بسمه تعالی

جزوه

بررسی سیستم های قدرت

دانشگاه

علم و صنعت

استاد

دکتر شهرتاش

- بررسی سیستم های قدرت : by Dr. shahrtash

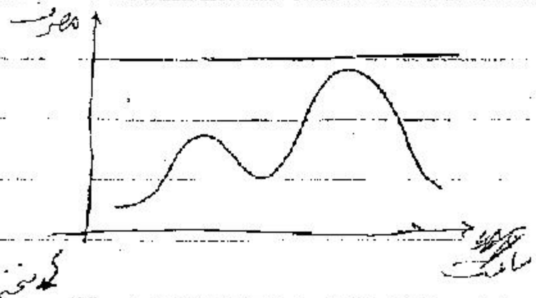
جلسه اول ۸۶/۷/۴

سرفصل های درس :

- بررسی و تحلیل سیستم های قدرت در حالت ماندگار

سیستم قدرت :

مجموعه‌ای از تجربیات، دانش و تجهیزات که با هدف تولید، انتقال و توزیع انرژی الکتریکی به یکدیگر مرتبط گردیده‌اند

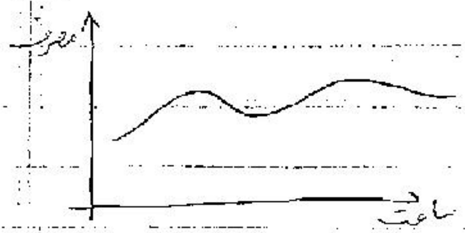


منحنی بار

انواع سیستم قدرت :

- منفرد :

همواره باید پیک مصرف را کاهش داد



- منطقه‌ای یا محلی :

- منحنی بار به صورت ملایم تر در می‌آید و مصرف در طول روز متعادل تر می‌شود

- سراسری (کشوری یا ملی)

- فراملی : در مدیریت باید کشورها با هم هماهنگ باشند

نوع مدیریت :

- انحصار دولت - دولت در تعامل با شرکتهای محلی - دولت در تعامل با بخش خصوصی

بخش های اصلی سیستم قدرت :
- بخش تولید
- بخش انتقال
- بخش (فوق توزیع) و توزیع

- امروزه پیشنهاد می شود بخش تولید در مجاورت بخش توزیع قرار گیرد .

الف) بخش تولید :
- هدف : تبدیل سایر انرژی ها به انرژی الکتریکی

- نیروگاه های آبی :
- نیروگاه های بخاری : ← آب جاری وجود داشته باشد طولانی به پیچ گرم کردن آب ساخته :
- نیروگاه های گازی ← سیکل ترکیبی ⇐ سرعت راه اندازی بالا ← برای شرایط اضطراری

[از بخار زیاد خروجی از نیروگاه گازی، برای بخار کردن آب استفاده می شود
راندمان افزایش می یابد .

- نیروگاه های اتمی :

- نیروگاه های بادی
- نیروگاه های خورشیدی

- تولید از جزر و مد
- تولید از انرژی امواج
- تولید از حرارت زمین

ب) بخش انتقال :
- هدف : انتقال انرژی الکتریکی از محل تولید به [illegible] مصرف
- اتصال واحدهای مختلف تولید برای افزایش [illegible] در شرایط قطع هر واحد .

اجزاء :

- پستهای به هم پیوسته (پست فشار قوی)
- ترانسفورماتورهای افزاینده ولتاژ
- خطوط انتقال (۴۰۰، ۲۳۰ و ۱۳۲ کیلوولت در ایران)
- ترانسفورماتورهای کاهنده ولتاژ

- بخش توزیع و فوق توزیع :

هدف : انتقال انرژی الکتریکی به مشترکین

اجزاء :

خطوط فوق توزیع و توزیع (۶۳ و ۲۰ کیلوولت و کمتر از آن)
ترانسفورماتورهای کاهنده ولتاژ
مشترکین (یا مصرف‌کنندگان)

بررسی سیستمهای قدرت :

- الف) بررسی پخش بار (Load flow Analysis)
محاسبه ولتاژها و نحوه توزیع توان در شبکه

- ب) بررسی پخش بار اقتصادی (Economic Dispatch) ؛
محاسبه نحوه توزیع تولید توان در واحدها برای بهینه‌سازی هزینه‌ها

ج) بررسی در مدار قرار گرفتن واحدها (Unit Commitment) ؛
محاسبه نحوه توزیع تولید توان در واحدها برای بهینه‌سازی هزینه‌ها با در نظر گرفتن هزینه ورود و خروج آنها

د) بررسی قابلیت اطمینان (Reliability Analysis)

محاسبه احتمال و مدت قطع سیستم ناشی از حذف احتمالی تجهیزات

ه) محاسبات خطا (Fault studies):

محاسبه جریانهای عبوری از تجهیزات و نحوه توزیع آنها در شرایط وقوع خطا

و) بررسی هماهنگی حفاظتی (Relay Coordination):

بررسی نحوه عملکرد دستگاه‌های حفاظتی در برابر خطاها

با استفاده از فیوز در گذشته و امروزه دستگاه‌های میکروپروسسوری

ز) بررسی پایداری گذرا (Transient Stability)

بررسی نحوه رفتار ژنراتورها پس از بروز اختلال‌های بزرگ

ح) بررسی دینامیکی (Dynamic Analysis):

بررسی نحوه رفتار دستگاه‌های کنترل ژنراتورها پس از بروز اختلال‌های کوچک

ط) بررسی حالت‌های گذرای الکترومغناطیسی (EM Transient Analysis):

بررسی شکل امواج ولتاژ و جریان پس از تغییرات ناگهانی در ولتاژ یا جریان شبکه

ی) بررسی عایقی (Insulation Coordination)

محاسبه و بررسی هماهنگی عایقی در شبکه برای تحمل حداکثر ولتاژها

ک) بررسی هارمونیکی (Harmonic Analysis):

محاسبه میزان و نحوه توزیع هارمونیک‌ها در شبکه

ل) بررسی امنیت (Security Analysis):

محاسبه میزان فاصله شرایط تعادل بار - تولید در شبکه با بروز ناپایداری

١

٢) پیش بینی وضعیت سیستم (state Estimation)

٣) بررسی وقوع حوادث
٤-) بررسی پایداری ولتاژ

روش های بررسی :

- محاسبات دستی : برای شبکه های کوچک با ساده سازی زیاد
- محاسبات (اندازه گیری) به کمک مدل های آنالوگ
- محاسبات (اندازه گیری) به کمک میکرو مدل ها

- محاسبات به کمک مدل های کامپیوتری : کاراترین روش در بررسی

مدلسازی کامپیوتری شبکه :
- مدلسازی تجهیزات شبکه

١. ژنراتورها
٢. ترانسفورماتور
٣. خطوط انتقال و توزیع
٤. بارها

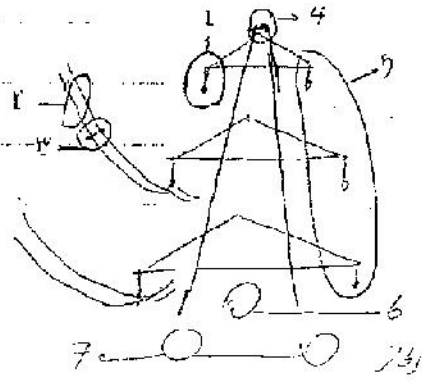
جلسه بعد : مدل خطوط

جلسه دوم : ٧/٧/٨٦ ؟

محاسبه اندوکتانس خطوط انتقال :

خط انتقال هوایی :

- دکل دو مداره :



١. مقره
٢. جداکننده های باندل مربوط به یکی از فازها
٣. نگه دارنده [illegible] های باندل
٤. سیم زمین یا محافظ
٥. [illegible]
٦. لوازم جلوگیری از [illegible]
٧. پایه شاسی دکل

- برای جلوگیری از حالت دومینو، بعد از هر چند دکل از یک دکل کششی استفاده می‌شود که نسبت به سایر دکل‌ها ارتفاع کوچک‌تری دارد.

مدل‌سازی خط انتقال:

اجزای مدار انتقال در مدل:

- سلف سری: مدل انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی اطراف خط
- خازن موازی: مدل انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی اطراف خط (بین هادی و زمین)

- مقاومت سری: مدل تلفات انرژی خط (بر اثر جریان عبوری)
- مقاومت موازی: مدل تلفات انرژی خط (بر اثر جریان‌های سطحی و نشتی)

- طراحی یک خط انتقال خوب به گونه‌ای است که اثر جریان‌های سطحی و نشتی ناچیز بوده و قابل صرف نظر کردن باشد.

اندوکتانس خطوط انتقال هوایی:

مفروضات:

- مستقیم و بی‌نهایت بودن طول هادی‌ها
- بسیار کوچک بودن شعاع هادی‌ها نسبت به فواصل میان آن‌ها
- دایره‌ای بودن سطح مقطع هادی‌ها
- یکسان بودن چگالی جریان در سطح مقطع هادی‌ها
- صفر بودن مجموع جریان‌های عبوری از هادی‌های در نظر گرفته شده

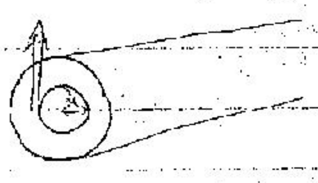
اندوکتانس داخلی:

$$\oint H \cdot d\vec{l} = I$$

$$H_x \oint dl = I_x \left(= \frac{\pi x^2}{\pi r^2} I\right)$$

مقدار ثابت [illegible]

$$\Rightarrow H_x = \frac{x}{2\pi r^2} I \quad At/m \quad ; \quad B_x = \mu_0 \mu_r H_x \quad Wb/m^2$$

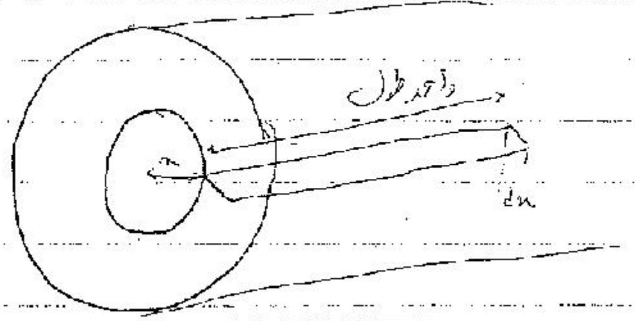


مرجع
کتاب [illegible] دکتر طباطبایی

۷۱ و

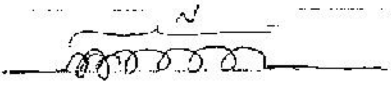
درنتیجه اندوکتانس داخلی

حالا برای مس و آلومینیوم بسیار نزدیک به یک است



$$\boxed{d\varphi = B_x \cdot dx}$$ در واحد طول Wb

$$L_{int} = \int \frac{I_x \, d\varphi}{I^2}$$



$$L = \frac{N\Phi}{I} = \frac{\lambda}{I}$$

$$L_{int} = \int \frac{N_x \cdot d\varphi}{I} = \int \frac{\frac{x^2}{r^2}\, d\varphi}{I}$$

N_x برابر نسبت سطوح است :

$$= \frac{\mu_0}{8\pi} \left(= \frac{1}{2} \times 10^{-7} \ H/m \right)$$

نکته جالب در رابطه فوق این است که به شعاع بستگی ندارد.

یا

انرژی ذخیره شده در هادی به ابعاد هادی بستگی ندارد.

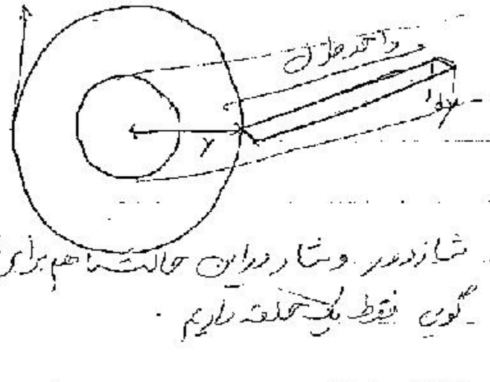
اندوکتانس خارجی :

$$H_y = \frac{1}{2\pi y} I \quad A.t/m$$

$$B_y = \mu_0 \mu_r \cdot H_y \quad Wb/m^2$$

$$d\varphi = B_y \cdot dy$$ در واحد طول Wb

$$\varphi_{ext} = \int d\varphi = \int_r^P B_y \, dy$$

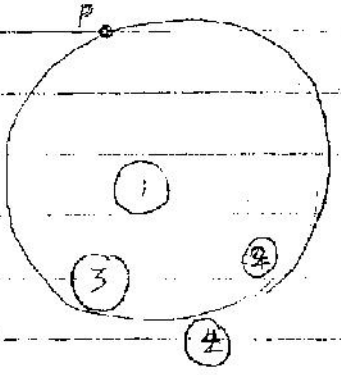


شار دور و شار در این حالت با هم برابرند
گویی فقط یک حلقه داریم.

در شرایط عادی هیچ گاه تنها یک هادی نداریم :
در ماکزیمم حالت ۲۶ هادی در یک خط انتقال در کنار هم قرار می‌گیرند.

① ③
② ④

شار دور خارجی حول هادی شماره 1 :



$$\lambda_{ext} = \sum_{j=1}^{n} \int d\lambda_{ext_{j1}}$$

$$= \int_{r}^{D_{1P}} B_{y_1}\, dy + \int_{D_{21}}^{D_{2P}} B_{y_2}\, dy$$

فاصله هادی 2 تا نقطه P

فاصله بین دو هادی

$$+ \int_{D_{31}}^{D_{3P}} B_{y_3}\, dy + \cdots + \int_{D_{n1}}^{D_{nP}} B_{y_n}\, dy$$

$$\lambda_{ext_{j1\text{-}P}} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_j \ln \frac{D_{jP}}{D_{j1}}$$

$$\lambda_{ext} = \sum_{j=1}^{n} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_j \ln \frac{1}{D_{j1}} + \sum_{j=1}^{n} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_j \ln D_{jP}$$

در نظر داشته باشیم که ؛ $D_{11} = r$

$$\sum_{j} I_j = 0 \Rightarrow I_n = -(I_1 + I_2 + I_3 + \cdots + I_{n-1})$$

$$\lambda_{ext} = \sum_{j=1}^{n} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_j \ln \frac{1}{D_{j1}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{n-1} \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_j \ln \frac{D_{jP}}{D_{nP}}}_{\to 0} \quad P \to \infty$$

$$\lambda_{ext_m} = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} I_m \ln \frac{1}{r_m} + \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \sum_{\substack{j \\ j \neq m}} I_j \ln \frac{1}{D_{jm}}$$

شار دور کل هادی :

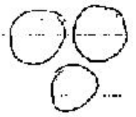
اندوکتانس داخلی

$$\lambda_{t_m} = \Big(\overbrace{\frac{\mu_0}{8\pi}}^{1} + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{r_m}\Big) I_m + \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{\substack{j \\ j \neq m}} I_j \ln \frac{1}{D_{jm}}$$

$$\lambda_{t_m} = \Big(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{\underbrace{e^{-\frac{1}{4}} r_m}_{GMR}}\Big) I_m + \frac{\mu_0}{2\pi} \sum_{\substack{j \\ j \neq m}} I_j \ln \frac{1}{D_{jm}}$$

شعاع متوسط هندسی : Geometric mean Redius

مثال:



9x9

↓

۱۲x۱۲

↓ حذف کردن و یک رسانای هم ارز

۸x۸

↓

9x9 $\underline{۳\text{و}(۲\text{و}۱)}$ ⟹ ۷x۷ ---- 5x5 ⟹ 3x3

$\underline{۲\text{و}۱}$

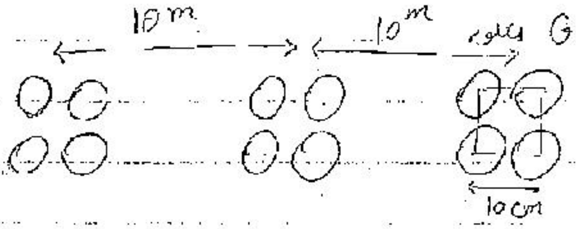
A ← ۳و۲و۱

B ← ۶و۵و۴

C ← ۹و۸و۷

تمرین:

خط تک مداره ۴ باندل با GMR معلوم



3x3 با ← ۳ روش ۱) ... ۲) با استفاده از جدول موجود در سایت و انتخاب یک نوع سیم دلخواه

sarlak@iust.ac.ir ← (در طول جلسه حل تمرین تحویل داده شود)

در روش سوم ، کابل‌ها را دوتا دوتا با هم موازی می‌کنیم

صـ ۱۳ ۱) بررسی دیگر تمرینی

$$\Delta V_1 = \Delta V_A = j\omega\left[L_{11} - \frac{(L_{11}-L_{12})(L_{11}-L_{21})}{L_{11}-L_{12}-L_{21}+L_{22}}\right]\bar{I}_A + \left[L_{12} - \frac{(L_{21}-L_{22})(L_{12}-L_{22})}{L_{11}-L_{21}-L_{12}+L_{22}}\right](0) + \cdots$$

با استفاده از روابط ص ۲۶۳ و ۲۶۵ رابطه ΔV ها را بر حسب I_B , I_A بدست می‌آوریم

الگوریتم روش سوم :

۱) تشکیل ماتریس $L^{(1)}$

$$L^{(1)}_{(n+1)\times(n+1)} = \left[\begin{array}{c|c} L_{n\times n} & L^{(2)}_{n\times 1} \\ \hline L^{(3)}_{1\times n} & L^{(4)}_{1\times 1} \end{array}\right]$$

$$\left[L^{(2)}\right]^T = \left[L_{1m}-L_{1k} \quad L_{2m}-L_{2k} \quad \cdots \quad L_{nm}-L_{nk}\right]$$ m , k : شماره‌های باس

$$\left[L^{(3)}\right] = \left[L_{m1}-L_{k1} \quad L_{m2}-L_{k2} \quad \cdots \quad L_{mn}-L_{kn}\right]$$

$$\left[L^{(4)}\right] = L_{mm}-L_{mk}-L_{km}+L_{kk}$$

۲) اجرای روش حذف کردن در سطر و ستون n+1

روش حذف کردن ، kron Reduction

$$\overset{old}{L^o} = \left[\begin{array}{ccc|c} L_{11}^o & L_{12}^o & L_{13}^o & L_{14}^o \\ L_{21}^o & L_{22}^o & L_{23}^o & L_{24}^o \\ L_{31}^o & L_{32}^o & L_{33}^o & L_{34}^o \\ \hline L_{41}^o & L_{42}^o & L_{43}^o & L_{44}^o \end{array}\right] \xrightarrow[\text{حذف سطر و ستون چهارم}]{} \overset{new}{L^n} = \left[\begin{array}{ccc|} \boxed{L_{11}^n} & L_{12}^n & L_{13}^n \\ L_{21}^n & L_{22}^n & L_{23}^n \\ L_{31}^n & L_{32}^n & L_{33}^n \\ \hline \end{array}\right]$$

$$L_{11}^n = L_{11}^o - \frac{L_{14}^o L_{41}^o}{L_{44}^o} \quad , \quad L_{23}^n = L_{23}^o - \frac{L_{24}^o L_{43}^o}{L_{44}^o}$$

