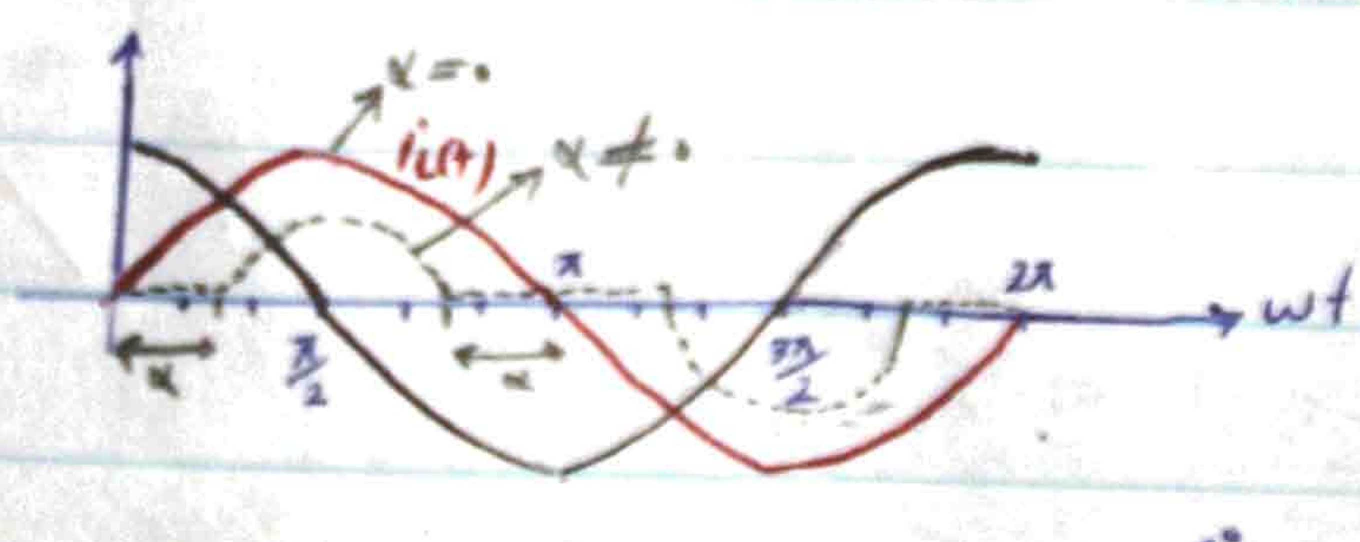
سلف بازبسته شونده با تایریستور Thyristor switched Reactor (T.S.R)

خازن بازبسته شونده با تایریستور Thyristor switched capaction (T.S.C)



T.C.R : با فرض اینکه ولتاژ اعمالی به TCR یک ولتاژ سینوسی کامل باشد:

$V(t) = V_m \cos\omega t$



$$\alpha = 0 \longrightarrow v(t) = L\frac{di_L(t)}{dt} \longrightarrow i_L(t) + \cancel{i_L(0)} = \frac{1}{L\omega} V_m \sin\omega t$$

تایریستورها نقطه یک ولتاژ را نشان می‌دهند که بعد از آن وصل به تایریستورها داده می‌شود. (زاویه کنترل نقاط شیب را تعیین می‌کند)

$$\alpha = \alpha^\circ \longrightarrow \begin{cases} v(t) = L\frac{di_L(t)}{dt} & \omega t > \alpha \\ i_L(\alpha) = 0 \end{cases}$$

$$\longrightarrow V_m \cos\omega t = L\frac{di_L(t)}{dt} \longrightarrow i_L(t) - i_L(\alpha) = \frac{V_m}{L}\int_\alpha^{\omega t} \cos\omega t \, d\omega t \longrightarrow i_L(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega} \sin\omega t \Big|_\alpha^{\omega t}$$

$$\longrightarrow i_L(\omega t) = \frac{V_m}{L\omega}\left[\sin(\omega t) - \sin\alpha\right] \quad ; \quad i_L(\alpha) = 0 \ , \ i_L(\pi - \alpha) = 0$$

$$0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$$

$$i_L^{max} \longrightarrow 0$$

- جریان نیاز را با تنظیم زاویه آتش می‌توان کنترل کرد.

حال ببینیم که با تنظیم زاویه آتش امپدانس دیده شده از سر (۷) چقدر خواهد شد.

امپدانس در شکل اول محاسبه می‌شود. ما آنیم بسط سری فوریه شکل موج ها را بدست آوریم.

محاسبه امپدانس معادل T.C.R در فرکانس پایه شبکه:

$i_L(t)=\sum B_n \sin(n\omega t)$; $B_n=\frac{2}{\pi}\int_0^{\pi} i_L(\omega t)\cdot \sin(n\omega t)\cdot d\omega t$

$$B_1=\frac{2}{\pi}\int_\alpha^{\pi-\alpha}\left(\frac{V_m}{L\omega}[\sin\omega t-\sin\alpha]\cdot\sin\omega t\right)\cdot d\omega t=\frac{2}{\pi}\cdot\frac{V_m}{L\omega}\left[\frac{\omega t}{2}-\frac{\sin 2\omega t}{4}+\sin\alpha\cos\omega t\right]_\alpha^{\pi-\alpha}$$

$\to B_1=\frac{V_m}{L\omega}\frac{\pi-2\alpha-\sin2\alpha}{\pi}$; $i_L^1(\omega t)=\left(\frac{V_m}{L\omega}\cdot\frac{\pi-2\alpha-\sin 2\alpha}{\pi}\right)\cdot\sin\omega t$

$$B_n|_{n\neq1}=\frac{4}{\pi}\cdot\frac{V_m}{L\omega}\left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)}+\frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)}-\cos\alpha\frac{\sin n\alpha}{n}\right]$$

حال برای بدست آوردن امپدانس از دید مولفه اول جریان، معادل فازوری جریان، ولتاژ را بدست می‌آوریم:

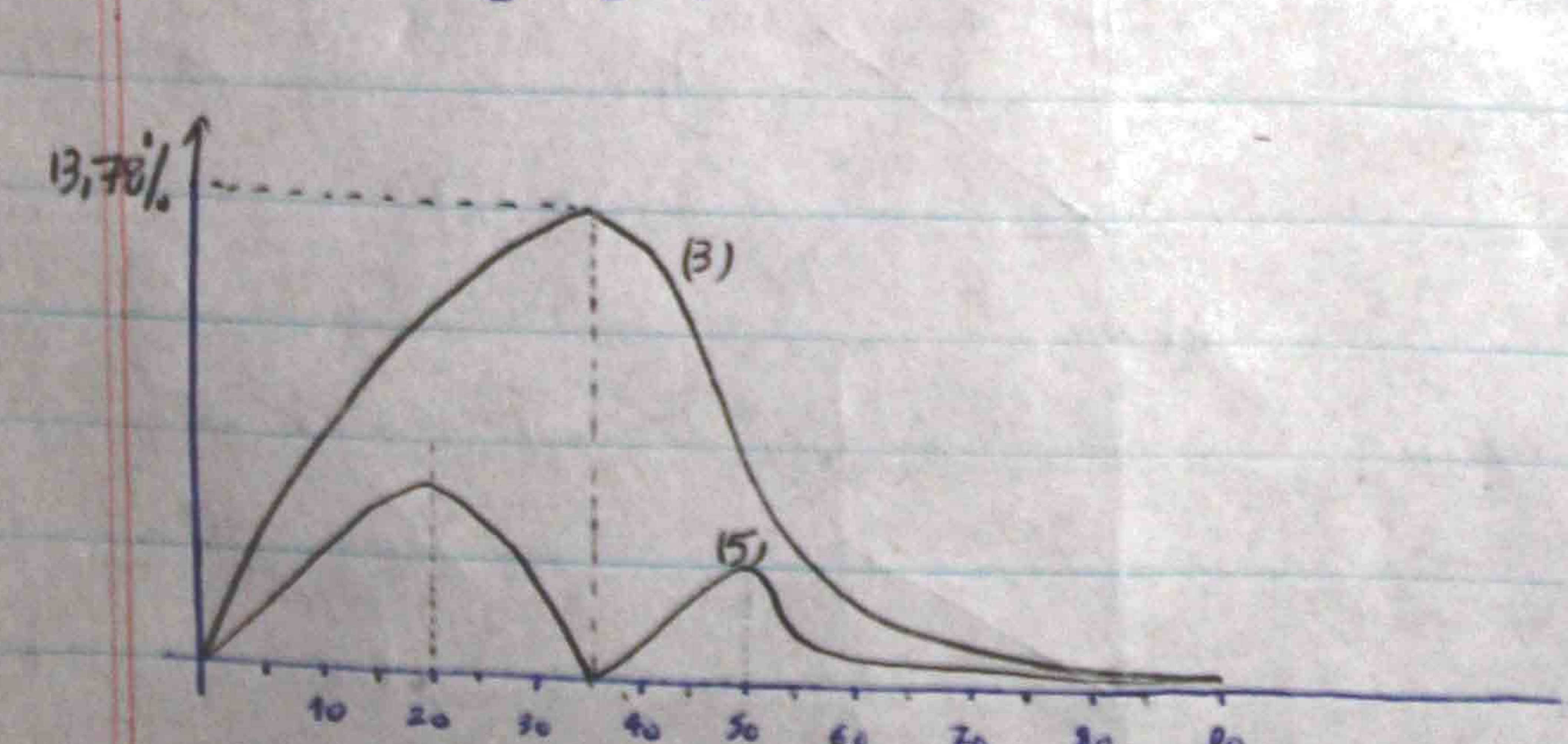
فازور ولتاژ: $\frac{V_m}{\sqrt2}e^{j0}$

فازور جریان: $\frac{V_m}{\sqrt2 L\omega}\left(\frac{\pi-2\alpha-\sin2\alpha}{\pi}\right)e^{-j\frac{\pi}{2}}$ $\to Z_{TCR}=\frac{1}{-j\frac{1}{L\omega}\left(\frac{\pi-2\alpha-\sin2\alpha}{\pi}\right)}$


متغیر می‌شود:

$\to Z_{TCR}=jL\omega\frac{\pi}{\pi-2\alpha-\sin2\alpha}$; $Y_{TCR}=-j\frac{1}{L\omega}\frac{\pi-2\alpha-\sin2\alpha}{\pi}$

امپدانس معادل TCR — ادمیتانس معادل TCR



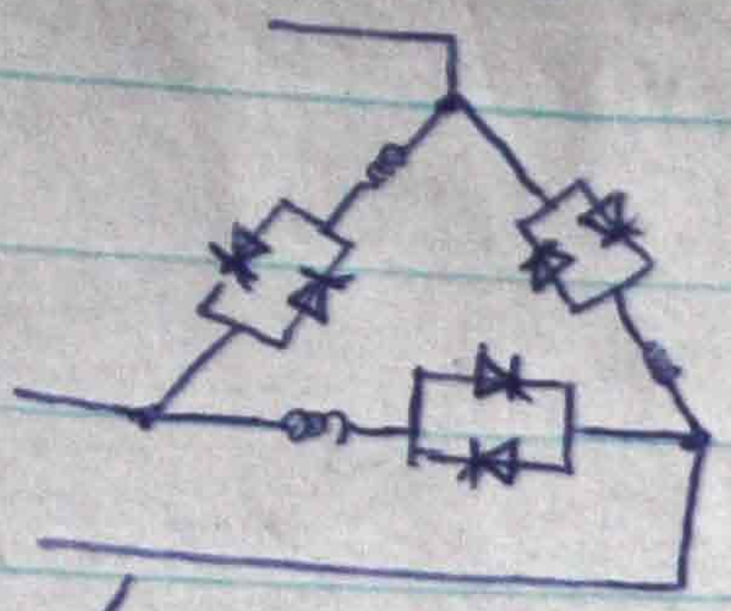
هارمونیک های جریان TCR:

مرتبه هارمونیک	1	3	5	7	9	11	13	15
درصد مولفه هارمونیک	100	13.78	5.05	2.59	1.57	1.05	0.75	0.57

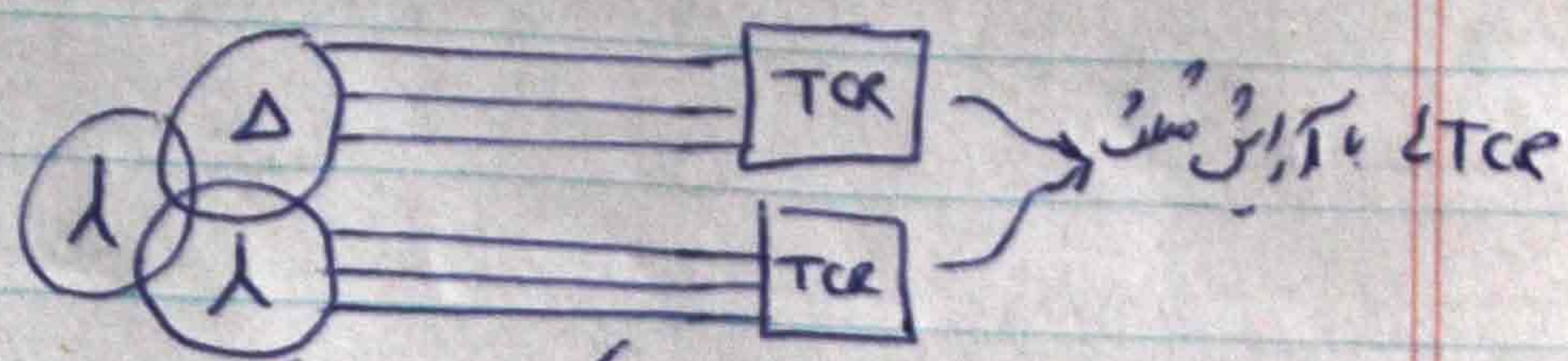
روش های حذف هارمونیک

1- طراحی و نصب فیلترهای پسیو در شبکه

2- نحوه اتصال یا آرایش TCR به شبکه جهت حذف هارمونیک (استفاده از ترانس‌ها)