۳) حذف سطر و ستون n+1 و هم چنین سطر و ستون k

برای حالت دو باندل داریم :

$$\begin{bmatrix}\Delta V_{LA}\\ \Delta V_{LB}\\ \Delta V_{LC}\end{bmatrix} = \overbrace{\begin{bmatrix}\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2}\end{bmatrix}}^{k} \begin{bmatrix}\Delta V_{L1}\\ \Delta V_{L2}\\ \Delta V_{L3}\\ \Delta V_{L4}\\ \Delta V_{L5}\\ \Delta V_{L6}\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}I_1\\ I_2\\ I_3\\ I_4\\ I_5\\ I_6\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{1}{2} & 0 & 0\\ \frac{1}{2} & 0 & 0\\ 0 & \frac{1}{2} & 0\\ 0 & \frac{1}{2} & 0\\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\\ 0 & 0 & \frac{1}{2}\end{bmatrix} \begin{bmatrix}I_A\\ I_B\\ I_C\end{bmatrix}$$

$$\Delta V_{L1} = \Delta V_{LA}$$

$$\Delta V_{L2} = \Delta V_{LA} \longrightarrow \Delta V_{LA} = \frac{1}{10}\Delta V_{L1} + \frac{9}{10}\Delta V_{L2} = \frac{1}{4}\Delta V_{L1} + \frac{3}{4}\Delta V_{L2}$$

$$= \underline{\frac{1}{2}\Delta V_{L1} + \frac{1}{2}\Delta V_{L2}}$$

حالت مناسب برای تبدیل ماتریس ۶۶ به 3×3

$$\left[\overrightarrow{\Delta V_L}\right]_{ABC} = j\omega \cdot k \cdot [L]_{n\times n} \cdot k^T \cdot \left[\vec{I}\right]_{ABC}$$

ماتریس L را مطابق آنچه تا پایان رشته‌ای بودن، خوانده‌ایم تشکیل می‌دهیم :

$$K_{3\times n} = \begin{bmatrix} P & \phi & \phi\\ \phi & P & \phi\\ \phi & \phi & P\end{bmatrix} \qquad P_{1\times b} = \left[\frac{1}{b}\ \frac{1}{b}\ ---\right]$$

$$\phi_{1\times b} = [0\ \ 0\ ..\ 0]$$

$$L_{3\times 3} = k \cdot L_{n\times n} \cdot k^T$$

ج) روش سوم :

چون هیچ شرطی نداریم از نظر دقیق ترین روش است .

$$\Delta \bar{V}_{n\times 1} = j\omega\, L_{n\times n} \cdot \bar{I}_{n\times 1}$$

با فرض دو باندل

$$\Delta V_A = \Delta V_1 = j\omega\left[L_{11}\bar{I}_1 + L_{12}\bar{I}_2 + \cdots\right] = j\omega\left[L_{11}\bar{I}_A + L_{12}(0) + \cdots + (L_{11} - L_{12})(-\bar{I}_2)\right]$$

$$L_{11}I_2 - L_{11}I_2$$

$$\Delta V_2 = j\omega\left[L_{21}\bar{I}_1 + L_{22}\bar{I}_2 + \cdots\right] = j\omega\left[L_{21}\bar{I}_A + L_{22}(0) + \cdots + (L_{21} - L_{22})(-\bar{I}_2)\right]$$

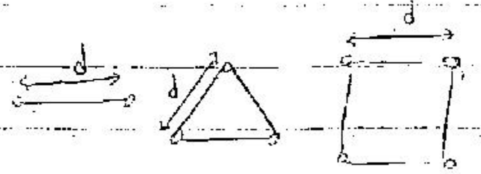
$$\Delta V_1 - \Delta V_2 = j\omega\left[(L_{11} - L_{21})\bar{I}_A + (L_{12} - L_{22})(0) + \cdots + (L_{11} - L_{12} - L_{21} + L_{22})(-I_2)\right]$$

لذا از معادله فوق I_2 را به دست آورده و در رابطه بالایی قرار می‌دهیم

$$(-I_2) = -\frac{(L_{11} - L_{21})}{(L_{11} - L_{12} - L_{21} + L_{22})}\bar{I}_A + \cdots$$

ت - سیم‌های دسته‌ای [illegible]

الف) روش اول:



مفروضات:

۱- برابر بودن جریان در هادی‌های باندل

۲- صرف نظر کردن از فاصله باندل‌ها نسبت به فاصله فازها

بنابراین ~~[illegible]~~ باندل‌ها تنها روی اندوکتانس‌های خودی تأثیر می‌گذارد

$$GMR_b = \sqrt[b]{k_b \cdot d^{b-1} \cdot GMR}$$

تعداد باندل‌های موجود در هر فاز

برای دو باندل و سه باندل: $k=1$

سؤال: برای چهار باندل به دست آورید؟

با در حالت رشته‌ای برای سه رشته یک فاز نوشته، جریان هر رشته $\frac{I_A}{3}$ بوده و از ترکیب ~~[illegible]~~ $\ln$ ها رابطه به دست می‌آید

$$\varphi_{t_1} = \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{GMR}\right) I_1 + \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{d}\right) I_2 + \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{d}\right) I_3$$

$$+ \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt{2}d}\right) I_4 + \cdots ; \quad I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \frac{I_A}{4}$$ [illegible]

$$\Rightarrow \varphi_{t_1} = I_A \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{\sqrt[4]{\sqrt{2}\, d^3\, GMR}} + \cdots \Rightarrow k_4 = \sqrt{2}$$

ب) روش دوم:

مفروضات: برابر بودن جریان‌ها - یک فرض کمتر دارد -

~~[illegible]~~

- در روش اول ماتریس $L_{3\times3}$ تشکیل شده داریم:

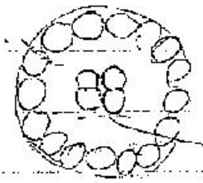
$$L_{mm} = L_{self\,m} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{GMR_0}$$

$$L_{mk} = L_{mutual\,mk} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{mk}}$$

- اما در روش دوم ماتریس $L_{9\times9}$ داریم: $[\vec{\Delta V_L}]_{n\times1} = j\omega [L]_{n\times n} [\vec{I}]_{n\times1}$

جلسه سوم : ۸۶/۷/۱۴

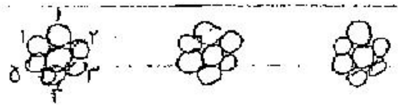
رشته‌ای بودن هادی‌ها :



مفروضات :

۱. صفر بودن جریان عبوری از سیم‌های [illegible]

۲. صرف نظر کردن از تأثیر رشته‌ای بودن هادی‌ها در محاسبه اندوکتانس متقابل



$$\psi_{t_1} = \left[\left(\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{1}{e^{-\frac{1}{4}}r_1}\right)I_1 + \frac{\mu_0}{2\pi}\sum_{j=2}^{6} I_j \ln\frac{1}{d_{j1}} + \frac{\mu_0}{2\pi} I_B \ln\frac{1}{D_{AB}}\right.$$
$$+ \frac{\mu_0}{2\pi} I_C \ln\frac{1}{D_{AC}}$$

رشته‌ای بودن در اندوکتانس‌های متقابل تأثیری ندارد و فقط در اندوکتانس‌های خودی تأثیر می‌گذارد (عناصر روی قطر اصلی)

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = I_5 = I_6 = \frac{I_A}{6}$$

$$\psi_{t_1} = \frac{\mu_0}{2\pi}\left[\ln\frac{1}{e^{-\frac{1}{4}}r_1} + \sum_{j=2}^{6}\ln\frac{1}{d_{j1}}\right]\frac{I_A}{6} + \frac{\mu_0}{2\pi} I_B \ln\frac{1}{D_{AB}} + \frac{\mu_0}{2\pi} I_C \ln\frac{1}{D_{AC}}$$

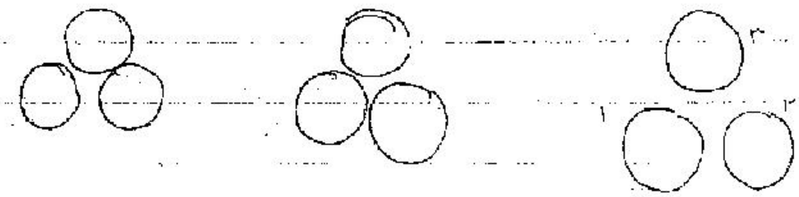
$$\psi_{tA} = I_A\left[\frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{1}{\underbrace{\sqrt[6]{e^{-\frac{1}{4}}r_1 d_{12} d_{13} d_{14} d_{15} d_{16}}}_{\hookrightarrow\ GMR}}\right] + \cdots$$

ما از بین [illegible] سیم‌های حاوی شماره ۱ یکی ۶ است

$$GMR = \left(e^{-\frac{1}{4}}\prod_{k=1}^{n} d_{1k}\right)^{\frac{1}{n}} \qquad \Delta V_{LA} = j\omega\left\{ \quad \downarrow \quad \right\}$$

باندل بودن هادی‌ها :

$L_{9\times9} \rightarrow L_{3\times3}$



تأثیر رشته‌ای بودن، داخل GMR رفت و از این پس در محاسبات رشته‌ای بودن در نظر گرفته نمی‌شود.

EMTP → نرم افزار کاربردی

مروری - [illegible]

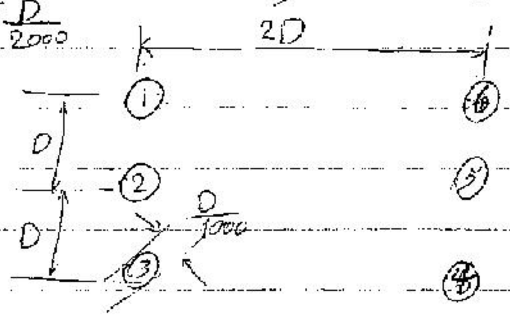
$$L_{self\,m} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{GMR_m} \quad H/m$$

$$L_{mutual\,m,k} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{D_{km}} = L_{mutual\,k,m} \quad H/m$$

- مثال: محاسبه کنید

$$L_{33} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{e^{-\frac{1}{4}} \frac{D}{2000}}$$

$L_{41} =$



$$L_{41} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{1}{2D\sqrt{2}}$$

روابط ماتریسی :

$$[\varphi]_{n\times1} = [L]_{n\times n} [I]_{n\times1}$$

ماتریس L قرینه است، بنابراین کافی است قطر و مثلث بالا را محاسبه کنیم.

$$\boxed{[\Delta \vec{V_L}]_{n\times1} = j\omega \cdot [L]_{n\times n} \cdot [\vec{I}]_{n\times1}}$$

$$[L]_{n\times n} \Rightarrow \begin{matrix} L_{mm} = L_{self\,m} \\ L_{mk} = L_{mutual\,m,k} \end{matrix}$$

- تمام روابط فوق برای فرکانس‌های پایین است

در فرکانس‌های بالا اثر پوستی را نیز باید در نظر بگیریم

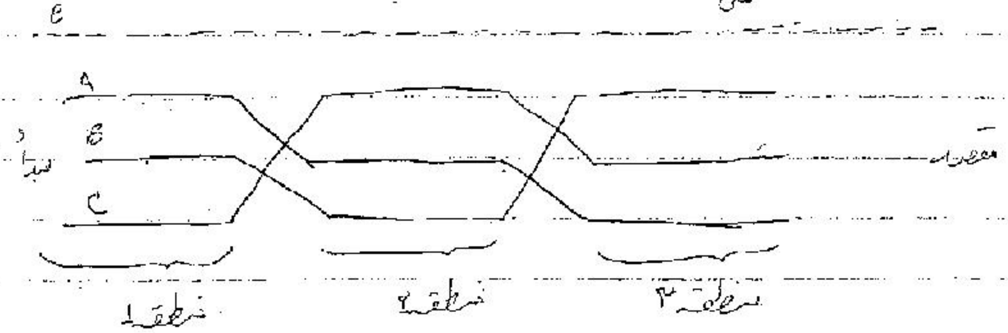
- اثر زمین را نیز باید در نظر بگیریم

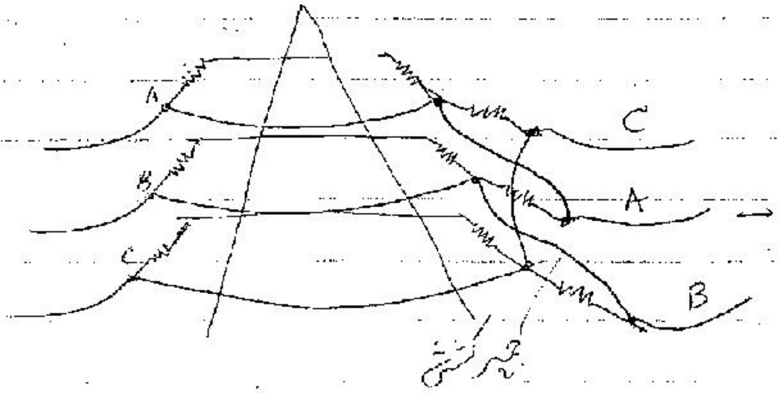
- ضمناً تمام روابط فوق در واحد طول است

جلسه چهارم ۸۰/۷/۱۸

جابجایی (ترانسپوزه کردن) فازها

هدف: تحقق ~~[illegible]~~ تحمیل استقلال اندوکتانس هر فاز از جریان فازهای دیگر





هر ۲۵ کیلومتر تا هر ۱۰۰ کیلومتر استفاده می‌شود.

$$\Delta \vec{V}_{LA} = j\omega \left[L_{AA}\bar{I}_A + L_{AB}\bar{I}_B + L_{AC}\bar{I}_C \right]$$

$$\Delta \vec{V}_{LA} = j\omega \underbrace{\left[L_{AA} + L_{AB}\frac{\bar{I}_B}{\bar{I}_A} + L_{AC}\frac{\bar{I}_C}{\bar{I}_A} \right]}_{\text{اندوکتانس فاز A}} \bar{I}_A$$

← if $L_{AB} = L_{AC} = L_{BC} = M$ ← تقارن فیزیکی

$$\Delta \vec{V}_{LA} = j\omega \left[L_{selfA} + M\frac{I_B + I_C}{I_A} \right] \bar{I}_A$$

← if $I_A + I_B + I_C = 0$ → تقارن بار

$$\Delta \vec{V}_{LA} = j\omega \left[L_{selfA} - M \right] I_A$$

[illegible] تا منطقه به طور کلی به نظر می‌رسد که A و B و C از نظر فیزیکی در وضعیت مشابهی هستند.

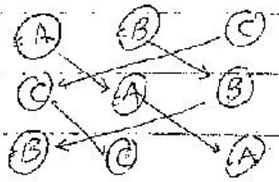
(الف) مدل استاندارد

برای طول سه منطقه

$$L = \frac{1}{3}\left[L_{I} + L_{II} + L_{III}\right] = \begin{bmatrix} L_{self} & \boxed{M} & M & M_e \\ M & L_{self} & M & M_e \\ M & M & L_{self} & M_e \\ M_e & M_e & M_e & L_{self} \end{bmatrix}$$

$$M = \frac{L}{3}\left[M_{AB_{I}} + M_{AB_{II}} + M_{AB_{III}}\right]$$

$$= \frac{1}{3}\left[M_{AB_{I}} + M_{BC_{I}} + M_{CA_{I}}\right]$$



l: جای Ae در منطقه I = جای A و B در منطقه III

$$M_e = \frac{1}{3}\left[M_{Ae_{I}} + M_{Ae_{II}} + M_{Ae_{III}}\right]$$

$$= \frac{1}{3}\left[M_{Ae_{I}} + M_{Be_{I}} + M_{Ce_{I}}\right]$$

به جای محاسبه سه منطقه، عناصر ماتریس در یک منطقه را محاسبه کرده و با هم جمع می‌کنیم
غیر تکراری

سیم محافظ (زمین):

مفروضات: صفر بودن اختلاف پتانسیل (در واحد طول) بر روی سیم محافظ.

مهمترین حالت، وجود دو سیم زمین را در نظر می‌گیریم.

$$\begin{bmatrix} \Delta\vec{V}_{ABC} \\ \hline \Delta\vec{V}_{e_1} \\ \Delta\vec{V}_{e_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} = j\omega \left[\begin{array}{c|cc} L_{ABCABC} & L_{ABCe_1} & L_{ABCe_2} \\ \hline L_{e_1ABC} & L_{e_1e_1} & L_{e_1e_2} \\ L_{e_2ABC} & L_{e_1e_2} & L_{e_2e_2} \end{array}\right] \begin{bmatrix} \vec{I}_{ABC} \\ \hline \vec{I}_{e_1} \\ \vec{I}_{e_2} \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \Delta\vec{V}_{ABC} \\ \hline I_{e_1} \\ I_{e_2} \end{bmatrix} = j\omega \left[\begin{array}{c|c} L^{(n)}_{ABCABC} & \\ \hline & \end{array}\right] \begin{bmatrix} \vec{ABC} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$L^{(n)}_{ABCABC} = L_{ABCABC} - \begin{bmatrix} L_{ABCe_1} & L_{ABCe_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_{e_1e_1} & L_{e_1e_2} \\ L_{e_2e_1} & L_{e_2e_2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} L_{e_1ABC} \\ L_{e_2ABC} \end{bmatrix}$$

الگوریتم روش :

الف) تشکیل ماتریس L

$$L_{new} = \left[\begin{array}{c|c} L_{ABCABC} & L_{ABCe} \\ \hline L_{eABC} & L_{ee} \end{array}\right]$$

ب) اجرای روش حذف کرون برای سطر و ستون مربوط به e

$$L_{ij}^{(new)} = L_{ij} - \frac{L_{ie}L_{ej}}{L_{ee}} \qquad i,j \neq e$$

اگر دو سیم گارد وجود داشت تمام عملیات بند ب یکبار دیگر تکرار می‌شود

$L_{mm} = L_{self\ m}$

$L_{mk} = L_{mutual\ m,k}$

تک رشته‌ای : $GMR = e^{-\frac{1}{4}} r$

رشته‌ای بودن : GMR ⟵ تک رشته‌ای معادل $^{(3b+e)\times(3b+e)}$

باندل بودن : GMR, L_{mutual} ⟵ خط یک باندل و تک رشته‌ای معادل

$(3+e)\times(3+e)$

ترانسپوزه : L_{mutual} ⟵ خط یک باندل تک رشته‌ای بدون ترانسپوز متساوی الاضلاع معادل

اثر حضور سیم زمین : L_{self}, L_{mutual} ⟵ " " " " معادل بدون سیم زمین

معادلات مداری :

(جدول) مقاومت مربوط به هادی ها

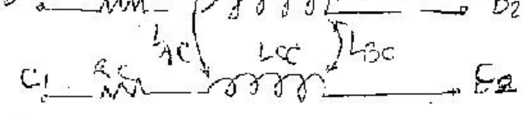
$$[\Delta\vec{V}]_{ABC} = \left\{ [R]_{ABC} - j\omega [L]_{ABC} \right\} \cdot [\vec{I}]_{ABC}$$

$$[R]_{ABC} = \mathrm{diag}[R_A \quad R_B \quad R_C]$$

$$[\Delta\vec{V}]_{ABC} = [Z]_{ABC} [\vec{I}]_{ABC}$$

ماتریس امپدانس سری خط انتقال در واحد طول =

مدار معادل مداری (فاز مستقل)



شبکه‌های توالی :

هدف : تبدیل معادلات از قالب ماتریسی به سه رابطه معمولی

$$[\Delta V]_{ABC} = [Z]_{ABC} [\bar{I}]_{ABC}$$

انتقال از حوزه فاز به شبکه‌های توالی صفر، مثبت و منفی

$$[\Delta \vec{V}]_{ABC} = T [\Delta \vec{V}]_{012}$$

$$[\bar{I}]_{ABC} = T [\bar{I}]_{012} \qquad T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \qquad a = e^{\frac{j2\pi}{3}}$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}$$

T = ماتریسی که ستون اول المان‌ها برابر و ستون دوم و سوم مجموع المان‌ها صفر باشد و وارون پذیر باشد.

$$[\Delta \vec{V}]_{012} = \overbrace{[T]^{-1} [\vec{Z}]_{ABC} [T]}^{Z_{012}} [I]_{012}$$

بدین ترتیب ΔV_1 فقط به I_1 بستگی دارد

$$Z_{ABC} = \begin{bmatrix} Z_s & Z_m & Z_m \\ Z_m & Z_s & Z_m \\ Z_m & Z_m & Z_s \end{bmatrix}$$ تقارن فیزیکی خط

$$[Z]_{012} = \mathrm{diag}[Z_0, Z_1, Z_2]$$

$Z_0 = Z_s + 2Z_m$ امپدانس توالی صفر در واحد طول

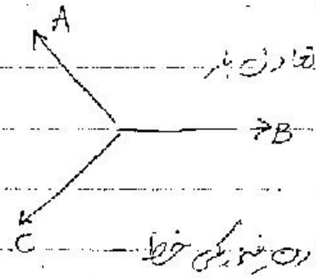
$Z_1 = Z_2 = Z_s - Z_m$ امپدانس توالی مثبت و منفی در واحد طول

معادل مداری (مستقل) :

$$\begin{bmatrix} \Delta \vec{V}_0 \\ \Delta \vec{V}_1 \\ \Delta \vec{V}_2 \end{bmatrix} = T^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_A \\ \Delta \bar{V}_B \\ \Delta \bar{V}_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} \Delta \bar{V}_A + \Delta \bar{V}_B + \Delta \bar{V}_C \\ \Delta \bar{V}_A + a\Delta \bar{V}_B + a^2 \Delta \bar{V}_C \\ \Delta \vec{V}_A + a^2 \Delta \bar{V}_B + a \Delta \vec{V}_C \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\bar I_0\\ \bar I_1\\ \bar I_2\end{bmatrix} = T^{-1}\begin{bmatrix}\bar I_A\\ \bar I_B\\ \bar I_C\end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix}\bar I_A+\bar I_B+\bar I_C\\ \bar I_A+a\bar I_B+a^2\bar I_C\\ \bar I_A+a^2\bar I_B+a\bar I_C\end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta V_0\\ \Delta V_1\\ \Delta V_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ \Delta V_A\\ 0\end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix}\bar I_0\\ \bar I_1\\ \bar I_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}0\\ \bar I_A\\ 0\end{bmatrix}$$



تقارن بار

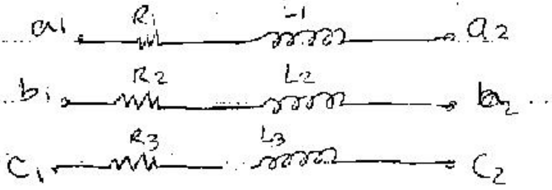
تقارن فیزیکی خط

$$\begin{bmatrix}\Delta \bar V_A\\ \Delta \bar V_B\\ \Delta \bar V_C\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}Z_s & Z_m & Z_m\\ Z_m & Z_s & Z_m\\ Z_m & Z_m & Z_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar I_A\\ \bar I_B\\ \bar I_C\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\frac{Z_0+2Z_1}{3} & \frac{Z_0-Z_1}{3} & \frac{Z_0-Z_1}{3}\\ \frac{Z_0-Z_1}{3} & \frac{Z_0+2Z_1}{3} & \frac{Z_0-Z_1}{3}\\ \frac{Z_0-Z_1}{3} & \frac{Z_0-Z_1}{3} & \frac{Z_0+2Z_1}{3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar I_A\\ \bar I_B\\ \bar I_C\end{bmatrix}$$

به سطر اول و سایر سطور $\frac{Z_0-Z_1}{3}$ اضافه و کم می‌کنیم

$$\begin{bmatrix}\Delta V_A\\ \Delta V_B\\ \Delta V_C\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}Z_1 & 0 & 0 & \frac{Z_0-Z_1}{3}\\ 0 & Z_1 & 0 & \frac{Z_0+Z_1}{3}\\ 0 & 0 & Z_1 & \frac{Z_0-Z_1}{3}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\bar I_A\\ \bar I_B\\ \bar I_C\\ \bar I_A+\bar I_B+\bar I_C\end{bmatrix}$$

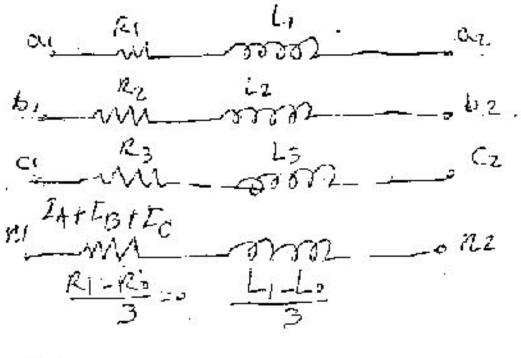
که اگر تقارن بار برقرار باشد این جمله صفر بوده و ستون چهارم بی تأثیر است.



تقارن فیزیکی خط + تقارن بار /
اثر اندوکتانس متقابل درون ها
مستتر شده است.

تقارن فیزیکی خط +
عدم تقارن بار →

- در این حالت از سیم چهارم
استفاده می‌کنیم.



تدریس دکتر [illegible]

جلسه پنجم ← ۸۶/۷/۲۵ :

خطوط دو مداره :

اهداف

افزایش توان قابل انتقال میان مبدا و مقصد (پایداری شبکه) ← مبدا و مقصد یکی است

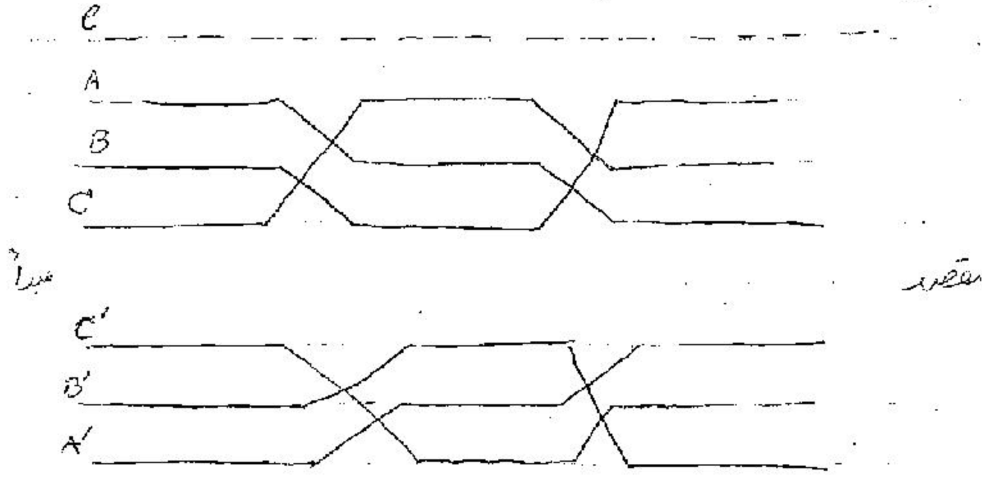
کاهش هزینه با استفاده از دکل دو مداره (دو مدار متفاوت) ← قسمتی از مسیر با هم مشترکند

$$[\Delta\vec{V}]_{ABCA'B'C'} = [Z]_{ABCA'B'C'}\cdot[I]_{ABCA'B'C'} \qquad T' = \left[\begin{array}{c|c} T & 0 \\ \hline 0 & T \end{array}\right]$$

$$[\Delta\vec{V}]_{0120'1'2'} = \overbrace{[T']^{-1}\cdot[Z]_{ABCA'B'C'}\cdot[T']}^{[Z]_{0120'1'2'}}\,[I]_{0120'1'2'}$$

ترانسپوزه کردن خطوط دو مداره با این هدف است که Z به دست آمده از ضرب $[T']^{-1}$ و T' در آن ماتریس قطری حاصل شود.

جابجایی فازها در دو مداره به روش سه منطقه ای :



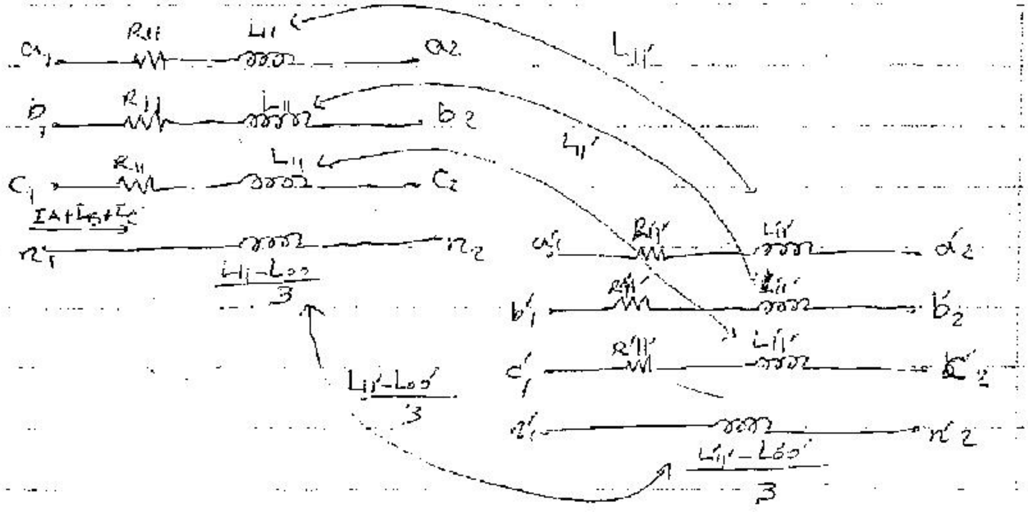
L را برای سه منطقه می نویسیم ($L_{6\times6}$) و با هم جمع می کنیم

$$Z_{ABCA'B'C'}=\left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_s & Z_m & Z_m & Z_{ss'} & Z_{mm'} & Z_{mm'} \\ Z_m & Z_s & Z_m & Z_{mm'} & Z_{ss'} & Z_{mm'} \\ Z_m & Z_m & Z_s & Z_{mm'} & Z_{mm'} & Z_{ss'} \\ \hline Z_{ss'} & Z_{mm'} & & Z'_s & Z'_m & Z'_m \\ & & & Z'_m & Z'_s & Z'_m \\ & & & Z'_m & Z'_m & Z'_s \end{array}\right]$$

پس از ضرب T' و $[T]'$ داریم :

$$Z_{012\,0'1'2'}=\left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_{00} & & & Z_{00'} & & \\ & Z_{11} & & & Z_{11'} & \\ & & Z_{22} & & & Z_{22'} \\ \hline Z_{0'0} & & & Z_{0'0'} & & \\ & Z_{1'1} & & & Z_{1'1'} & \\ & & Z_{2'2} & & & Z_{2'2'} \end{array}\right]$$

همان عملیاتی را که در خط تک مداره اجرا کردیم، یک مقدار اضافه و کم می کنیم، ماتریس ها ۴ ستونه می شود، از ماتریس بدست آمده شکل زیر حاصل می شود.



a_1
R_{11}
L_{11}
a_2
$L_{11'}$
b_1
R_{11}
L_{11}
b_2
$L_{11'}$
c_1
R_{11}
L_{11}
c_2
$I_A+I_B+I_C$
n_1
n_2
$\frac{L_{11}-L_{00}}{3}$
$\frac{L_{11'}-L_{00'}}{3}$
a'_1
$R_{11'}$
$L_{11'}$
a'_2
b'_1
R'_{11}
$L_{11'}$
b'_2
c'_1
R'_{11}
$L_{11'}$
c'_2
n'_1
n'_2
$\frac{L_{11'}-L_{00'}}{3}$

اگر خطوط موازی متقارن نباشند، روش سه مؤلفه ای استقلال اینها را از جریان سایر فازها تأمین نمی کند (در صورت [illegible] بودن)

اگر سیستم متقارن باشد $\boxed{I_A = I_{A'}}$

$$V_1 - V_p = \sum_{j=1}^{n} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{D_{j1}} + \underbrace{\sum_{j=1}^{n} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln D_{jp}}$$

$$\sum_{j=1}^{n-1} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln D_{jp} + \sum_{j=1}^{n-1} -\frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln D_{np} \leftarrow \quad \rightarrow \sum_{j=1}^{n-1} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln D_{jp} + \frac{q_n}{2\pi\varepsilon_0} \ln D_{np}$$

$$, \sum q_n = 0 \Rightarrow q_n = -(q_1 + q_2 + \dots + q_{n-1})$$

$$V_1 - V_p = \sum_{j=1}^{n} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{D_{j1}} + \sum_{j=1}^{n-1} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{D_{jp}}{D_{np}} \quad 0 \quad P \to \infty$$

$$V_1 = \sum_{j=1}^{n} \frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{D_{j1}}$$ پتانسیل هادی ۱

روابط ماتریسی:

$$[V]_{n\times 1} = \underbrace{[P]_{n\times n}} \cdot [q]_{n\times 1}$$ ماتریس پتانسیل

$$P_{mm} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{r_m}$$ هادی تک رشته‌ای

$$P_{mk} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{D_{mk}} = P_{km}$$

رشته‌ای بودن هادی‌ها:

(لایه‌ها)
صرفاً فقط رشته‌های لایه آخر مهم است، چون بار روی آن‌ها قرار می‌گیرد
(حتی لایه‌های آلومینیومی، لایه داخل)

$$GMR_c = \prod_{k=1}^{n_{ext}} (d_{1k})^{\frac{1}{n_{ext}}}$$ خارجی

$$P_{mm} = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0} \ln\frac{1}{GMR_c}$$

۱ـ باندل بودن هادی‌ها:

صرف‌نظر کردن از تداخل
بارها را برابر در نظر می‌گیریم، درحالی که پتانسیل‌ها برابرند

۱ـ روش ۱ـ $GMR_{cb} = \sqrt[b]{k_b \cdot d^{b-1} \cdot GMR_c}$

(بارها را برابر در نظر نگرفت)

۲ـ روش ۲ـ $P_{ABC} = k \cdot P_{n\times n} \cdot k^T$

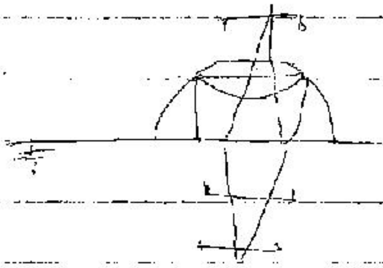
۳ـ روش ۳: اجرای الگوریتم برروی ماتریس P

تأثیر زمین

- زمین به عنوان یک سطح هم‌پتانسیل در پتانسیل مسیر شکل میدان را برهم می‌زند.

- بنابراین باید تغییر شکل میدان لحاظ شود، زیرا شکل میدان در ظرفیت حاصل از آن تأثیر دارد.

- با اضافه کردن هادی‌های مجازی مشکلمان را در مورد تأثیر زمین بر هادی‌های خطوط انتقال برطرف می‌کنیم.



بنابراین ماتریس ما 2n در 2n خواهد شد.