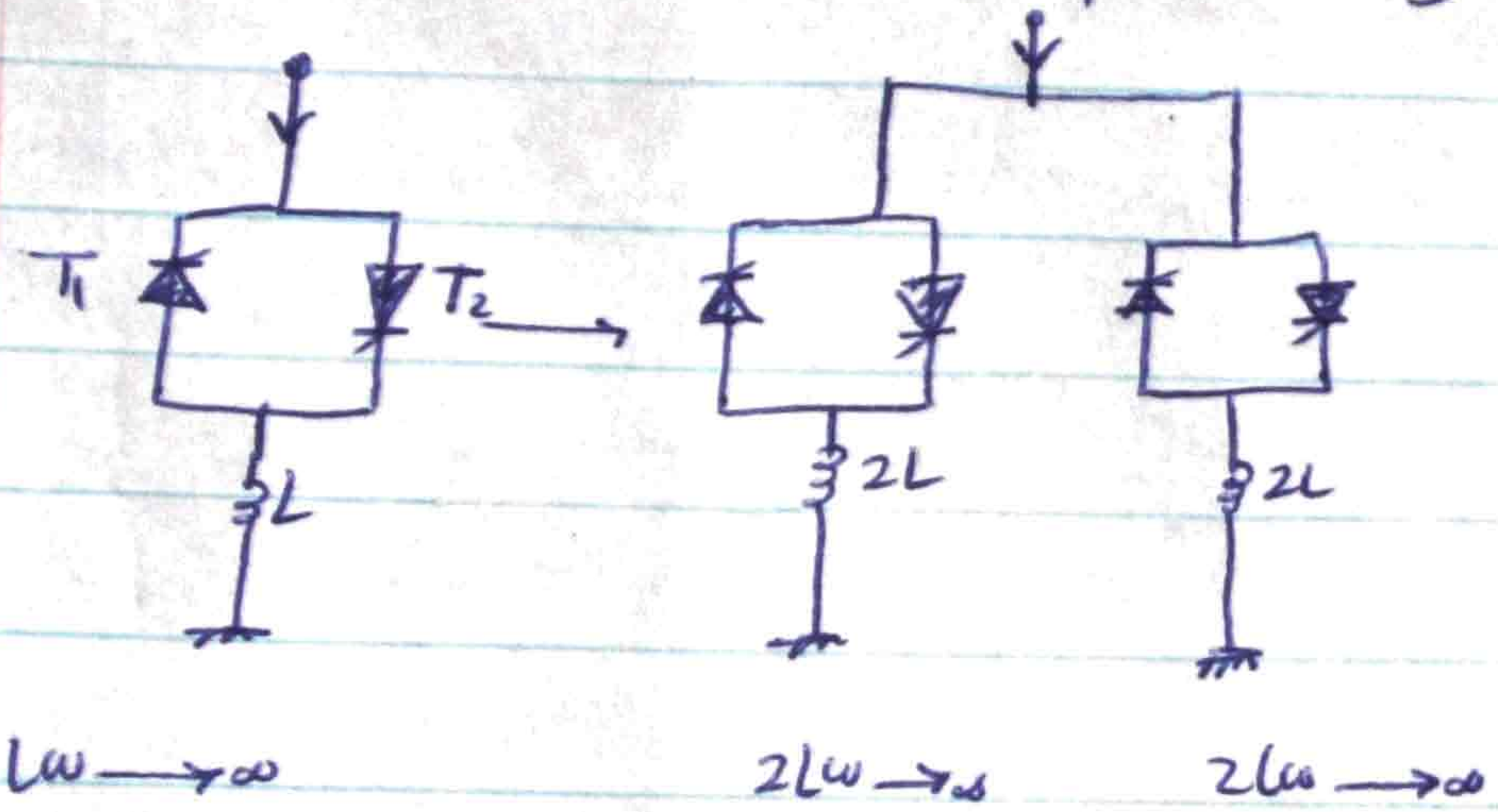
هارمونیک مضارب سوم وارد شبکه نمی شوند

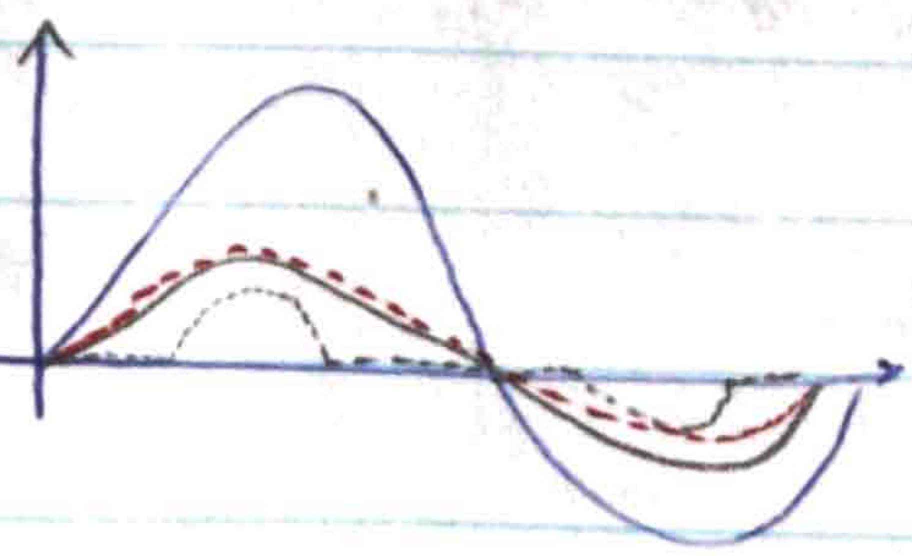


تحقیق، آرایش فوق کدام یک از هارمونیک ها را حذف می کند.

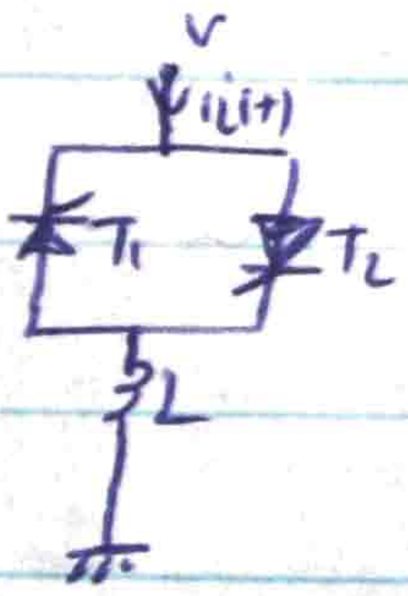
یا ما می آییم آرایش اولیه را تبدیل به آرایش موازی با L های متفاوت تبدیل می کنیم.

مزیت این روش این است که با توجه به نیاز مدارهای پارالل را با تنظیم زاویه آتش می توانیم وارد مدار کنیم.



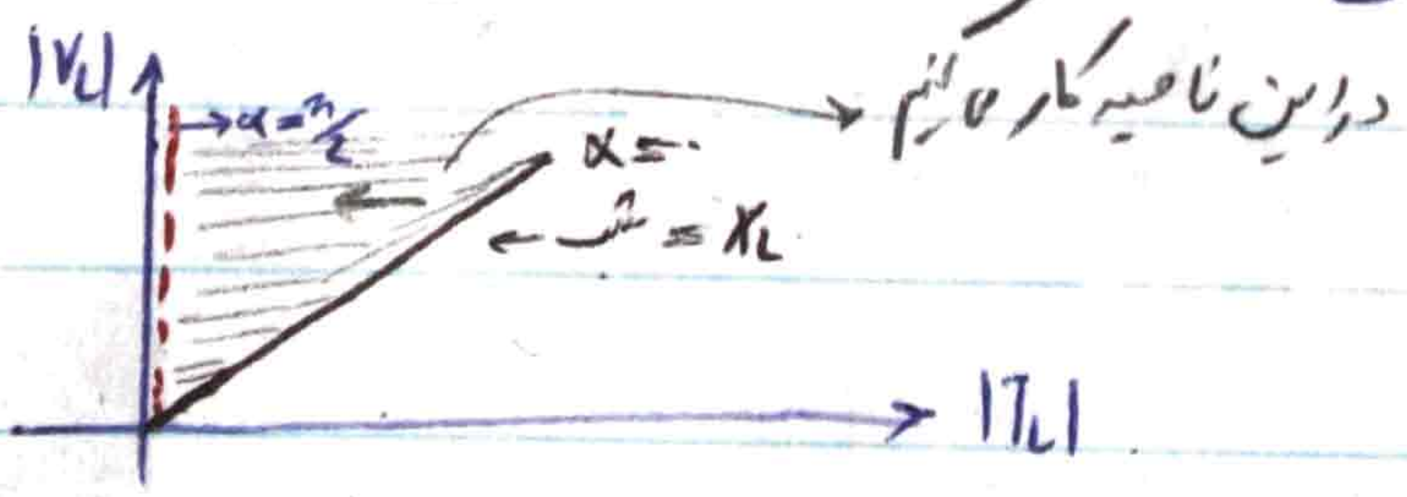


برای بدست آوردن امپدانس بالاتر برای داشتن جریان کمتر ما می آییم زاویه α را تنظیم می کنیم. در این روش اثر هارمونیک کمتر است.