(هادی‌های مجازی قرینه‌های هادی‌های اولیه‌اند)

$$[V]_{2n\times1}=[P]_{2n\times2n}\cdot[q]_{2n\times1}$$

$$\left[\begin{array}{c}V\\ \hline V'\end{array}\right]_{2n\times1}=\left[\begin{array}{c|c}P_1&P_2\\ \hline P_3&P_4\end{array}\right]_{2n\times2n}\cdot\left[\begin{array}{c}q\\ \hline -q\end{array}\right]_{2n\times1}\ ;\ [V]_{n\times1}=[P_1-P_2]_{n\times n}\cdot[q]_{n\times1}$$

$$P_{mm}=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\left(\ln\frac{1}{GMR_{cm}}-\underbrace{\ln\frac{1}{2h_m}}_{}\right)\overset{\text{تأثیر هادی‌های مجازی زمین}}{=}\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{2h_m}{GMR_{cm}}$$

$$P_{mk}=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\left(\ln\frac{1}{D_{mk}}-\ln\frac{1}{D_{mk'}}\right)=\frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_{mk'}}{D_{mk}}=P_{km}$$

$$\text{تأثیر زمین}\ P=\overset{\text{بدون تأثیر}}{P_1}-\overset{\text{بدون تأثیر}}{P_2}\Rightarrow\begin{cases}P_{mm}^{(n)}=P_{mm}^{(0)}-P_{mm'}^{(0)}\\ P_{mk}^{(n)}=P_{mk}^{(0)}-P_{mk'}^{(0)}\end{cases}$$

جابه‌جایی (ترانسپوزه کردن) فازها

الف) سیم استاندارد:

$$\overset{\text{برای طول سه مقطعه}}{l}$$

$$P=\frac{1}{3}\left[P_{I}+P_{II}+P_{III}\right]=\begin{bmatrix}P_s&P_c&P_c&P_{ce}\\P_c&P_s&P_c&P_{ce}\\P_c&P_c&P_s&P_{ce}\\P_{ce}&P_{ce}&P_{ce}&P_{se}\end{bmatrix}$$

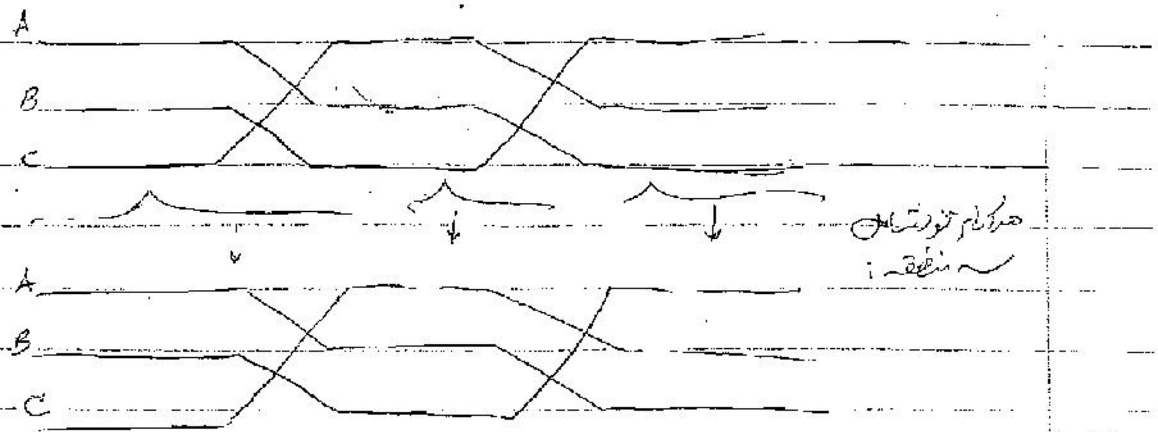
$$P_c=\frac{1}{3}\left[P_{CAB_I}+P_{CAB_{II}}+P_{CAB_{III}}\right]=\frac{1}{3}\left[P_{CAB_I}+P_{CBC_I}+P_{CCA_I}\right]$$

$$P_{ce}=\frac{1}{3}\left[P_{CAe_I}+P_{CAe_{II}}+P_{CAe_{III}}\right]=\frac{1}{3}\left[P_{CAeI}+P_{CBe_I}+P_{CCeI}\right]$$

- بنابراین کافی است ماتریس یک مقطع را نوشته و از روی آن ماتریس P را به دست آورد

۱ـ بررسی خطوط دو مداره   ص ۳۳

روش ۹ مقطعی؟

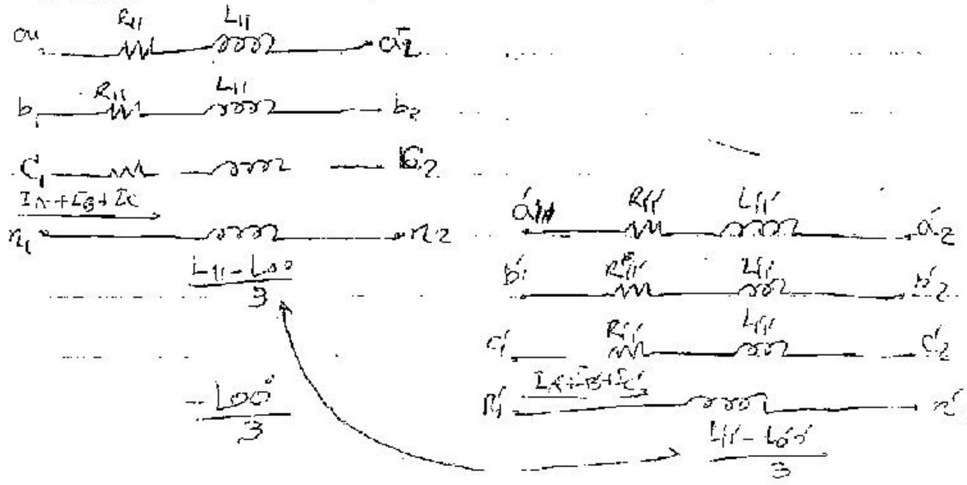


هرکدام ترانسپوز شده‌اند

منقطع؛

$$Z_{ABCA'B'C'} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_s & Z_m & Z_m & Z_{mm'} & Z_{mm'} & Z_{mm'} \\ & & & Z_{mm'} & Z_{mm'} & Z_{mm'} \\ & & & Z_{mm'} & Z_{mm'} & Z_{mm'} \\ \hline & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \end{array}\right]$$

$$Z_{012 0'1'2'} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} Z_{00} & & & Z_{00'} & & \\ & Z_{11} & & & & \\ & & Z_{22} & & & \\ \hline Z_{0'0} & & & Z_{0'0'} & & \\ & & & & Z_{1'1'} & \\ & & & & & Z_{2'2'} \end{array}\right]$$


a_1
R_{11}
L_{11}
a_2
b_1
R_{11}
L_{11}
b_2
C_1
C_2
$I_A+I_B+I_C$
n_1
n_2
$\frac{L_{11}-L_{00}}{3}$
a'_1
$R_{11'}$
$L_{11'}$
a'_2
b'_1
$R_{11'}$
$L_{11'}$
b'_2
c'_1
$R_{11'}$
$L_{11'}$
c'_2
$I_{A'}+I_{B'}+I_{C'}$
n'_1
n'_2
$\frac{L_{11'}-L_{00'}}{3}$
$-\frac{L_{00'}}{3}$

اندوکتانس هر فاز را، ماتریسی است که ΔV هر فاز را به I کل فاز مربوط می‌کند.

ظرفیت خازنی خطوط انتقال هوایی :

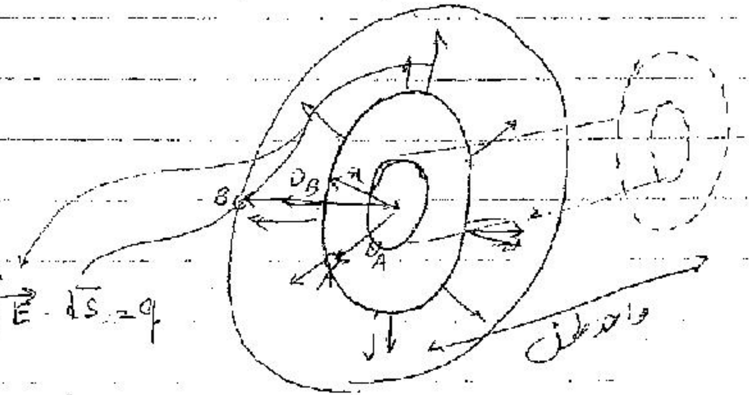
مفروضات :

الف) مستقیم و بی‌نهایت بودن طول هادی‌ها — بارهای الکتریکی در سطح بیرونی هادی قرار می‌گیرند.

ب) بسیار کوچک بودن شعاع هادی‌ها نسبت به فواصل بین آنها

ج) دایره بودن سطح مقطع‌ها

د) صفر بودن مجموع بارهای الکتریکی قرار گرفته روی سطح هادی‌ها



$$\varepsilon_0 \oint \vec{E}\cdot\vec{dS} = q$$

$$\varepsilon_0 E_n \int ds = q \Rightarrow E_n = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0 r}$$

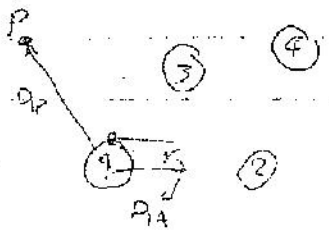
$$V_A - V_B = \frac{W_{AB}}{q_0} = -\int_B^A \vec{E}\cdot\vec{dl} = -\int_{D_B}^{D_A} E_n \cdot dr = \frac{q}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_B}{D_A}$$

اگر از A تا B حرکت کنیم

اگر در روی دایره حرکت کنیم $E \perp dl$ همواره است، حاصل صفر.

- اگر A روی سطح هادی و B در بی‌نهایت باشد، پتانسیل هادی بدست می‌آید.

ما معمولاً بیش از یک هادی داریم:



$$(V_A - V_P)_1 = \frac{q_1}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_{1P}}{D_{1A}}$$

$$(V_A - V_P)_2 = \frac{q_2}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_{2P}}{D_{21}}$$

$$V_1 - V_P = \sum_{j=1}^{n}\frac{q_j}{2\pi\varepsilon_0}\ln\frac{D_{jP}}{D_{j1}}$$

ص ۲۷

بررسی دیگر تهیه تانش

سیم محافظ (زمین):

مفروضات: صفر بودن پتانسیل سیم محافظ

الف) تشکیل ماتریس P

$$P_{nn} = \left[\begin{array}{c|c} P_{ABC\,ABC} & P_{ABC\,e} \\ \hline P_{ABC\,e} & P_{ee} \end{array}\right]$$

ب) اجرای روش حذف کردن برای سطر و ستون مربوط به e

$$P_{ij}^{n} = P_{ij} - \frac{P_{ie}P_{ej}}{P_{ee}} \quad i,j \neq e$$

اگر دو سیم محافظ وجود داشته باشند عملیات فوق باید یکبار دیگر تکرار شود

$$\begin{bmatrix} v_A \\ v_B \\ v_C \\ \boxed{q_e} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & \\ & & & \\ & & & \\ & & & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_A \\ q_B \\ q_C \\ 0 \end{bmatrix}$$

روش حذف کردن جای دو درایه مشخص شده را باهم عوض می کند

درصورتی می توان از کرون استفاده کرد که عنصر فوق صفر باشد.

روابط ماتریسی خط تک مداره:

$$[V]_{ABC} = [P]_{ABC} \cdot [q]_{ABC}$$

$$[C]_{ABC} = [P]^{-1}_{ABC}$$

$$[q]_{ABC} = [C]_{ABC} [V]_{ABC}$$

$$[\vec{I}]_{ABC} = [Y]_{ABC} [\vec{V}]_{ABC}$$

$[Y]_{ABC} \rightarrow j\omega[C]_{ABC}$

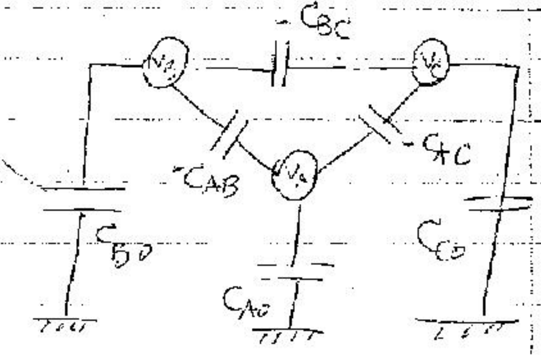
ماتریس ادمیتانس موازی خط انتقال در واحد طول

معادل مداری:

$$q_A = C_{AA}V_A + C_{AB}V_B + C_{AC}V_C$$

$$= (C_{AA} + C_{AB} + C_{AC})V_A - C_{AB}(V_A - V_B) - C_{AC}(V_A - V_C)$$

$$q_A = C_{A0} V_A - C_{AB}(V_A - V_B) - C_{AC}(V_A - V_C)$$



ظرفیت خازن شبکه‌های توالی :

$$[q]_{ABC} = [C]_{ABC} \cdot [V]_{ABC} \qquad q_{012} = T^{-1} [C]_{ABC} T \cdot [V]_{012}$$

$$C_{ABC} = \begin{bmatrix} C_{AA} & C_{AB} & C_{AB} \\ C_{AB} & C_{AA} & C_{AB} \\ C_{AB} & C_{AB} & C_{AA} \end{bmatrix} \longleftarrow$$

تقارن فیزیکی خط
(هادی‌ها بر رئوس مثلث متساوی الاضلاع
یا ترانسپوزه شده)

$$[C]_{012} = \mathrm{diag}[C_0, C_1, C_2]$$

$C_0 = C_{AA} + 2C_{AB}$ ظرفیت خازنی توالی صفر در واحد طول

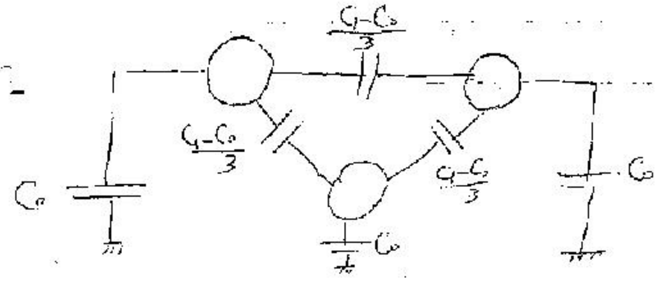
$C_1 = C_2 = C_{AA} - C_{AB}$ ظرفیت خازنی توالی مثبت و منفی در واحد طول

- هرگاه تقارن داشته باشد، ماتریس قطری است.
- هرگاه تقارن داشته باشد، پارامترهایی که با اندیس صفر نمایش داده می‌شوند تأثیر ندارد.
- بررسی کنید؟

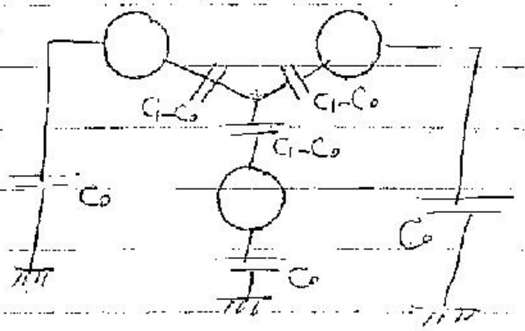
اگر تقارن فیزیکی و تعادل بار برقرار باشد، در معادل مداری خط انتقال شبکه ما سیم گارد تأثیر ندارد (0 = جریان سیم گارد = صفر بار سیم گارد.)

- سیم گارد، در عناصر با اندیس 1 تأثیر ندارد (هرچند در روش گرفتن ابعاد بر روی همه عناصر تأثیر می‌گذارد)

- تقارن فیزیکی خط، عدم تعادل بار

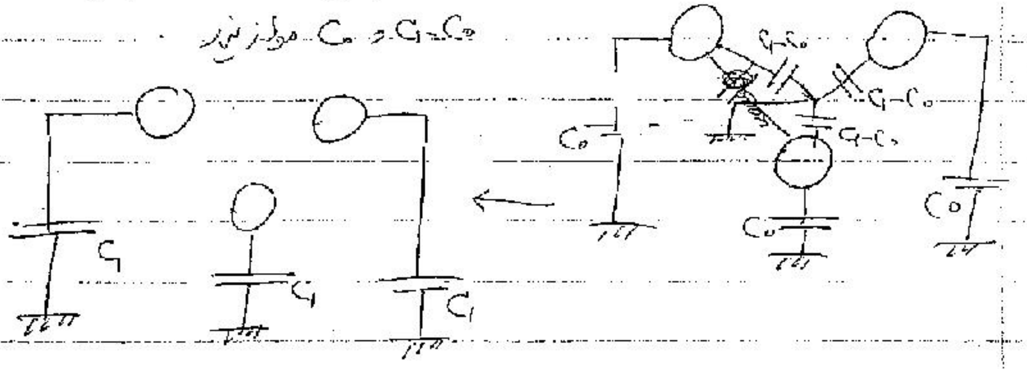


- تقارن فیزیکی خط عدم تعادل بار


C_1-C_0
C_1-C_0
C_1-C_0
C_0
C_0
C_0

- تقارن فیزیکی خط ، تعادل بار

C_1-C_0 و C_0 موازی‌اند


C_1-C_0
C_1-C_0
C_1-C_0
C_0
C_0
C_0
C_1
C_1
C_1

جابه‌جایی فازها - ۲ مداره - روش ۳ منطقه‌ای :

$$C_{ABCA'B'C'} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} C_{AA} & C_{AB} & C_{AB} & C_{AA'} & C_{AB'} & C_{AB'} \\ C_{AB} & & & C_{AB'} & & \\ C_{AB} & & & C_{AB'} & & \\ \hline C_{AA'} & C_{AB'} & C_{AB'} & C_{A'A'} & C_{A'B'} & C_{A'B'} \\ C_{AB'} & & & C_{A'B'} & & \\ C_{AB'} & & & C_{A'B'} & & \end{array}\right]$$

- اگر کوپلاژ خارجی نداشته باشیم ، C_0 و C_2 صفر می‌شوند .
هرچه از هم فازها دورتر باشند ، مقدار C_0 و C_2 ضعیف‌تر می‌شوند .

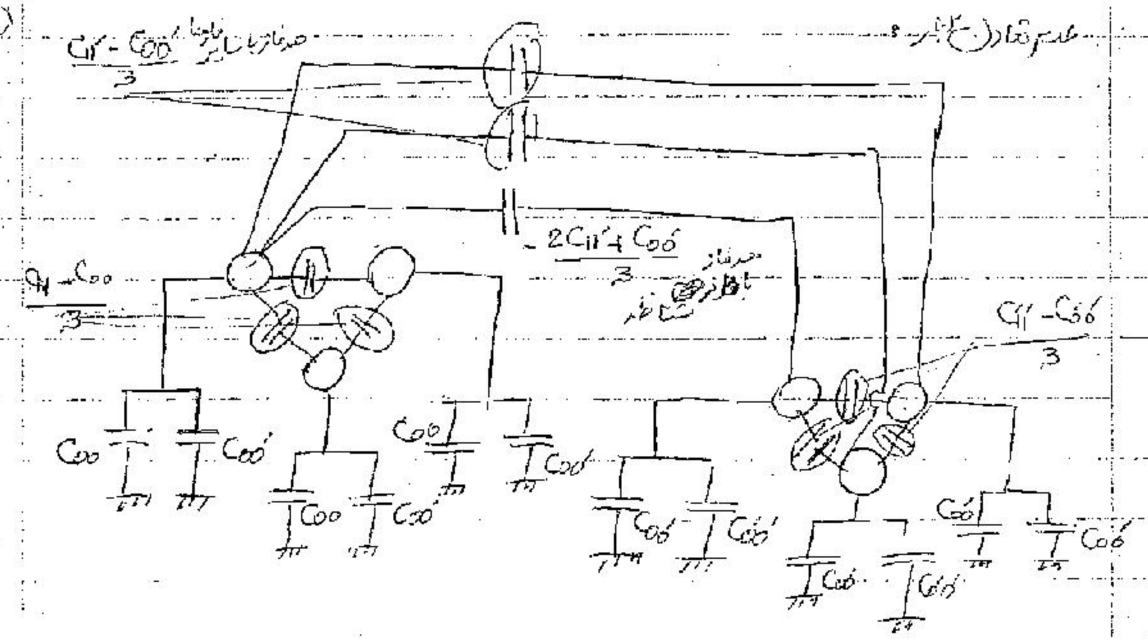
$$C_{0120'1'2'} = \left[\begin{array}{ccc|ccc} C_{00} & & & C_{00'} & & \\ & C_{11} & & & C_{1'} & \\ & & C_{22'} & & & C_{22'} \\ \hline C_{00'} & & & C_{0'0'} & & \\ & C_{1'} & & & C_{11'} & \\ & & C_{22'} & & & C_{2'2'} \end{array}\right]$$

$$q_A = C_{AA} V_A + C_{AB} V_B + C_{AB} V_C + C_{AA'} V_{A'} + \cdots$$

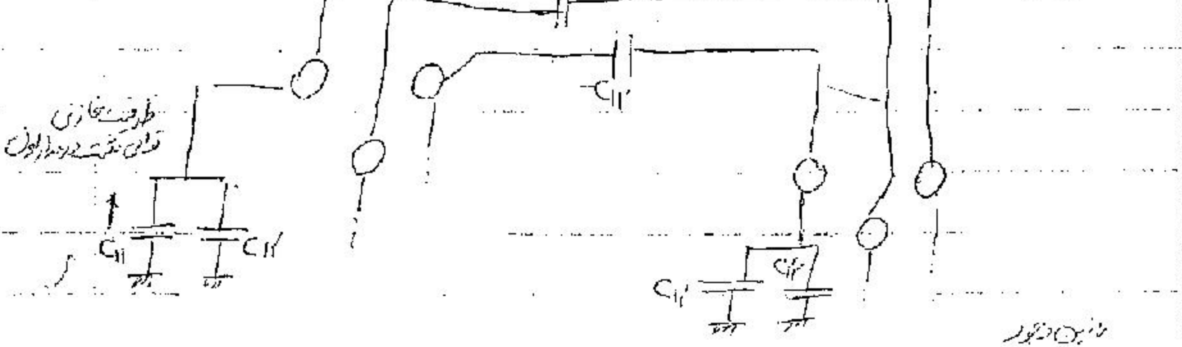
$$q_A = \left[(C_{AA} + C_{AB} + C_{AB}) + (C_{AA'} + C_{AB'} + C_{AB'}) \right] V_A$$

$$- C_{AB}$$

$$q_A =$$


مدار معادل
$\frac{C_{11'} - C_{00'}}{3}$
هر فاز با سایر فازها
$-\frac{2C_{11'} + C_{00'}}{3}$
هر فاز با فاز متناظر
$\frac{C_{11} - C_{00}}{3}$
$\frac{C_{11'} - C_{00'}}{3}$
C_{00}
$C_{00'}$
C_{00}
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$
$C_{00'}$

- برای دو فاز دیگر نیز مانند فاز اول باید خازن‌ها رسم شود.


معادل ها را :
$-C_{11'}$
$-C_{11'}$
$-C_{11'}$
ظرفیت خازنی فاز نسبت به زمین
C_{11}
$C_{11'}$
$C_{11'}$
$C_{11'}$

- تنها بین دو بعد بین هر فاز و فاز متناظرش رابطه وجود دارد.

جابه‌جایی فازها - دو مداره - روش ۹ منطقه‌ای

$$\left[\begin{array}{c|c} P_1 & P_2 \\ \hline P_3 & P_4 \end{array}\right]$$

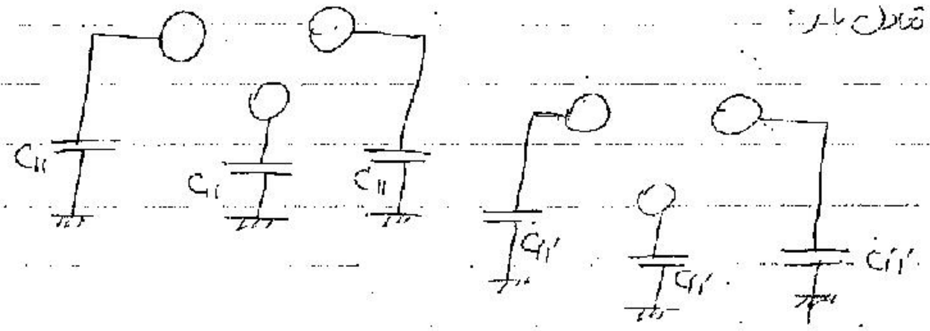
- عناصر P_2 و P_3 کاملاً کم‌اند

$$C_{012\,012'} = \left[\begin{array}{c|c} C_{00}\ C_{11}\ C_{22} & C_{00'} \\ \hline C_{00'} & C_{0'0'}\ C_{11'}\ C_{22'} \end{array}\right]$$

- در حالت عدم تعادل بار:

مشابه سه سیمه است با این تفاوت که مقدار خازن بین دو فاز متناظر با سیم خود و مقدار خازن بین دو فاز غیر یکسان ، تفاوت نمی‌کند : $C = \frac{C_{00}-C_{00'}}{3}$

- تعادل بار:



انحنای سیم:

جایگزینی یک سیم مستقیم معادل به جای سیم دارای انحنا.

مفروضات:

۱) سیم مقاومتی در برابر خمش نشان نمی‌دهد

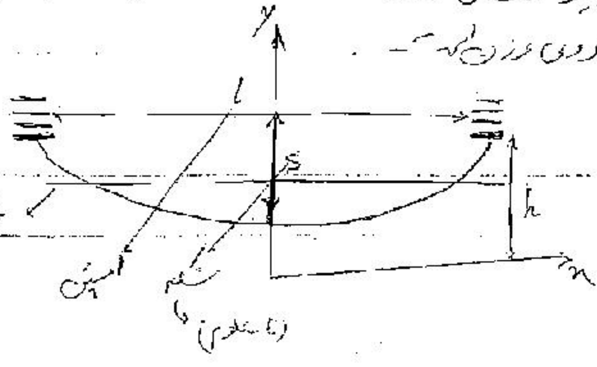
۲) سیم در اثر کشش تغییر طول نمی‌دهد

۳) تنها نیروی وارد بر سیم، نیروی وزن آن است.

- معادله ریاضی سیم منحنی:

$$y = ax^2 + b$$

معادله سیم



$$\begin{cases} x=0 \\ y=h-s \end{cases} \qquad \begin{cases} x=\frac{l}{2} \\ y=h \end{cases}$$

$$\boxed{y = \frac{4s}{l^2}x^2 + (h-s)}$$

$$\int_0^{\frac{l}{2}} y\,dx = h_e\cdot\frac{l}{2} \Rightarrow \boxed{h_e = h - \frac{2}{3}S}$$ ارتفاع معادل

انحنای سیم - شکم سیم

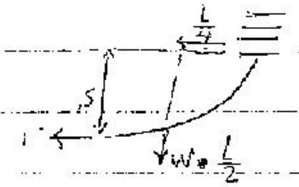
مفروضات :

۱- آویز مقره به صورت عمودی قرار گرفته است

۲- نیروهای وارده بر سیم در نصف اسپن فقط نیروی وزن و نیروی کشش است

$$TS = \left(W\cdot\frac{L}{2}\right)\cdot\frac{L}{4}$$

$$S = \frac{WL^2}{8T}$$



W: نیروی وزن در واحد طول

T: نیروی کشش (برابر با نصف حد نیروی پارگی)

$$h_e = h - \frac{2}{3}\,\frac{WL^2}{8T}$$

- روش طراحی این است که اسپن ها همواره مساوی باشند

اما همیشه ~~[illegible]~~ امکان پذیر نیست

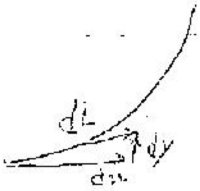
- خط معادل مستقیم ⇐ خط معادل با اسپن های مساوی (منحنی) ⟶ سیم واقعی منحنی

- طول سیم :

مفروضات : $S \ll L$

$$(dL)^2 = (dx)^2 + (dy)^2 \Rightarrow \left(\frac{dL}{dx}\right)^2 = 1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2$$

$$\left(\frac{dL}{dx}\right)^2 = 1 + 4a^2x^2 \underset{a=\frac{4S}{l^2}\ll 1}{\overset{+4a^4x^4}{\simeq}} (1+2a^2x^2)^2$$



$$\frac{dL}{dx} = 1 + 2a^2x^2 \Rightarrow$$

$$L = 2\int_0^{\frac{l}{2}} (1+2a^2x^2)\,dx = 2\left(x + \frac{2}{3}a^2x^3\right)\Big|_0^{\frac{l}{2}}$$

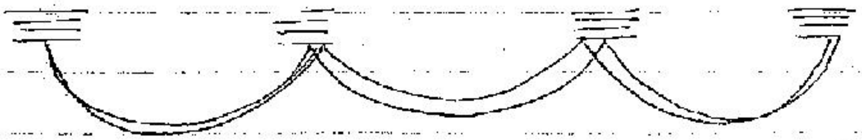
$$\boxed{L = 2\left[\frac{l}{2} + \frac{4S^2}{3l}\right]}$$

اسپن معادل :

مفروضات :

۱. مجموع اسپن‌ها در سیم اصلی و سیم معادل برابر است.

۲. طول سیم در سیم اصلی و سیم معادل برابر است.



مساوی طول کل :

$$nl_e = l_1 + l_2 + \dots + l_n$$

$$n\left(l_e + \frac{8S_e^2}{3l_e}\right) = \left(l_1 + \frac{8S_1^2}{3l_1}\right) + \left(l_2 + \frac{8S_2^2}{3l_2}\right) + \dots + \left(l_n + \frac{8S_n^2}{3l_n}\right)$$

$$n\left(l_e + \frac{w^2l_e^3}{24T^2}\right) = \left(l_1 + \frac{w^2l_1^3}{24T^2}\right) + \left(l_2 + \frac{w^2l_2^3}{24T^2}\right) + \dots + \left(l_n + \frac{w^2l_n^3}{24T^2}\right)$$

$$n(l_e)^3 = (l_1^3) + (l_2^3) + \dots (l_n^3) \Rightarrow \boxed{l_e = \sqrt{\frac{l_1^3 + \dots + l_n^3}{l_1 + \dots + l_n}}}$$

$$h_e = h - \frac{2}{3}\frac{wl_e^2}{8T} \; ; \qquad h_e \leftarrow \text{خط معادل متغیر}$$

$$P_{mn}^{(n)} = P_1^{(0)} - P_2^{(0)} \qquad h_e \leftarrow \text{ز کار است}$$

$$L_{self} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{1}{r_m} + \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{1}{D_{km}}$$

$$L_{mutual\,m,k} = \frac{\mu_0}{2\pi}\ln\frac{1}{D_{km}} = L_{mutual\,k,m}$$

$$\boxed{\begin{aligned} L_{self} &= \mu_0\varepsilon_0 P_{mn} + \Delta L_{self} \\ L_{mutual\,m,k} &= \mu_0\varepsilon_0 P_{mk} = L_{mutual\,k,m} \end{aligned}}$$

$$[L] = \mu_0 \varepsilon_0 [P] + [\Delta L]$$

$$[\Delta L] = \mathrm{diag}[\Delta L_{self_1} \quad \Delta L_{self_2} \quad \cdots \quad \Delta L_{self_n}]$$

- ماتریس ما که از EMPT بدست می‌آید دارای قسمت موهومی است
زیرا ما تلفات زمین را در نظر نمی‌گیریم برخلاف نرم‌افزار

سه‌شنبه ۸۶/۸/۲۲:

مدلسازی خط انتقال:

مفروضات:

1. تقارن هندسی خطوط انتقال (مدل استاندارد)
2. تقارن بار (تقارن ولتاژ و جریان)
3. ثابت ماندن وضعیت شبکه در حالت ماندگار (مصرف‌کننده از مسیر خارج یا به آن اضافه نشود)

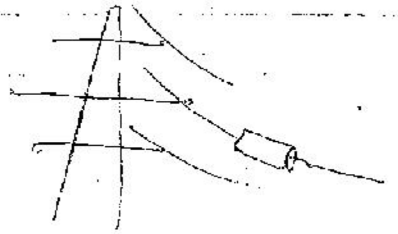
نتیجه:

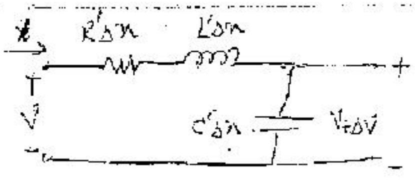
1. انجام محاسبات به صورت تک‌فاز (در یکی از فازها) کافیست
2. پارامترهای محاسبه شده از شبکه توالی مثبت برای مدلسازی کافیست
3. مدلسازی خط برای تحلیل شبکه در حوزه‌ی فازور و هنگام شبکه صورت می‌گیرد

اجزای محاسبه شده برای مدل:

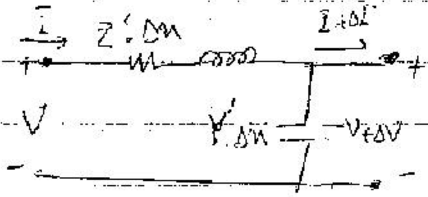
- سلف سری: مدل انرژی ذخیره شده در میدان مغناطیسی اطراف خط: $L_1 = L'$ (H/km)
- خازن موازی: مدل انرژی ذخیره شده در میدان الکتریکی اطراف خط: $C_1 = C'$ (F/km)

- مقاومت سری: مدل تلفات انرژی خط (اثر جریان عبوری) $R_1 = R'$ (Ω/km)
- هدایت موازی: مدل تلفات انرژی خط (اثر کرونا، نشت سطحی و ساز) = 0





بررسی خطوط طولانی



$V-(V+\Delta V)=Z'\Delta x . I$

$\frac{\Delta V}{\Delta x}=-Z'I \longrightarrow \boxed{\frac{dV}{dx}=-Z'I}$

$I-(I+\Delta I)=Y'\Delta x(V+\Delta V) \Rightarrow \frac{\Delta I}{\Delta x}=-Y'V \Rightarrow \boxed{\frac{dI}{dx}=-Y'V}$

$\boxed{\frac{d^2V}{dx^2}=Z'Y'V} \quad \boxed{\frac{d^2I}{dx^2}=Y'Z'I}$

$* V(x)=A_1e^{-\gamma'x}+A_2e^{\gamma'x} \quad , \quad I_x=B_1e^{-\gamma'x}+B_2e^{\gamma'x}$

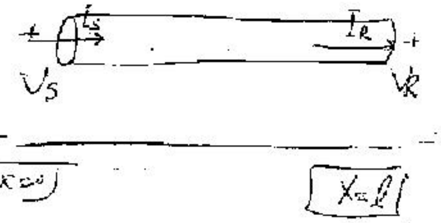
$\boxed{\text{ثابت انتشار}=\gamma'=\sqrt{Z'Y'}}$

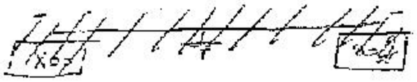
$\frac{dV}{dx}=-\gamma'A_1e^{-\gamma'x}+\gamma'A_2e^{\gamma'x}=-Z'(B_1e^{-\gamma'x}+B_2e^{\gamma'x})$

$$\begin{cases} -\gamma'A_1=-Z'B_1 \\ \gamma'A_2=-Z'B_2 \end{cases}$$

$\boxed{\text{امپدانس مشخصه}:\ Z_C=\sqrt{Z'/Y'}}$

$* I_x=\frac{1}{Z_C}\left[A_1e^{-\gamma'x}-A_2e^{\gamma'x}\right]$





$A=D=\cosh\gamma'l$

$B=Z_C\sinh\gamma'l$

$C=\frac{1}{Z_C}\sinh\gamma'l$

$$\begin{bmatrix}V_S\\I_S\end{bmatrix}=\underbrace{\begin{bmatrix}A&B\\C&D\end{bmatrix}}_{\text{ماتریس انتقال}}\begin{bmatrix}V_R\\I_R\end{bmatrix}\rightarrow \text{نمایش دوقطبی}$$

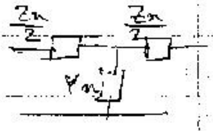
- بنابراین اگر جریان و ولتاژ ابتدا یا انتها را داشته باشیم دیگری را می توان بدست آورد

$j\omega L = X/R > 20$

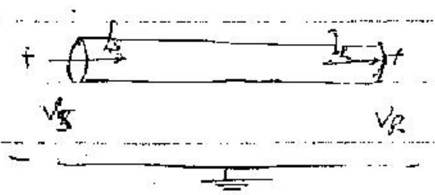
$$\begin{cases} \gamma' = j\omega\sqrt{l'C'} = j\beta' \\ Z_c = \sqrt{\frac{l'}{c'}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \end{cases}$$

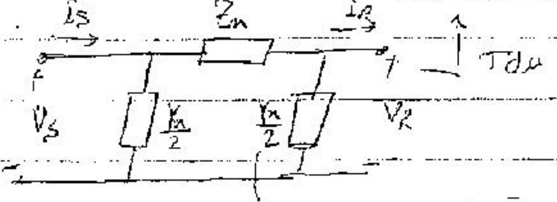
$$R' = 0 \longrightarrow \begin{cases} A = D = \cos\beta' l \\ B = j Z_c \sin\beta' l \\ C = j\frac{1}{Z_c}\sin\beta' l \end{cases}$$

ـ پارامترهای بالا برای خطوط بلند



$\frac{Z_n}{2}$
$\frac{Z_n}{2}$
Y_n





I_S
Z_n
I_R
V_S
$\frac{Y_n}{2}$
$\frac{Y_n}{2}$
V_R
π مدل

تحمیل این شرط به دلیل
همسانی دو دهنه است
(از هر طرف نگاه بکنیم یکسان است)

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

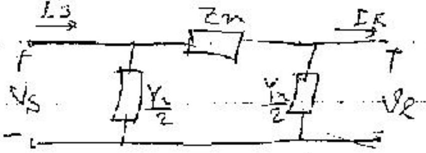
$$V_S = \left(1 + \frac{Z_n Y_n}{2}\right) V_R + Z_n I_R$$
$$I_S = Y_n\left(1 + \frac{Z_n Y_n}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z_n Y_n}{2}\right) I_R$$

$$\boxed{Z_n = B} \quad , \quad \boxed{\frac{Y_n}{2} = \frac{A-1}{B}}$$

در مدل T
همان روابط فوق به دست می‌آید.