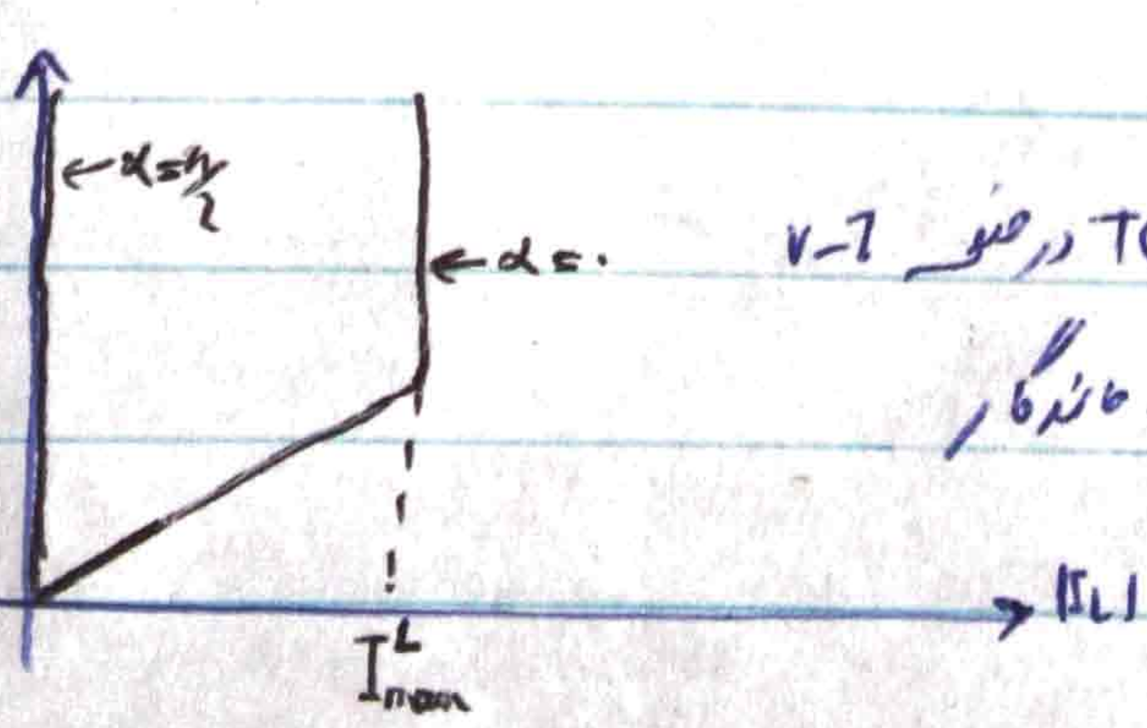


$$\vec{V}_L = j X_L(\alpha) \cdot \vec{I}_L$$

$$\vec{I}_L = j B_L(\alpha) \cdot \vec{V}$$

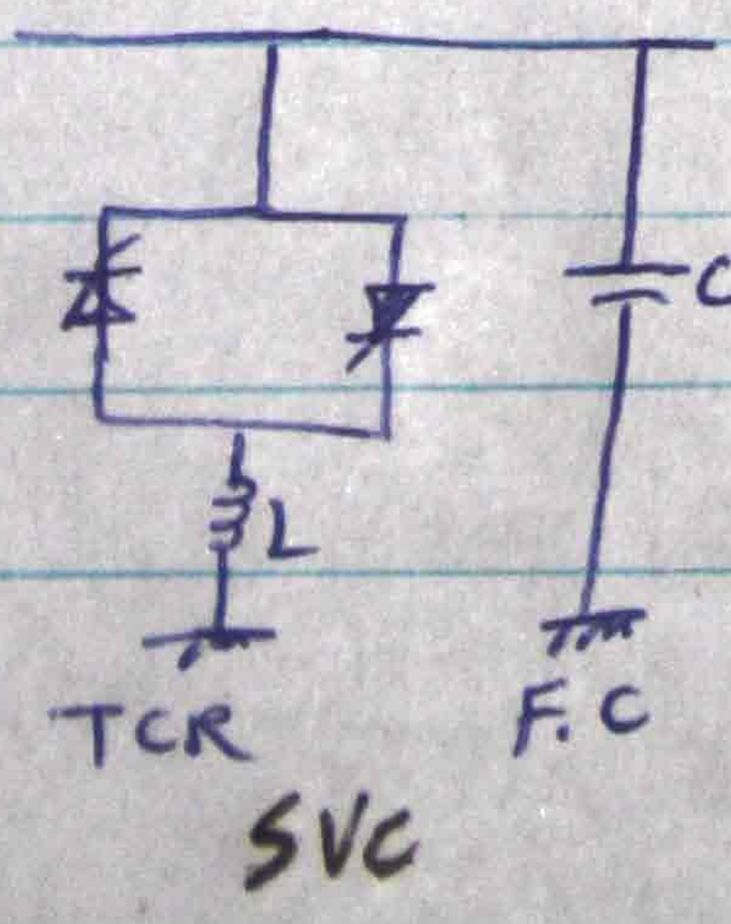


حد جریان در حالت $\alpha = 0$ مشخص می شود.

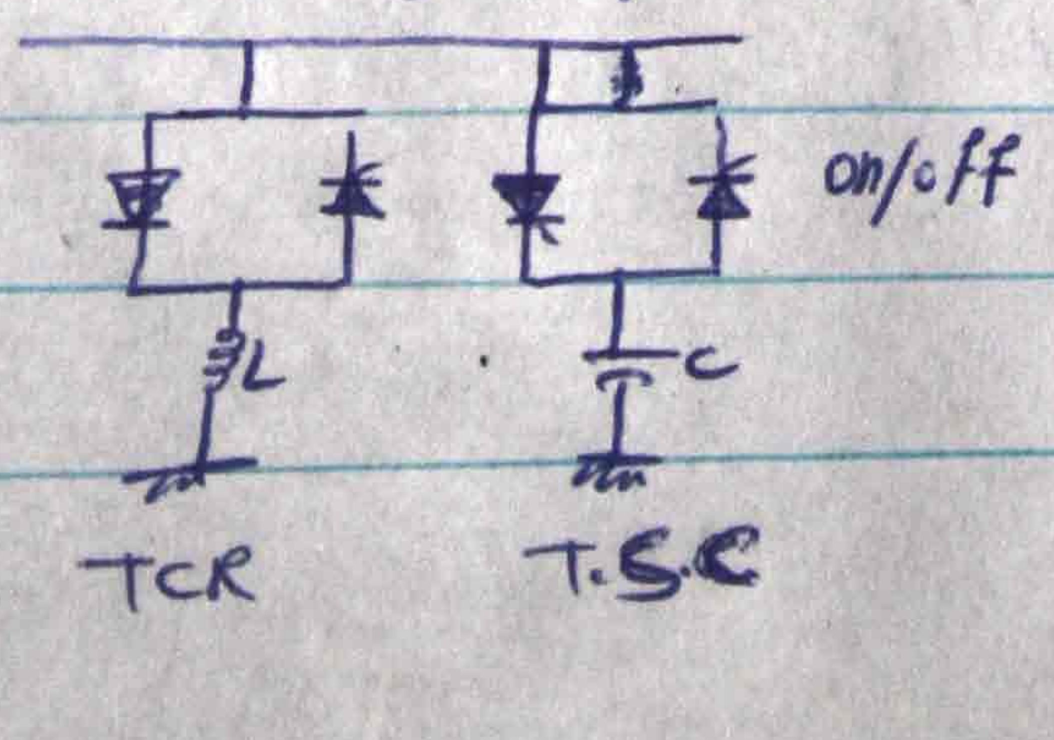


مشخصه TCR در صفحه V-I در حالت ماندگار

:. می خواهیم جریان خازنی را نیز وارد شبکه جبران کنیم. آرایش زیر را انجام می دهیم.