$Y_n = C \; ; \; \frac{Z_n}{2} = \frac{A-1}{C}$

مدار معادل گسترده برای خطوط بلند (مدل دقیق):



I_S
Z_n
I_R
V_S
$\frac{Y_n}{2}$
$\frac{Y_n}{2}$
V_R

$$Z_n = Z_c \sinh\gamma' l = Z \frac{\sinh\gamma' l}{\gamma' l}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \longrightarrow \underbrace{l\sqrt{\frac{Z'}{Y'}} \cdot \sqrt{Z'Y'}}_{Z'l = Z} \; \frac{\sinh\gamma' l}{\underbrace{\sqrt{Z'Y'}}_{\gamma'} l}$$

$$\frac{Y_n}{2} = \frac{\cosh\gamma'l - 1}{Z_c \sinh\gamma'l} = \frac{1}{Z_c}\tanh\frac{\gamma'l}{2} = \frac{Y}{2}\,\frac{\tan\frac{\gamma'l}{2}}{\frac{\gamma'l}{2}}$$

مدار معادل خطوط متوسط (مدل تقریبی) :

$$\boxed{\frac{\sinh\gamma'l}{\gamma'l} \simeq 1}$$

$$Z_n = Z_c \sinh\gamma'l = Z\,\frac{\sinh\gamma'l}{\gamma'l}$$

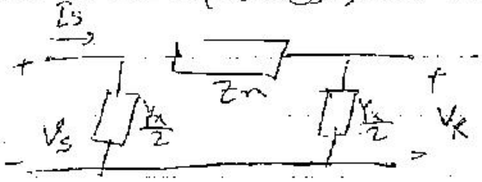
$$\frac{Y_n}{2} = \frac{\cosh\gamma'l - 1}{Z_c \sinh\gamma'l} = \frac{1}{Z}\,\mathrm{tgh}\,\frac{\gamma l}{2} = \frac{Y}{2}\,\frac{\mathrm{tgh}\frac{\gamma l}{2}}{\frac{\gamma l}{2}}$$

$$\boxed{Z_n = Z} \qquad \boxed{\frac{Y_n}{2} = \frac{Y}{2}}$$

مدار معادل خط کوتاه (مدل ساده) :

$Y_n \approx 0$

$Z_n \approx Z$



مفاهیم انتقال توان :

- توان مفید (اکتیو) :

$V(t) = V_m \sin(\omega t + \alpha)$

$i(t) = I_m \sin(\omega t + \beta)$

$$P(t) = V(t)\cdot i(t) = V_m i_m \sin(\omega t + \alpha)\sin(\omega t + \beta)$$

$$= \frac{1}{2} V_m i_m \cos(\alpha - \beta) - \frac{1}{2} V_m i_m \underbrace{\cos(2\omega t + \alpha + \beta)}_{\cos[(2\omega t + 2\beta) + (\alpha - \beta)]}$$

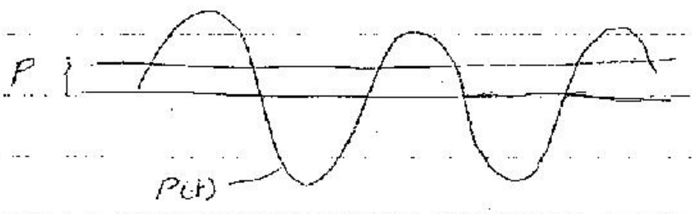
توان لحظه‌ای

$$P(t) = \frac{1}{2} V_m I_m \cos(\alpha - \beta)\left[1 - 2\cos(2\omega t + 2\beta)\right] + \frac{1}{2} V_m i_m \sin(\alpha - \beta)\sin(2\omega t + 2\beta)$$

[illegible]

$$\frac{1}{T}\int_0^T P(t)\,dt = \overline{\tfrac{1}{2}V_m I_m \cos(\alpha-\beta)} = P$$

توان متوسط = توان اکتیو = میانگین توان = توان قابل تبدیل به کار



توان ظاهری:

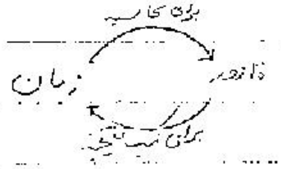
$V(t) = V_m \sin(\omega t+\alpha)$

$I(t) = I_m \sin(\omega t+\beta)$; $\vec{V} = V_{rms}\angle\alpha$, $\vec{I} = I_{rms}\angle\beta$

$$P = Re\left[V_{rms} I_{rms} e^{j(\alpha-\beta)}\right] = Re\left[V_{rms} e^{j\alpha} \cdot I_{rms} e^{-j\beta}\right] = Re\left[\vec{V}\cdot\vec{I}^*\right]$$

$$= Re\left[V_{rms} e^{-j\alpha} \cdot I_{rms} e^{j\beta}\right] = Re\left[\vec{V}^*\cdot\vec{I}\right]$$

$$\vec{S} = \vec{V}\,\vec{I}^* \leftarrow$$ توان ظاهری (طبق قرارداد)



- اگر در هر کدام از قرارداد ها استفاده کنیم به یک نتیجه در دنیای واقعی می‌رسیم (برای شناخت قرارداد ها از فازور یا سلف) [illegible]

توان اکتیو در حوزه فازور: $P = Re[S]$

توان راکتیو:

$$\vec{S} = \vec{V}\cdot\vec{I}^* = P + jQ = V_{rms} I_{rms} \cos(\alpha-\beta) + j V_{rms} I_{rms} \sin(\alpha-\beta)$$

- در فرمول توان لحظه‌ای داشتیم:

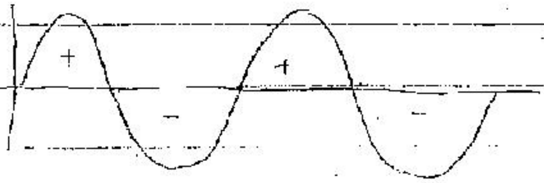
$$P(t) = V_{rms} I_{rms} \cos(\alpha-\beta)\left[1-\cos(2\omega t+2\beta)\right] + V_{rms} I_{rms} \sin(\alpha-\beta)\sin(2\omega t+2\beta)$$

$Q = V_{rms} I_{rms} \sin(\alpha-\beta)$ طبق قرارداد برای بار سلفی $Q>0$ است

(یعنی جهت توان راکتیو از منبع به مصرف‌کننده است)

بررسی ماکزیمم توان منفی

اگر به جمله دوم ضریب $V_{rms}I_{rms}\sin(\alpha\beta)$ دقت کنیم می‌بینیم



در ربع اول توان مثبت و
در ربع دیگر توان منفی می‌گردد و در یک
دوره کامل حاصل صفر است

توان راکتیو Q

۱. بخش موهومی توان ظاهری

۲. یک مقدار توان لحظه‌ای برای مصرف کننده سلفی یا خازنی ...

۳. حاصلضرب مقدار موثر ولتاژ و مقدار موثر مولفه عمود بر ولتاژ از جریان

$$\vec{S} = \vec{V}\,\vec{I}^{*} = \vec{V}(\vec{I_p} - j\vec{I_q})^{*} = VI_p + jVI_q = P + jQ$$

- ما در حالت ماندگار کار می‌کنیم، بنابراین:

بخش حقیقی و موهومی قابل تبدیل به یکدیگر نیستند و مقدارشان ثابت می‌ماند.

- توان راکتیو بخشی از مسیر انتقال را اشغال می‌کند، می‌خواهیم این اشغال بودن مسیر را برطرف کنیم. - - میدان الکتریکی خازن و مغناطیسی سلف با یکدیگر ۱۸۰ درجه اختلاف فاز دارند

- آنچه در منبع تولید می‌شود توان اکتیو است.

$$\alpha = 0 \;,\; \beta = -\varphi$$

$$\underline{P(t)} = P(1 - \cos 2\omega t) - Q\sin 2\omega t$$

توان تحویلی به مصرف کننده

ملاحظات:

۱. بخش دوم توان دارای میانگین صفر است، یعنی به کار تبدیل نمی‌شود (در حالت ماندگار)

۲. بخش سوم توان که با توان راکتیو در ارتباط است، ماهیت رفت و برگشتی (میان شبکه و مصرف کننده) دارد و با دو برابر فرکانس شبکه نوسان می‌کند.

با توجه به قرارداد VI^* ← $Q \begin{cases} >0 & \text{سلف} \\ <0 & \text{خازن} \end{cases}$

اگر قرارداد V^*I ← $Q \begin{cases} <0 & \text{سلف} \\ >0 & \text{خازن} \end{cases}$

۳- در هر شبکه (با مدار بسته) در شرایط ماندگار سینوسی، جمع جبری بخش‌های دوم عبارت توان در کلیه تجهیزات (یا عناصر مدار) برابر صفر است.

$P \begin{cases} >0 & \text{مصرف} \\ <0 & \text{تولید} \end{cases} \xrightarrow[\text{تنها بجای جابجایی ها را تولید و مصرف کنیم}]{\text{به تناظر } P} Q \begin{cases} >0 & \text{مصرف (تحویل می‌دهد)} \\ <0 & \text{تولید (پس می‌گیرد)} \end{cases}$

۴- مسئله اصلی اتلافات ناشی از جابه‌جایی توان راکتیو در شبکه است نه تولید آن.

۵- برای کاهش اتلافات (اشغال شبکه) ← $\begin{cases} \text{کاهش میزان جابه‌جایی توان راکتیو} \\ \text{کوچک کردن منطقه جابه‌جایی توان راکتیو} \end{cases}$

روند کار: (مسیر منطقی رسیدن به توان راکتیو)

۱- توان لحظه‌ای در حوزه زمان ⟶ ③ به توان ظاهری

۲- توان اکتیو در حوزه زمان = میانگین توان لحظه‌ای = $\int$ ② ⑤ $Re[\quad]$

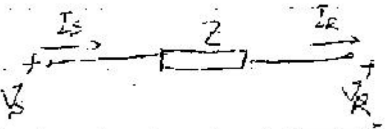
↓

④ $Im[\quad] = Q$ = توان راکتیو

۱۰۸۶/۸/۹

مفاهیم انتقال توان:

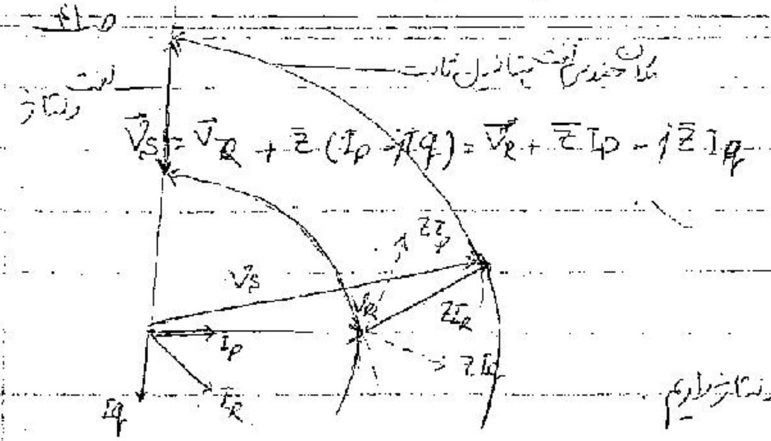
- افت ولتاژ:



- برای محاسبه و تحلیل دقیق، از مدل ساده استفاده می‌کنیم، در این حالت:

$\vec{V}_S = \vec{V}_R + \vec{Z}\vec{I}_R$

۱) ـ بررسی دیاگرام برداری

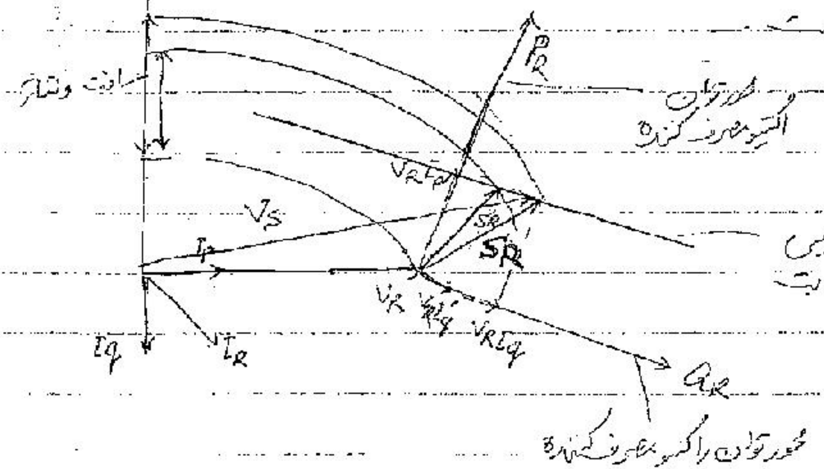

مکان هندسی افت پتانسیل ثابت
افت ولتاژ
V_S
V_R'
jZI_q
ZI_R
ZI_p
I_p
I_q
I_R

$$\vec V_S = \vec V_R + \bar Z (I_p - jI_q) = \vec V_R + \bar Z I_p - j\bar Z I_q$$

افت ولتاژ ـ دیاگرام برداری:

اگر $V_R < V_S$ ـ افت ولتاژ داریم

ـ اگر دیاگرام فوق را در $\frac{V_R}{Z}$ ضرب کنیم، همه دیاگرام به یک اندازه بزرگ یا کوچک شده و با هم چرخیده است.


افت ولتاژ
P_R
محور توان اکتیو مصرف کننده
$V_R I_p$
V_S
S_R'
S_R
مکان هندسی توان اکتیو ثابت
I_p
V_R
$V_R I_q$
I_q
I_R
Q_R
محور توان راکتیو مصرف کننده

۲ـ در شرایط V_R و P_R ثابت، عوامل موثر در افت ولتاژ:

۱ـ امپدانس سری خط انتقال،

۲ـ مولفه عمود بر ولتاژ از جریان عبوری در خط انتقال (توان راکتیو عبوری از خط انتقال)

راه‌های کاهش افت ولتاژ:

۱ـ کاهش امپدانس سری خط انتقال

ـ چون طول تقریباً مقدار مشخص است بنابراین باید امپدانس سری در واحد طول را کاهش دهیم.

الف) باندل کردن هادی ها

$Z' = \underbrace{R'}_{\frac{R}{2}\ \text{کم}} + j\omega \underbrace{L'}_{\text{کم}\ \boxed{L_{self}} - M}$ ~ خازن خطی ندارد

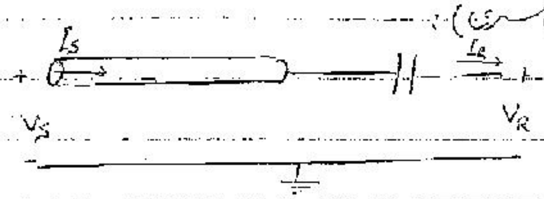
ب) دو مداره کردن

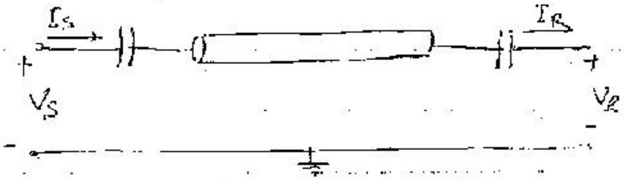
ج) کاهش فاصله هادی ها ← کاهش M

- فاصله بین هادی ها در طراحی معمولاً در کمترین فاصله قرار می‌گیرند (با توجه به مقاومت عایقی هوا)
برای نزدیک کردن آن‌ها باید از یک مقاومت بهتر استفاده کنیم مانند:
مثلاً گاز SF_6 ← در عایق‌بندی کابل ها

د) نصب خازن سری بر روی خط انتقال :

خازن سری (جبران سری) :





- معمولاً در ابتدا یا انتها، همان جایی که پست و تجهیزات کنترل و حفاظات وجود دارد) نصب می‌گردد

$Z' = R' + j\omega L' - \frac{1}{\omega C} \rightarrow$ کاهش Z'

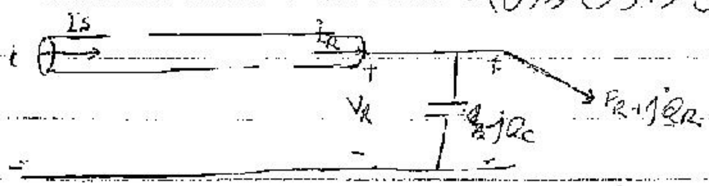
- ایراد روش فوق این است که:
1. افزایش جریان اتصال کوتاه
2. افزایش احتمال بروز تشدید زیر سنکرون

۲. کاهش مولفه عمودی بردار جریان از جریان عبوری در خط انتقال :
(کاهش توان راکتیو عبوری)

- تولید توان راکتیو در محل مصرف کننده با نصب خازن موازی ۱:
که متداولترین روش است

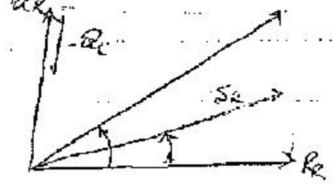
- چون هدف کاهش توان راکتیو عبوری است، خازن را در انتهای مسیر قرار می‌دهیم.

خازن موازی (جبران موازی):



- نصب این خازن، در مراکز صنعتی به عهده
کارخانه‌داران است که در پست اول بعد از موتورها و درون کارخانه قرار می‌گیرد.

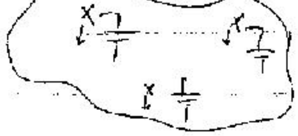
- در شرایط مختلف اندازه خازنی که وارد مدار می‌شود، متغیر است، برای این که زمان تغییر اندازه خازن مشخص گردد افت ولتاژ شبکه را اندازه می‌گیرند، با زیاد شدن افت ولتاژ، خازن وارد شبکه می‌گردد.



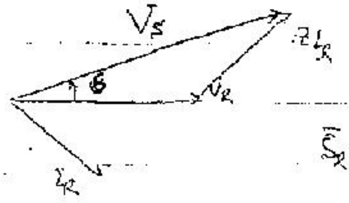
- گاهی خازن‌ها به طور پراکنده در شبکه نصب می‌گردند.

نکات مهم:

۱) محل بهینه نصب خازن‌ها   ۲) مقدار بهینه خازن‌ها



۲ جهت انتقال توان:



$$\bar S_R = \bar V_R \bar I_R^* = \bar V_R \left(\frac{\bar V_S-\bar V_R}{\bar Z}\right)^*$$

$$\vec{S}_R = \frac{V_S V_R}{Z} e^{j(\theta_Z-\delta)} - \frac{V_R^2}{Z} e^{j\theta_Z}$$

$$P_R = \frac{V_S V_R}{Z}\cos(\theta_Z-\delta) - \frac{V_R^2}{Z}\cos(\theta_Z)$$

اگر P_R مثبت باشد، جهت از چپ به راست است. دامنه $>$ ... $\overset{\text{دامنه}}{>}$

$$P_R = \frac{\overset{\frown}{V_S}\,\overset{\frown}{V_R}}{\underset{> 0}{X}}\boxed{\sin\delta} \qquad Z = 0 + jX \rightarrow \text{مربوط به خط انتقال}$$

بنابراین علامت P_R را زاویه δ مشخص می‌کند!

اگر V_S از V_R جلوتر باشد، جهت مثبت

و اگر V_R از V_S جلوتر باشد، جهت منفی

$$Q_R = \frac{V_S V_R}{Z}\sin(\theta_Z-\delta) - \frac{V_R^2}{Z}\sin(\theta_Z)$$

$Q_R = \frac{V_R}{X}(V_S\cos\delta - V_R)$ توان راکتیو خروجی از خط انتقال

$$Q_S = \mathrm{Im}(\bar{V}_S \bar{I}_S^{*}) = \frac{V_S}{X}(V_S - V_R\cos\delta)$$

$$Q_{ave} = \frac{Q_R+Q_S}{2} = \frac{V_S^2 - V_R^2}{2X}$$

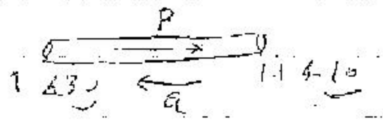
- توان راکتیو از نقطه‌ای که اندازه ولتاژ بزرگتر است به طرف نقطه‌ای که اندازه ولتاژ کوچکتر است، جاری می‌شود.

در شبکه قدرت به اصطلاح کانال $P\text{-}\delta$ و کانال $Q\text{-}V$ می‌گویند.

زاویه ولتاژ بیشتر $\xrightarrow{P}$ زاویه ولتاژ کمتر

مقدار ولتاژ بیشتر $\xrightarrow[Q]{}$ مقدار ولتاژ کمتر (P و Q لزوماً هم جهت نیستند)

مثال:

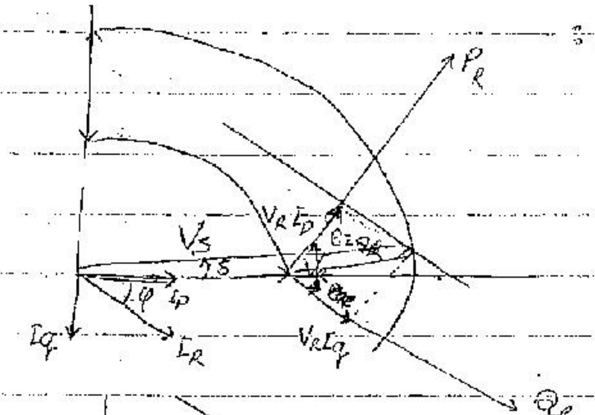


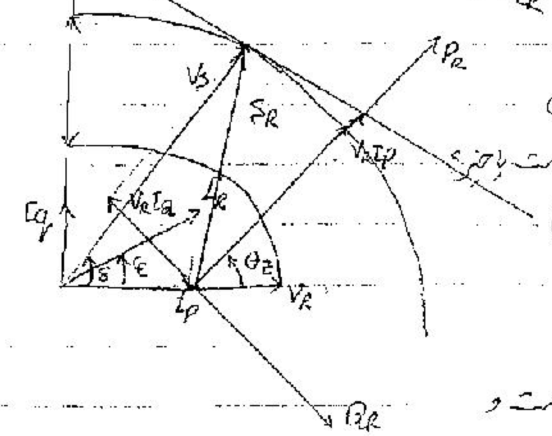
- اگر توان مورد نیاز شبکه را افزایش دهیم، زاویه بین ولتاژها زیاد می‌شود تا توان مصرف کننده را تأمین کند.

- کاهش توان راکتیو، به معنای کاهش اختلاف بین ولتاژها است.

۱۲/۸/۸۶

۳. حداکثر توان اکتیو قابل انتقال:


P_R
V_S
δ
φ
I_p
I_q
I_R
$V_R I_p$
θ_Z
$V_R I_q$
Q_R


P_R
V_S
S_R
$V_R I_p$
$V_R I_q$
I_R
I_q
δ
ε
θ_Z
V_R
I_p
Q_R

- آیا انتقال توان و رساندن آن به دست مصرف کننده دارای یک سقف است یا خیر؟ (انتقال توان در حالت ولتاژ ثابت)

- در این حالت مصرف کننده اهمی-خازنی است و توانی که به مصرف کننده می‌دهیم منفی است.

- حداکثر توان اکتیو زمانی منتقل می‌شود که $\delta = \theta_Z$.

$$S_R = V_R I_R^* = V_R \left[\frac{V_S - V_R}{Z} \right]^* \Rightarrow$$

$$P_R = \frac{V_S V_R}{Z} \cos(\theta_Z - \delta) - \frac{V_R^2}{Z} \cos(\theta_Z)$$

$\delta = \theta_Z$ شرط انتقال حداکثر توان

$$\begin{cases} Z = r + jX \\ P_R = \frac{V_S V_R}{X} \sin\delta \end{cases}$$

[انتقال حداکثر توان: $\delta = 90$.
جا = θ_Z

$Z = 0 + jX$

$$P_{R\max} = \frac{V_S V_R}{Z} - \frac{V_R^2}{Z}\cos(\theta_Z) \qquad P_{R\max} = \frac{V_S V_R}{X}$$

$$Q_R = -\frac{V_R^2}{Z}\sin(\theta_Z) \qquad Q_R = -\frac{V_R^2}{X}$$

- حداکثر توان قابل انتقال در شبکه به سطح ولتاژ شبکه بستگی دارد و راکتانس خط انتقال به هر چه خط انتقال طولانی‌تر باشد راکتانس بیشتر است.

- باری که حداکثر توان را دریافت می‌کند بار اهمی خازنی است.

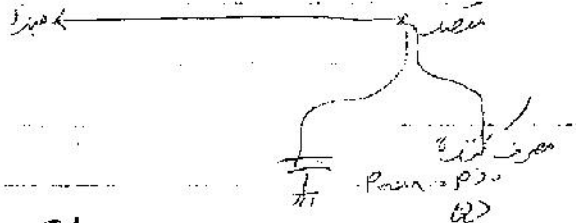
$$Q_R = \frac{V_S V_R}{Z}\sin(\theta_Z - \delta) - \frac{V_R^2}{Z}\sin(\theta_Z)$$

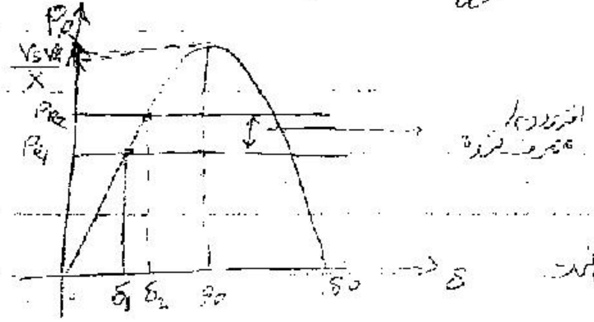
$$Q_R = \frac{V_R}{X}(V_S\cos\delta - V_R)$$

- مصرف کننده‌ای می‌تواند حداکثر توان اکتیو را دریافت کند که از دید شبکه اهمی خازنی باشد و برای دریافت حداکثر توان اکتیو، توان راکتیو فوق را تولید کند.

- بنابراین توان اکتیو قابل انتقال دارای یک سقف است و به هر مصرف کننده‌ای قابل انتقال نیست.

۲ - نکته: اگر مصرف کننده ما دارای Q مثبت باشد آن قدر خازن قرار می‌دهیم تا مصرف کننده از دید شبکه دارای Q منفی گردد.

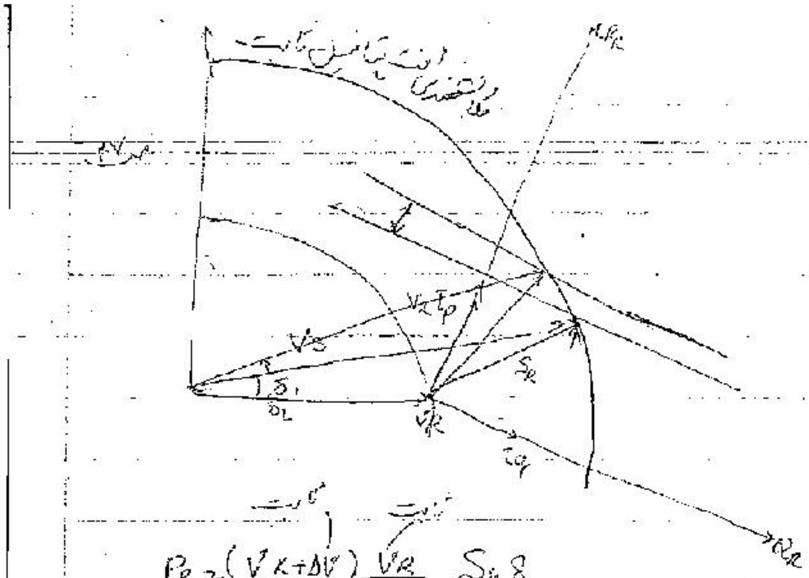




δ حد پایداری استاتیک :

- اگر توان P را بخواهیم :

V_S ، V_R و X ثابتند بنابراین δ تغییر می‌کند

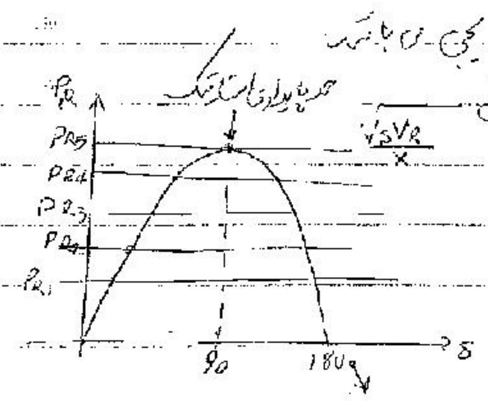


[illegible]

$$P_R = \frac{\overset{\text{ثابت}}{(V'K+\Delta V')}\ \overset{\text{ثابت}}{V_R}}{\underset{\text{ثابت}}{X}}\ \sin\delta$$

سیستم δ را تغییر می‌دهد

- تغییر وضعیت از P_1 به P_2 به آرامی و تدریجی می‌باشد



- تا زمانی که مصرف کمتر از حداکثر توان تجاوز نکند، توان مورد نیاز آن با زیاد کردن δ توسط شبکه تأمین می‌شود.

اگر توان مورد نیاز بیشتر از حداکثر توان شبکه باشد، شبکه δ را زیاد و زیادتر می‌کند تا جایی ... که از ۱۸۰ تجاوز می‌کند. در این حالت شبکه از سنکرون خارج شده است.

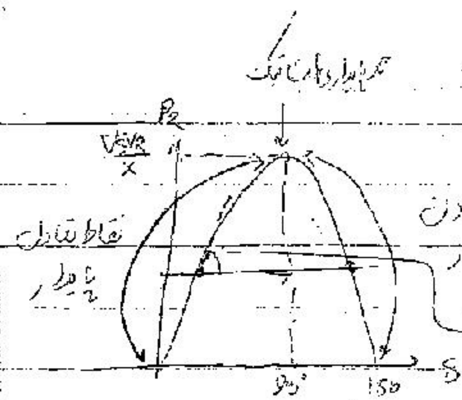
حد پایداری استاتیک = حد پایداری شبکه در برابر تغییرات کند و تدریجی از بار

[illegible]

- عوامل موثر

۱. ولتاژ شبکه (رابطه مستقیم)   ۲. امپدانس سری خط انتقال (رابطه معکوس)

- افزایش حد پایداری δ
- نصب شبکه با ولتاژ بیشتر
- خط کوتاه‌تر
- خطوط با خازن سری (جبران سری) به علت عدم استفاده از خازن سری (کاهش امپدانس تأثیر جانبی است)



- شاخص استحکام پایداری استاتیک نقطه تعادل :

$$S_y = \frac{dP}{d\delta} = \frac{V_S V_R}{X}\cos\delta$$

- نزدیک شدن مقدار فوق به صفر، پایداری را کاهش می دهد.

- اگر از خط دو مداره استفاده شود، X نصف می شود بنابراین P_R حد پایداری شبکه افزایش می یابد.

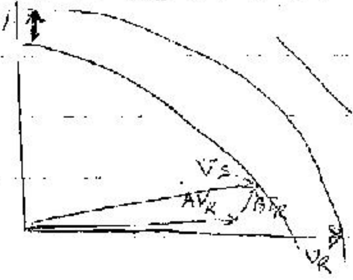
۵ پدیدهٔ فرانتی :

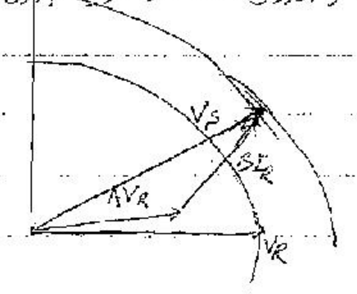
اضافه ولتاژ بر روی خط، در شرایط کم باری

$$\vec{V}_S = \vec{A}\vec{V}_R + \vec{B}\vec{I}_R$$

کم باری $\xrightarrow{I_R=0}$ $\vec{V}_S = \vec{A}\vec{V}_R$

اضافه ولتاژ





$$Z = 0 + jX$$

$$\vec{V}_R = \frac{\vec{V}_S}{A} = \frac{\vec{V}_S}{\cos\beta l}$$

- هرچه خط بلندتر باشد، ناپایداری شبکه بیشتر است.

و در شرایط بی باری نیز اضافه ولتاژ بیشتر است و اثر پدیده فرانتی (که صد در صد خطرناک است).

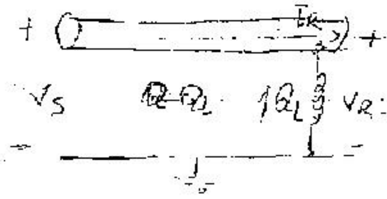
- در صورت وجود اضافه بار در شبکه، پایداری شبکه را قوی تر کرد که افزایش هزینه همراه است.

سیستم - دکتر شهرتاش

راه حل پدیده فرانتی ؟

1 تغییر راکتیو مصرف

۲ افزودن راکتور (سلف) موازی



$I_R = 0$

$Q_S = I_m(\overline{V_S}\,\overline{I_S}^*) = I_m[\bar{A} V_R \cdot \bar{C} V_R]$

$= I_m[\bar{A} \cdot \bar{C}]\, V_R^2$

توان راکتیو تولیدی خازن های خط انتقال، بیشتر از توان راکتیو مصرفی سلف های خط انتقال باشد، بنابراین جهت توان راکتیو از مصرف کننده به منبع است،

۲ برای برعکس کردن جهت توان راکتیو از راکتور (سلف) موازی استفاده می شود؟

$$Z = 0 + jX \rightarrow Q_S = -j\frac{\sin 2\beta' l}{2Z_C} V_R^2$$

شرایط تحقق پدیده فرانتی :

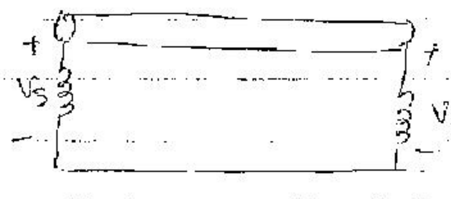
۱ـ توان راکتیو از سمت مصرف کننده به سمت منبع جریان دارد

۲ خط انتقال حالت خازنی دارد.

ـ در شبکه ۴۰۰ کیلوولت ایران، راکتور دائم متصل (سلف شنت) وجود دارد، به این جهت که در صورت شارژ ابزار باعث جرقه و از بین رفتن عایق و قطع شبکه می گردد.

هر چند باید [illegible]

هزینه ناشی از اضافه ولتاژ و تأمین جبران آن را بپردازد.



شبکه جبران شده

ـ یک مثال عددی از شبکه :

$Z' = 0.0235 + j0.346\ \Omega/km$

$Y' = j4.745\times10^{-6}\ \Omega^{-1}/km$

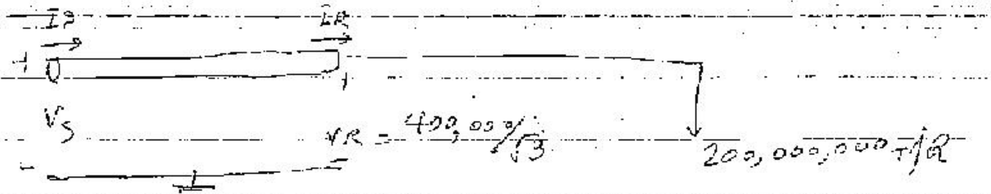
$l = 500\ km$

$Z_C = 271 - j9.24\ \Omega$

$\gamma = 0.000044 + j0.00128$

$D = A = 0.8008 + j0.0132$

$B = 10.31 + j162.3$, $C = j0.0022$


IS
IR
+
VS
−
VR = 400,000/√3
−
200,000,000 + jQ

[illegible] ۵/

اگر ماتریس امپدانس نباشد [illegible] باز از هم:

$\Delta V_{ABC} = \boxed{Z_{ABC}}\ I_{ABC}$ استفاده می‌کنیم

ماتریس امپدانس ناقص ← ۵ جریان

T را به نحوی تعریف کردیم که بتوان ماتریس امپدانس فاز را مانند (در شبکه‌های متقارن)

اگر سیستم امپدانس نامتقارن باشد
باز هم Z_{012} ماتریس قطری نمی‌شود

تمرین:

$$\Delta V_{ABC} = T\ \Delta V_{012}$$

اگر

$$\begin{matrix} \Delta V_1 = Z_1 I_1 \\ \Delta V_2 = Z_2 I_2 \\ \Delta V_0 = Z_0 I_0 \end{matrix} \xrightarrow{\text{شروط}} \begin{cases} \Delta V_A = \Delta V_1 \\ I_A = I_1 \end{cases}$$

تا برای هر Z با ماتریس T' یافت که: $\boxed{(T'^{-1}) Z T'}$ ماتریس قطری باشد، ولی [illegible] هر ماتریسی را در نظر [illegible]

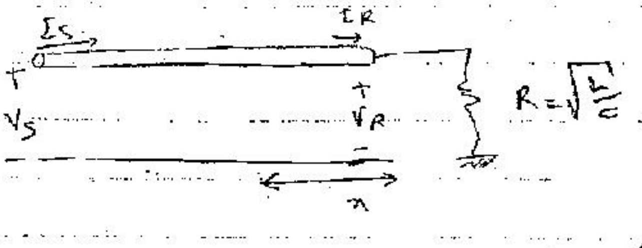
هدف از [illegible] ← حد پایداری است یک شکل کم تر [illegible] زمان است.