یا

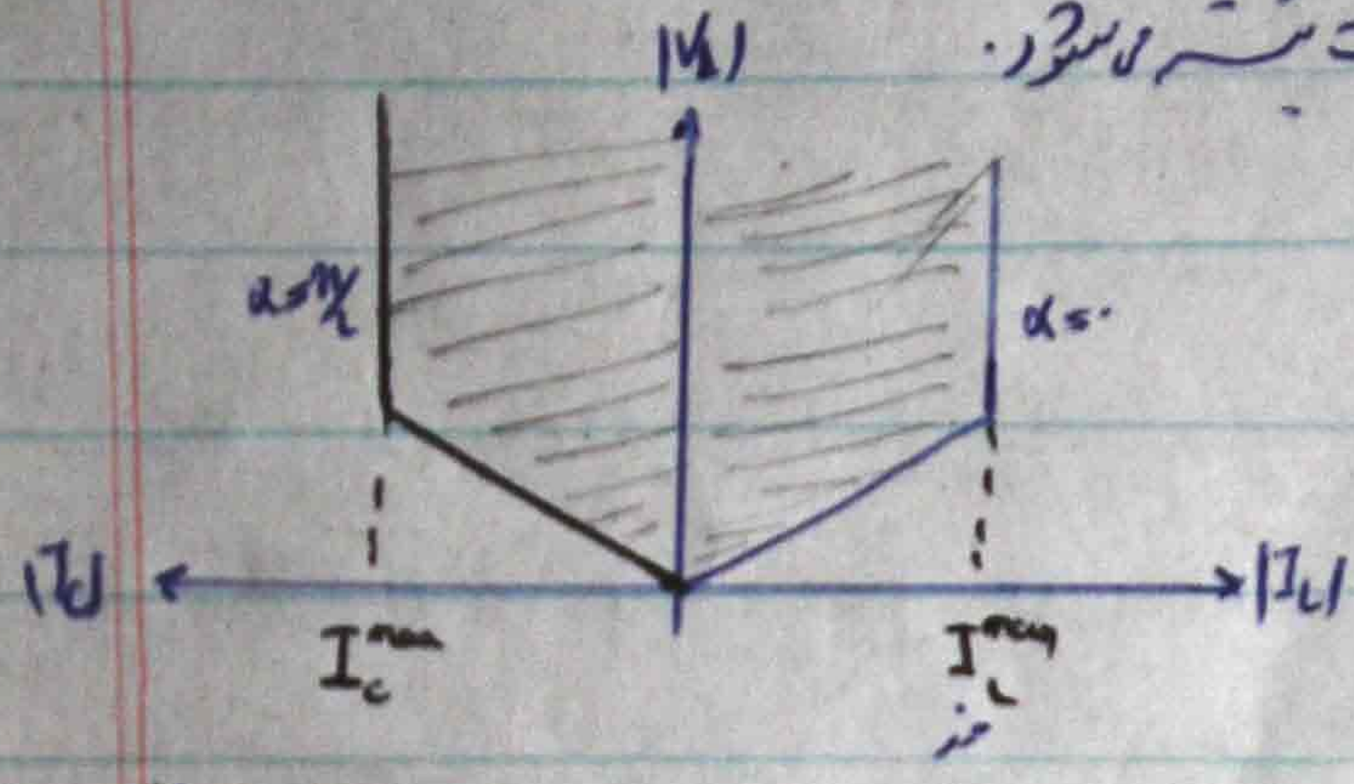


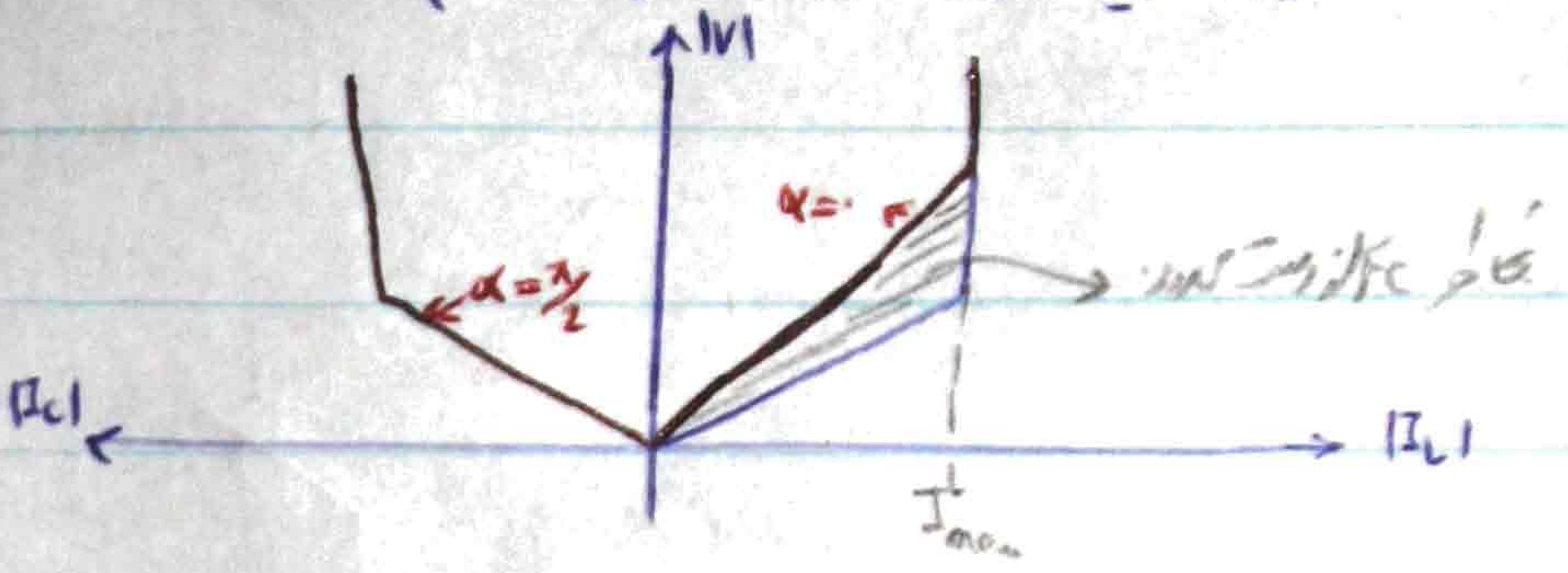
معایب (TCR + T.S.C) :

- مدار کنترل آن پیچیده‌تر می‌شود.
- زمان کلید زنی خازن باید مناسب انتخاب شود اگر در لحظه وصل ولتاژ اولیه خازن صفر (اولیه) باشد یک جریان ضربه در شبکه بوجود می‌آورد چون در آن لحظه در حکم خازن اتصال کوتاه شده، جریان ضربه بزرگی از شبکه می‌کشد.

مزایا :

محدوده کنترلی ما بیشتر می‌شود (در ناحیه خازنی) محدوده جریان در این حالت بیشتر می‌شود.





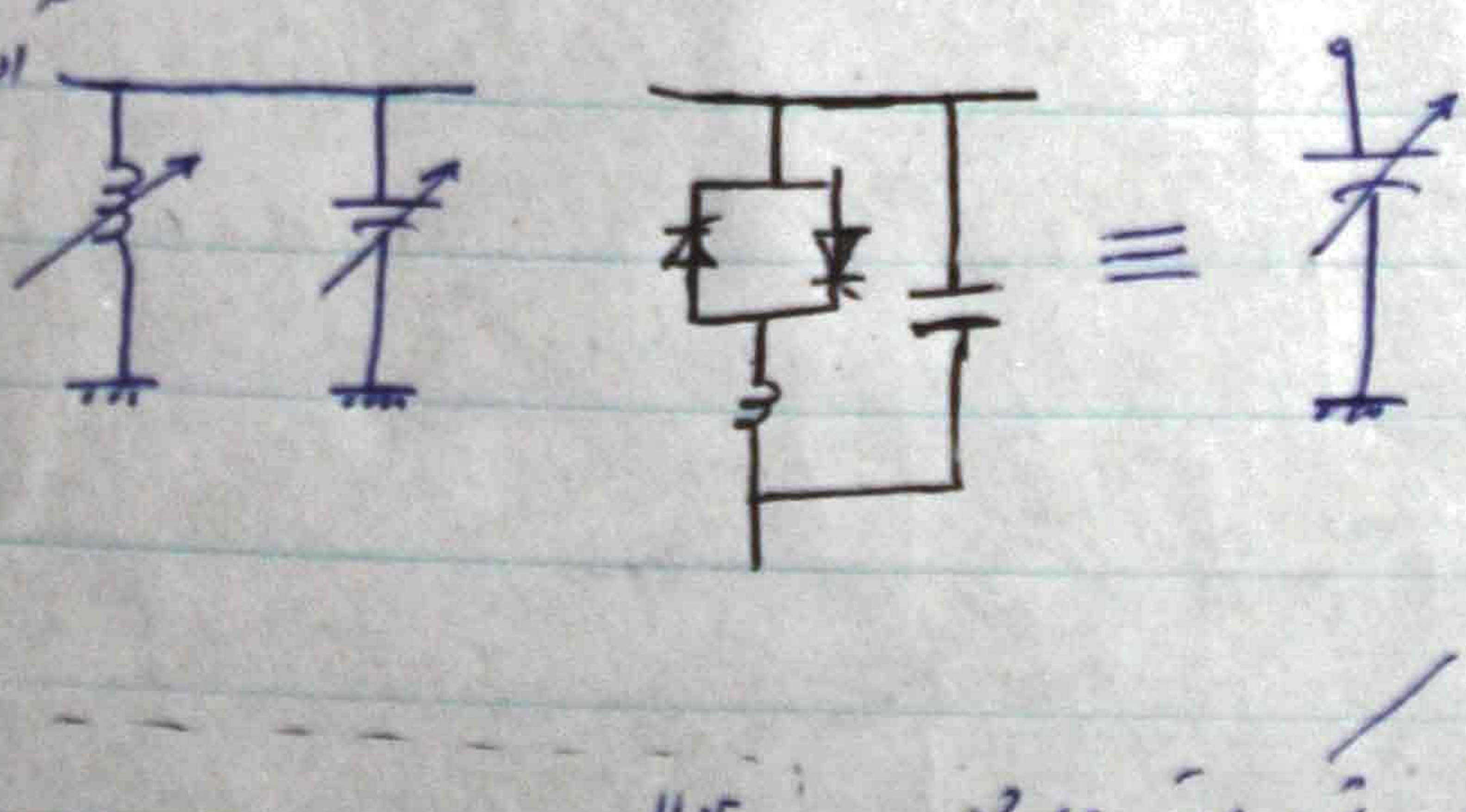
مشخصه TCR+T.SC در صفحه I-V در حالت ماندگار

مشخصه TCR + FC در صفحه I-V در حالت ماندگار

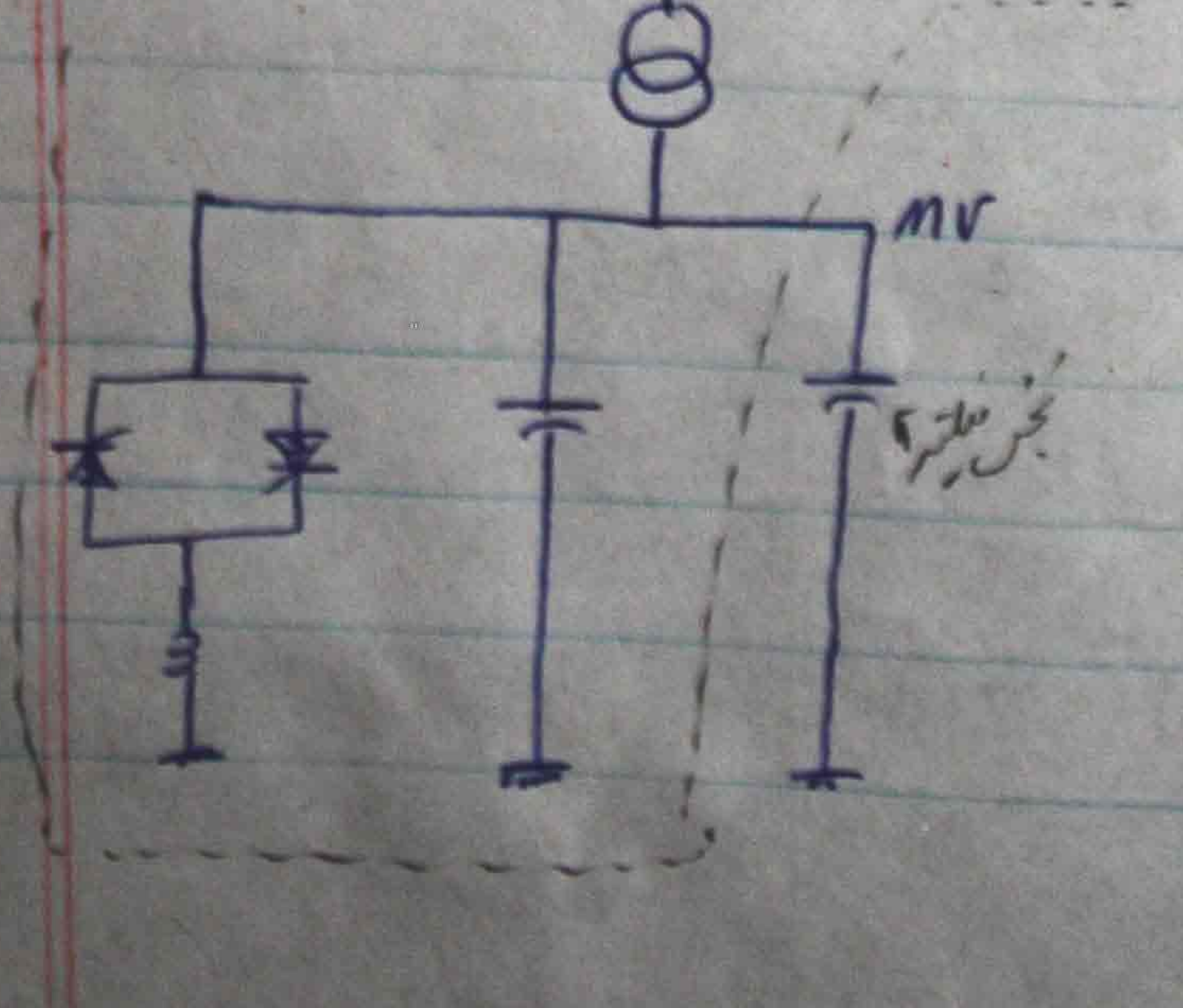
- با تنظیم زاویه آتش α جریان خازن را نمی‌توان تغییر داد. برای تغییر امپدانس سلف باید جریان را برش داد و برای تغییر امپدانس خازن باید ولتاژ را برش داد. در T.S.C ، تایرستورها مثل یک کلید عمل می‌کنند. ([illegible])

مزیت دیگر: در T.CR+F.C چون خازن را نمی‌توان از مدار خارج کرد بخشی از امپدانس سلف را به واسطه ثابت بودن خازن از دست می‌رود در حالی که در TCR+T.S.C خازن قابل قطع و وصل است.

اگر «ظرفیت سلفی» > ظرفیت خازنی



ظرفیت سلفی « ظرفیت خازنی » اگر



در شبکه‌های قدرت معمولاً SVC با آرایش زیر به شبکه متصل می‌شود.

مثال: یک SVC با مشخصات زیر به شبکه انتقال متصل شده است مطلوبست تعیین دامنه تغییرات

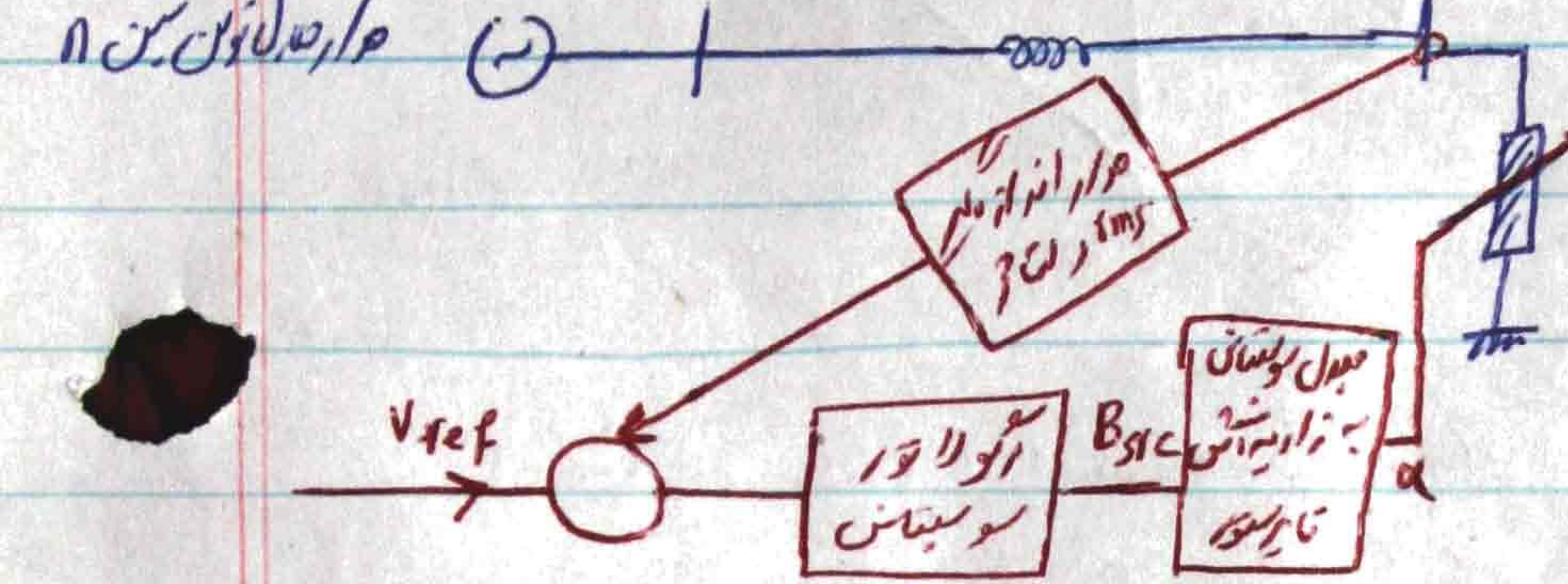
سوسپتانس SVC در باس 20^{kV}، ظرفیت SVC در باس 230^{kV}: $+350^{MVAr}$ (خازنی)

، -300^{MVAr} (سلفی)

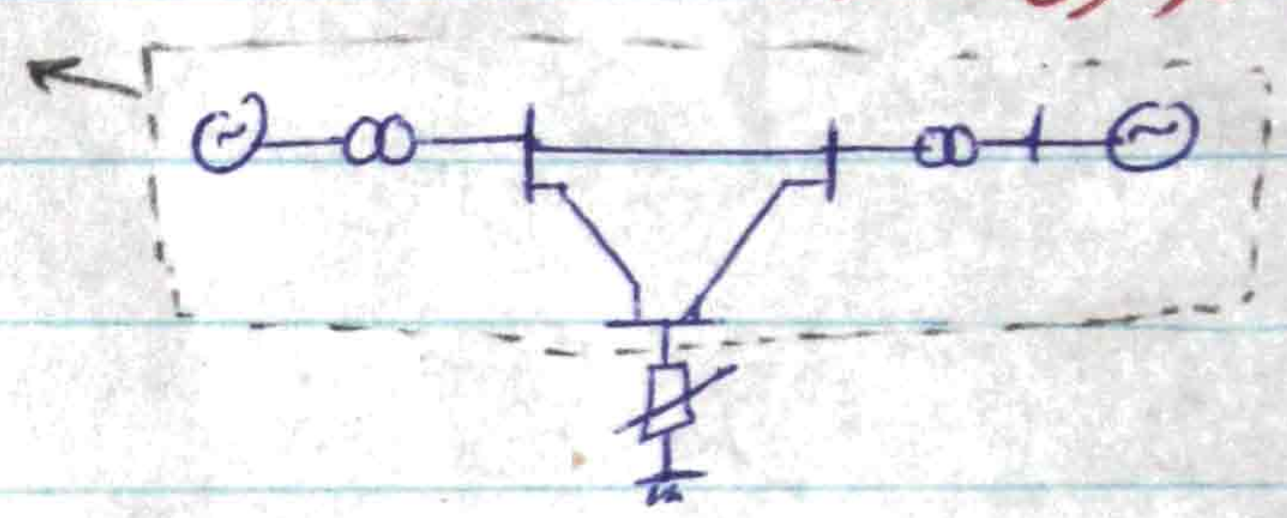
مشخصات ترانسفورماتور SVC: $230/20^{kV}$ — $X_t\% = 12\%$ @ $300\,MVA$

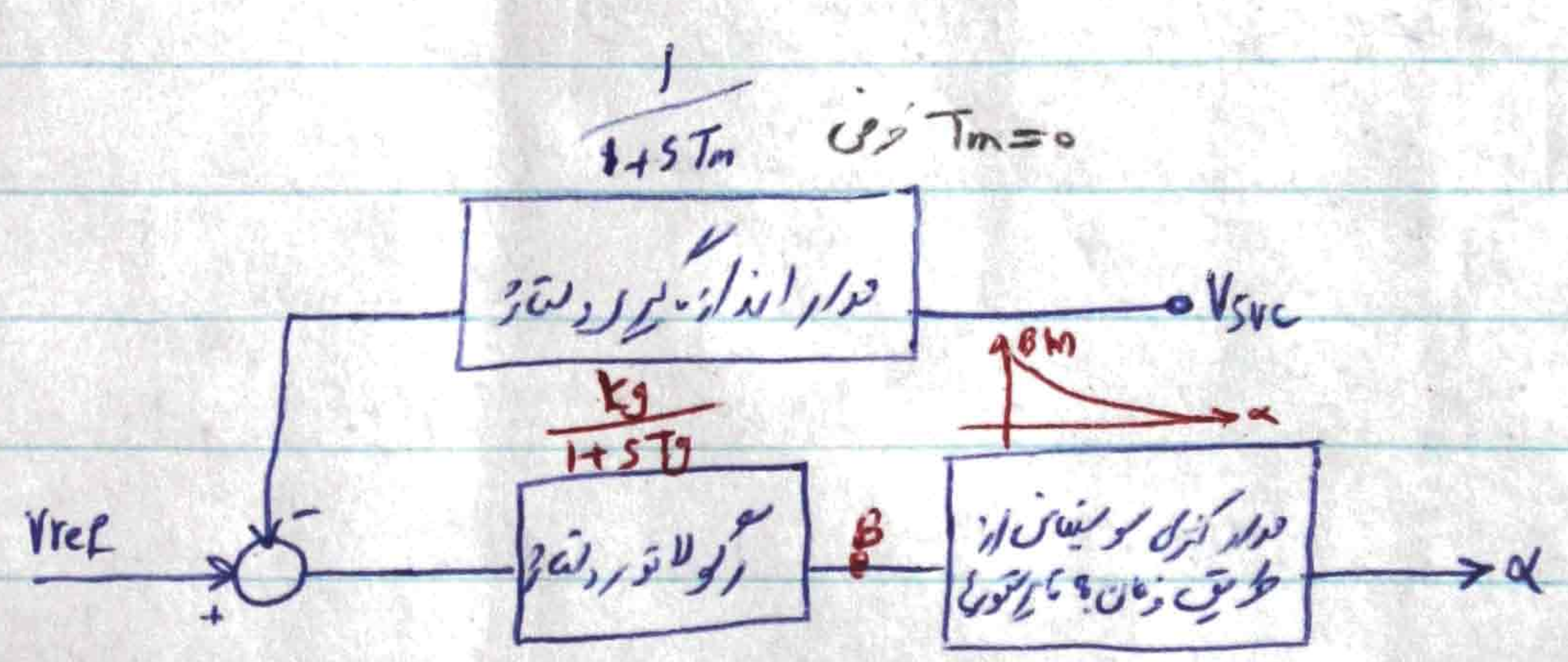
؟ = B_C و B_L ، در این حالت بنظر شما ظرفیت ترانسفورماتور چه مقدار می تواند باشد.

2.) $B_{max}^{cap} = .87\,pu$, $B_{min} = -.97\,pu$, $S_B = 350^{MVA}$

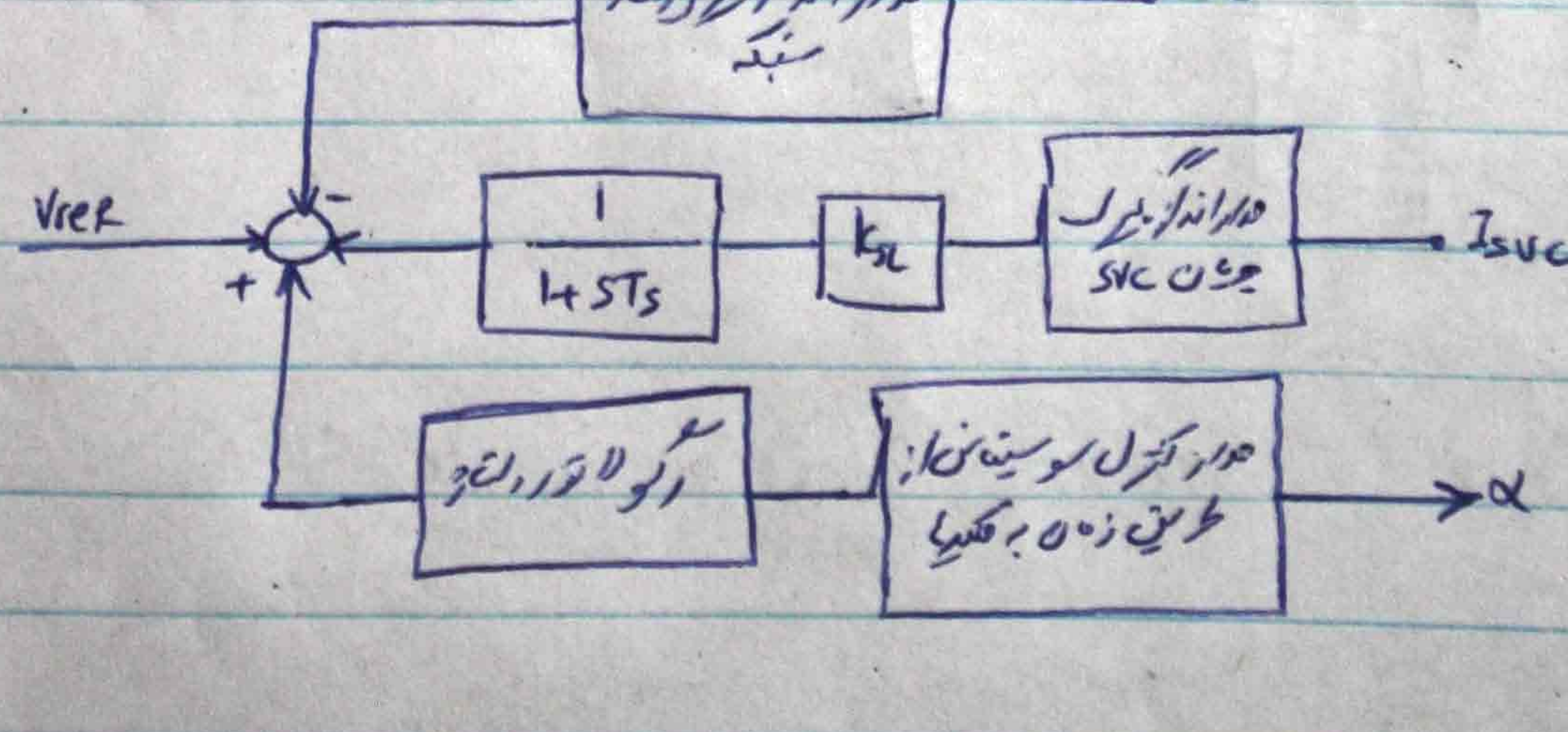


مدار کنترلی SVC:





مدل شماره 1 CIGREE:

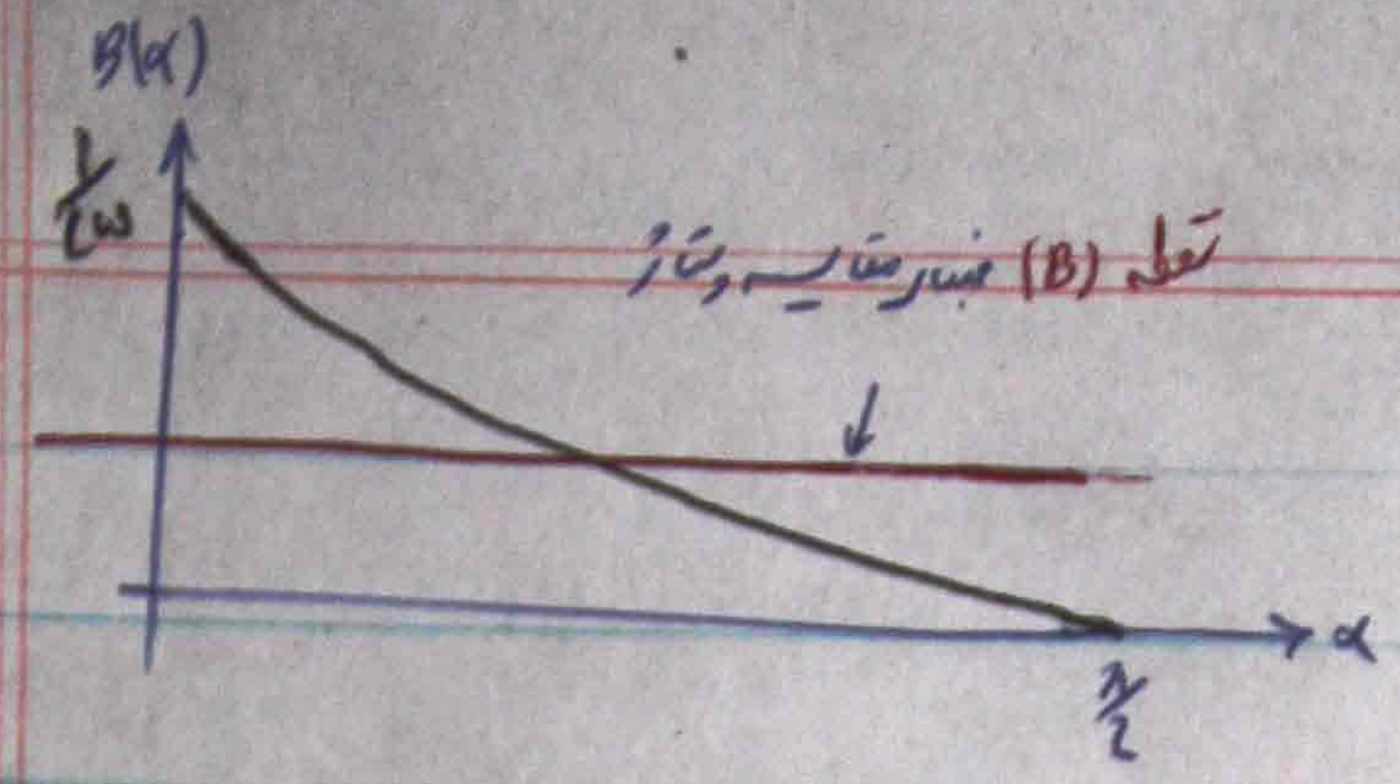


مدل شماره 2 CIGREE:

مدل شماره 1

رگولاتور ولتاژ: $\frac{K}{1+sT_g}$

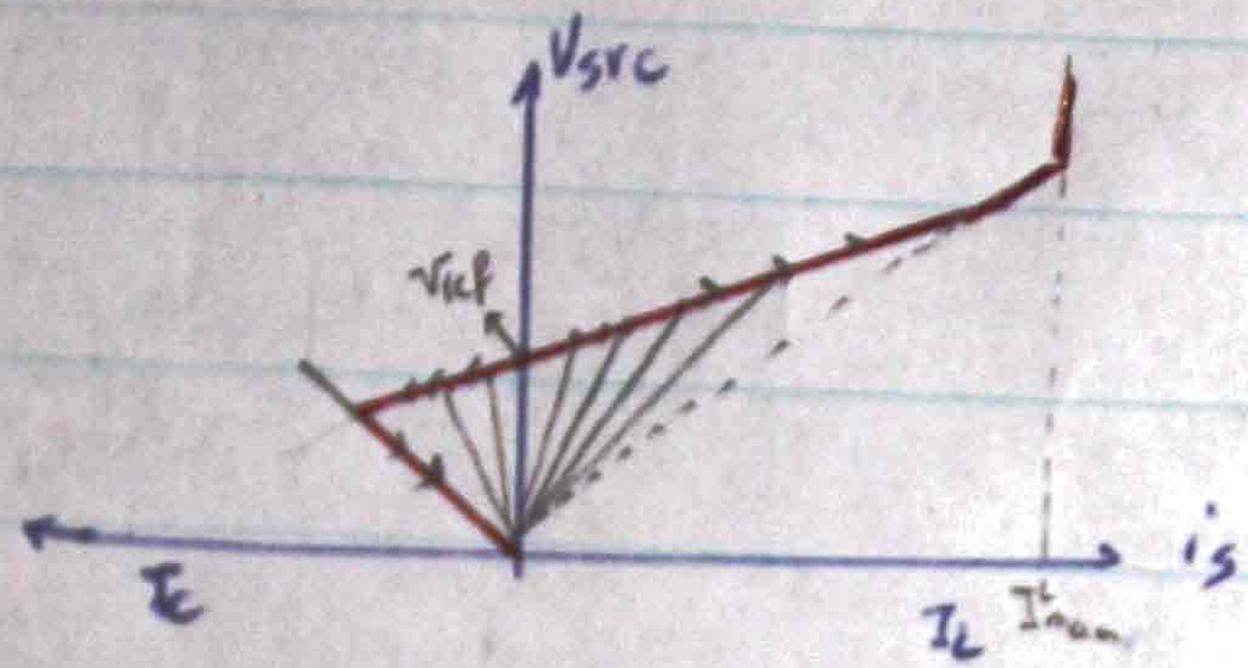
در مدل SVC ← $B_L(\alpha) = \frac{1}{L\omega}\cdot\frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$



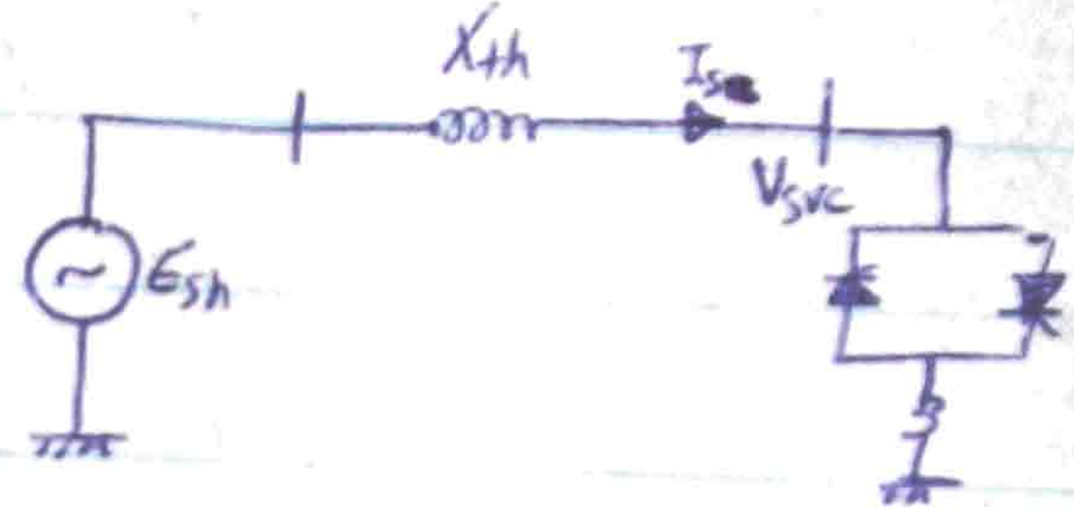
$$(V_{ref}-V_{svc})\frac{k_g}{1+sT_g}=B_{svc} \qquad \text{اگر } s=0$$

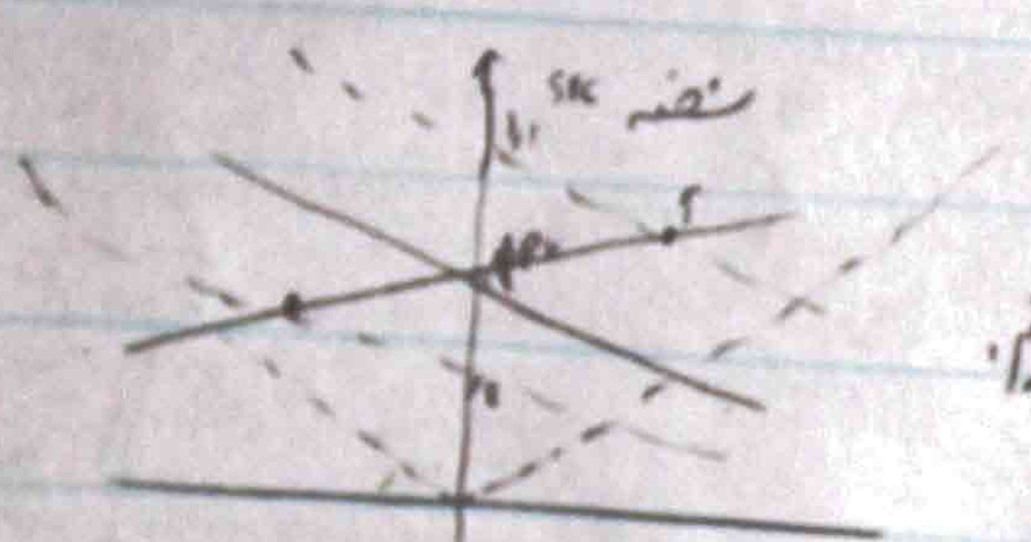
$$\begin{cases}(V_{ref}-V_{svc})\,k_g=B_{svc}\\ i_{svc}=B_{svc}V_{svc}\ \checkmark\end{cases}$$

اگر $V_{svc}\simeq 1^{p.u} \longrightarrow i_{svc}\simeq B_{svc} \longrightarrow i_{svc}\simeq (V_{ref}-V_{svc})\,k_g \rightarrow V_{svc}=V_{ref}-\frac{1}{k_g}\,i_{svc}$



✓ در این رابطه مقدار i_{svc} را براساس جریان خازنی محاسبه شده است.





نقاط قطع خط بار را با منحنی svc را رسم کنیم.