تمرین ۶

مفاهیم انتقال توان - بار طبیعی:

این جلسه

اگر: $\boxed{Z = 0 + jX}$



$$\boxed{P_R = \frac{V_R^2}{\sqrt{L/C}}}$$ ← اکتیو

V_R ← ولتاژ فاز به زمین است یا برای بار سه فاز [illegible] است.

$\sqrt{\frac{L}{C}}$ ← امپدانس مشخصه است.

بار طبیعی: مصرف کننده‌ای که به خط وصل شود که مقاومتی است و اندازه‌اش برابر امپدانس مشخصه خط است.

روابط خط انتقال [illegible] بار:

$$\begin{cases} V_x = (\cos \beta x) V_R + \left(j\sqrt{\frac{L}{C}} \sin \beta x\right) I_R \\ I_x = \left(j\sqrt{\frac{C}{L}} \sin \beta x\right) V_R + (\cos \beta x)\ I_R \end{cases}$$

اگر مقدار جریان هم $\frac{V_R}{\sqrt{L/C}}$ است قرار دهیم:

$$V_x = [\cos\beta x + j\sin\beta x]V_R = V_R e^{j\beta x}$$

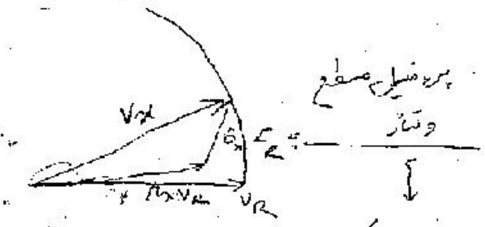
$$I_x = [j\sin\beta x + \cos\beta x]I_R = I_R e^{j\beta x}$$

مشخص است که جریان و ولتاژ از نظر اندازه همان است و فقط زاویه‌ی آنها یک مقدار تغییر کرده است.

بنابراین با قرار دادن این مصرف کننده خاص، اندازه ولتاژ در هر نقطه خط از نظر اندازه برابر است ⇐ افت ولتاژ در این خط صفر است و اندازه ولتاژ ثابت می‌ماند.

زاویه حتماً متفاوت است چون در مصرف کننده توان اکتیو می‌خواهد و تا مقدار زاویه در جهت پیشی‌تر است. (انتقال توان اکتیو)

$$\angle V_x > \angle V_R$$



$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$ = امپدانس مشخصه

$R \ll X$

$$Z_c = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \text{امپدانس موجی}$$

به این بار که این شرایط را دارد می‌گویند بار طبیعی خط.

بارگذاری با امپدانس موجی ← Surge Impedance loading

سؤال // مثلث مشخصه بدهیم

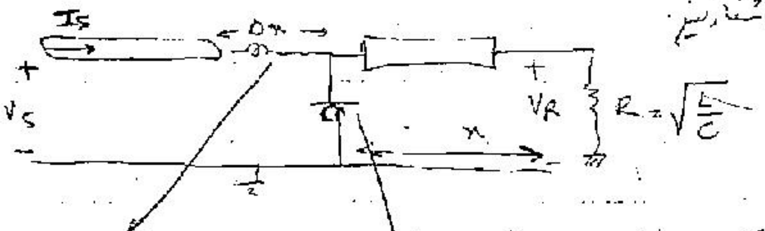
$$\frac{P \leftrightarrow \delta}{Q \leftrightarrow V}$$

تناقض:

کنترل مقدار ولتاژ با توان اکتیو !!!

راه حل:

در هر نقطه x که L و C داریم تشکیل کنیم:



توان راکتیو مصرفی توسط سلف و تولید شده توسط خازن (خازن خط) را حساب می‌کنیم:

$$Q_{L_x} = j\omega L'\Delta x \cdot I_x^2$$

چون اندازه‌ی I_x و I_R یکسان است

$$Q_{C_x} = -j\omega C'\Delta x V_x^2 = -j\omega C'\Delta x\left(\sqrt{\frac{L}{C}}\, I_x\right)^2$$

$S = VI^*$

↓ قرارداد: اگر خازن Q منفی است

[illegible]

بنابراین در Q از نظر انتقال [illegible] مشکلی ندارد

بنابراین توان راکتیو تولید شده توسط C در محل مصرف می‌شود و در کل خط انتقال همین اتفاق می‌افتد. بنابراین

هر تولید راکتیو تولید شده در کنار خودش مصرف می‌شود و هیچ توان راکتیوی در کل خط منتقل نمی‌شود.

بنابراین: هم ولتاژ توسط توان راکتیو کنترل شده است.

کاربرد: ⇐ این اتفاق در عمل معمولاً نمی‌افتد !!!

$$\vec{V}_S = \vec{A}\vec{V}_R + \vec{B}\vec{I}_R$$

$$= \vec{A}\vec{V}_R + \vec{B}\frac{P_R - jQ_R}{\vec{V}_R^*} = \vec{A}\vec{V}_R + \vec{B}\frac{P_R}{\vec{V}_R^*} - \vec{B}\frac{jQ_R}{V_R^*}$$

$S_R = V_R I_R^*$

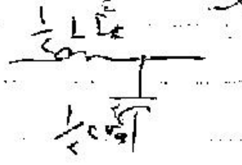
$I_R = \left(\frac{S_R}{V_R}\right)^*$

مثلاً اگر: $Q_R = 0$, $P_R = P_N$ $\Rightarrow$ $\boxed{\text{بدون افت سطح ولتاژ}}$

بار ↑ لامپ‌ها

اگر P_R از P_N بیشتر گردد ⇐ یعنی بار افزایش یابد ⇐ یعنی جریان زیاد شده است

خیلی مهم



بنابراین توان راکتیو C ، L را تأمین کند ⇐ با توجه به [illegible] ⇐ فعلاً نمی‌تواند (اهمیت است)

توان راکتیو خود را از منبع بگیرد ⇐ $\xrightarrow{Q}$

ریاضی

حال افت ولتاژ ایجاد می‌شود؟

اگر بار اضافه $Q = 0$, $P_R > P_N \rightarrow AV_R + \vec{B}\frac{P_R\uparrow}{V_R^*} + ⓞ$

← [illegible] افت ولتاژ ایجاد می‌شود.

$P_R > P_N \Rightarrow \boxed{\text{افت ولتاژ}} \Leftarrow Q_R > 0$ ⟵ خود را داد تا افت ولتاژ را ایجاد کند.

$P_R < P_N \Rightarrow \boxed{\text{اضافه ولتاژ}} \Leftarrow Q_R < 0$

در ساعات اول صبح بهره برداری از شبکه کم است ← $P_R < P_N$ خواهد بود بنابراین باید $Q \geq 0$ کنیم تا

شب = ولتاژ ایجاد شود.

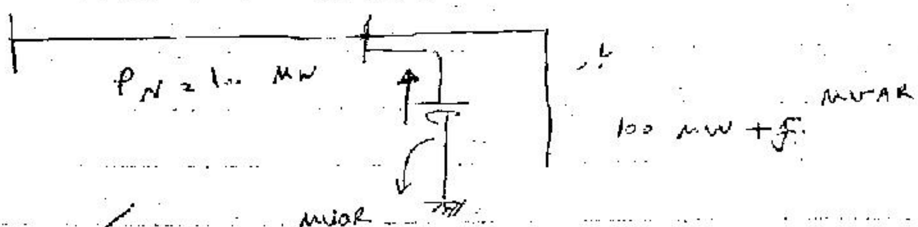
در ساعات آخر ← چون همه بارهای زیاد، شبکه وصل است، $P_R > P_N$ بنابراین باید خازن وصل نمائیم تا $Q < 0$ گردد و

به صاف شدن ولتاژ کمک باشد.

بار طبیعی یک شاخص است که نشان دهد وضعیت ولتاژ چطور است.

برای $P_R > P_N$ ← متوجه اضافه ولتاژ باشیم

برای $P_R < P_N$ ← متوجه افت ولتاژ باشیم.



خازن باید ۴۰ MVAR قرار دهیم تا از شبکه $P_R = P_N$ و $Q_R = 0$ گردد.

اگر بار $80\ MW + j20\ MVAR$ باشد ← خازن که قرار دهیم باید توان راکتیو کمتر از ۲۰ MVAR تولید کند تا شرایط به صورت

$$\boxed{\begin{matrix} P_R < P_N \\ Q_R > 0 \end{matrix}}$$

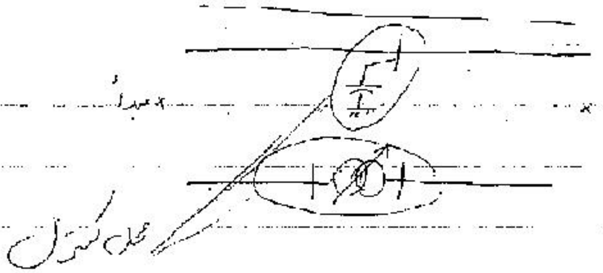
اگر بار $120\ MW + j60\ MVAR$ باشد باید توان راکتیوی که توسط خازن تولید می‌شود از ۲۰ MVAR بیشتر باشد

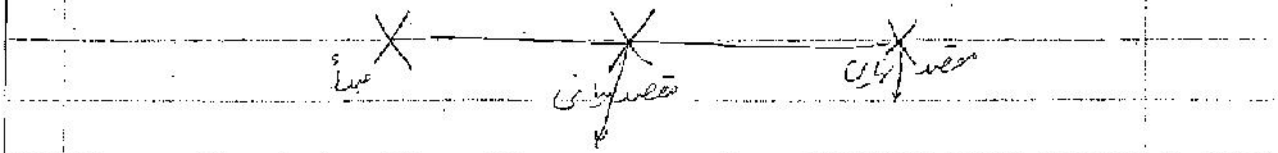
تا افت ولتاژ کمتر گردد.

۱۹ / ۸ / ۸۶ ج

سیستم انتقال توان - خطوط بلند ۲

طول در خط انتقال: فاصله میان محل‌های کنترل ~~[illegible]~~ شبکه (از نظر ولتاژ، توان ...)





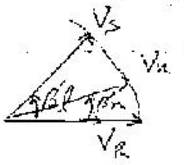
خطوط بلند را با ابزار آلات کنترلی می‌توان کوتاه کرد

$$\xrightarrow{\text{مدل گسترده}} \begin{cases} P_R = \dfrac{V_S V_R}{Z_C \sin\beta' l} \sin\delta \\ Q_R = \dfrac{V_S V_R}{Z_C \sin\beta' l} \cos\delta - \dfrac{V_R^2 \cos\beta' l}{Z_C \sin\beta' l} \end{cases} \longleftarrow \boxed{Z = 0 + jX}$$

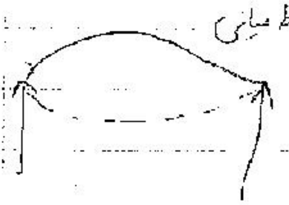
$$l \uparrow \quad P_{Rmax} \downarrow \Longrightarrow \frac{\overset{\text{بار طبیعی}}{P_N}}{P_{Rmax}} \uparrow \quad \beta' l \uparrow$$

شاخص استحکام یا پایداری، به ازای بار طبیعی کاهش می‌یابد

$$P_N = \frac{V_R^2}{\sqrt{\frac{L}{C}}}$$



بارهای دیگر و [illegible] که ولتاژ ابتدا و انتها برابرند، ولتاژ در نقاط میانی کاملاً متفاوت است.



برای بارهای طبیعی، خط مسطح است و ولتاژ تمام نقاط برابر است، دارای پروفیل ولتاژ مسطح است.

$(P_R \longleftrightarrow)\ \delta \uparrow \quad \delta_y \updownarrow$

$$\frac{P_R}{P_N} = \underset{\text{per unit}}{P_{pu}} \quad , \quad \frac{Q_R}{Q_N} = Q_{pu}$$

$$P_{pu}^2 + (Q_{pu} + \cot\beta' l)^2 = \frac{(V_S/V_R)^2}{\sin^2\beta' l}$$

$$P_{pu}^2 \sin^2\beta' l + \cos^2\beta' l = \left(\frac{V_S}{V_R}\right)^2$$ در نتیجه $\overset{\text{فرض کنیم}}{Q_R = 0} \Rightarrow \cos\varphi = 1$

P_{pu}	V_S/V_R	
	$l=500$	$l=50$
0	0.866	0.9986
0.5	0.901	0.9989
1	1	1
1.5	1.195	1.001
2	1.323	1.004

در حالت بی باری، پدیده فرانتی اتفاق می افتد ← ولتاژ ابتدا از انتها کم تر می گردد

در این حالت افت ولتاژ داریم

← کماکان افت ولتاژ داریم، چون P از P_N کم تر است.

افت ولتاژ به l بستگی دارد، هر چه l کوچکتر باشد، افت ولتاژ کم تر است

می خواهیم با ابزاری به کار بریم تا $\frac{V_S}{V_R} = 1$ گردد، این کار را با تزریق توان راکتیو در محل مصرف انجام می دهیم.

$$P_{pu}^2 + (Q_{pu} + \cot\beta' l)^2 = \frac{1}{\sin^2\beta' l} \qquad \frac{V_S}{V_R} = 1$$

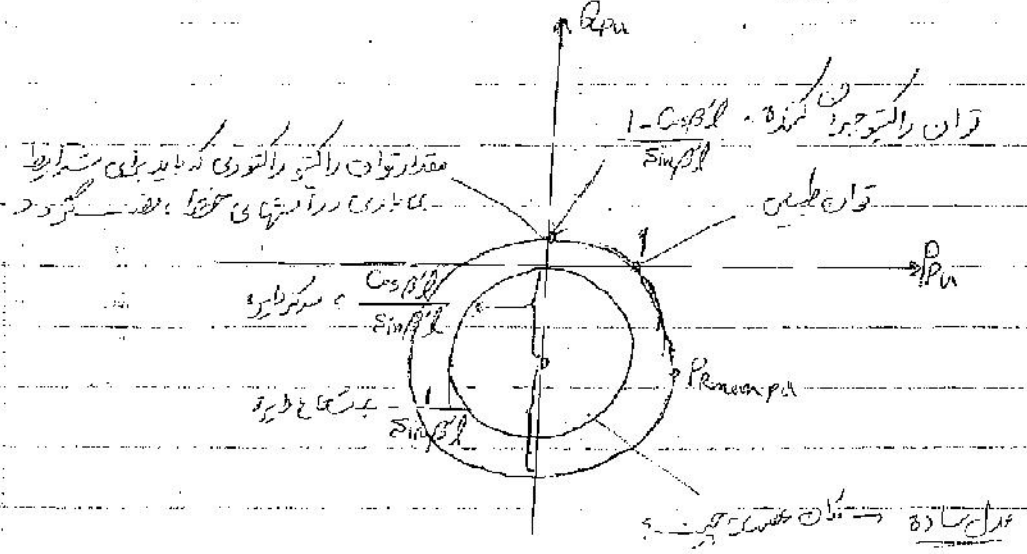
P_{pu}	Q_{pu}	
	$l=500$	$l=50$
0	0.268	0.027
0.5	0.204	0.021
1	0	0
1.5	-0.409	-0.031
2	-1.732	-0.077
8	—	-1.732
19.1	—	-19.08

توان راکتیو به سمت تولید کننده می رود، برای از بین بردن این، یک راکتور قرار می دهیم.

حد پایداری استاتیک اجازه عبور توان بیشتر را به ما نمی دهد.

- از جدول صفحه قبل می‌فهمیم حد پایداری استاتیک خطوط کوتاه کم بیشتر است.

$$\frac{V_S}{V_R}=1 \rightarrow P_{pu}^2+(Q_{pu}+\cot\beta l)^2=\frac{1}{\sin^2\beta l}$$


Q_{pu}
توان راکتیو جبران کننده = $\frac{1-\cos\beta l}{\sin\beta l}$
مقدار توان راکتیو راکتوری که باید برای شرایط بی‌باری در انتهای خط اضافه گردد
توان طبیعی
1
P_{pu}
مرکز دایره = $\frac{\cos\beta l}{\sin\beta l}$
$P_{R\max pu}$
شعاع دایره = $\frac{1}{\sin\beta l}$
مدل ساده ← مکان هندسی چیست؟

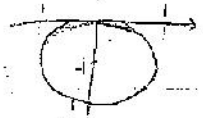
سوال: برای یک خط مشخص که از تلفات خط صرف نظر کرده‌ایم (R=0)، مکان هندسی مصرف کننده این خط را در صفحه P و Q نمایش دهید (پاسخ: نمودار بالا)

- نقاط بالای و پایین دایره متناظرند، نقاط پایین، نقاط ناپایدارند.

سوال: برای خط کوتاه یا بلند، نمودار فوق چه تفاوتی می‌کند؟ [illegible]

$P=\frac{V_S V_R \sin\delta}{X}$, $Q=\frac{V_S V_R}{X}\cos\delta-\frac{V_R^2}{X}$

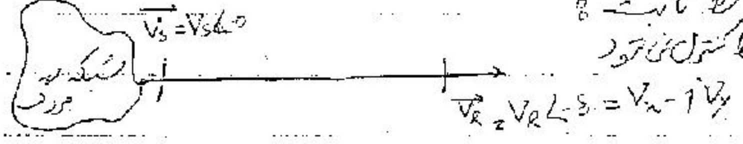
$\xrightarrow{\frac{V_S}{V_R}=1} P^2+(Q+1)^2=1 \longrightarrow$



برای خطوط کوتاه شعاع و مرکز دایره بزرگ‌تر می‌شود

مفاهیم اساسی توان - فرکانس و ولتاژ:

مفروضات: - ولتاژ ابتدای خط ثابت،
- ولتاژ انتهای خط کنترل می‌شود


شبکه بی‌نهایت مرجع
$\vec{V_S}=V_S\angle 0$
$\vec{V_R}=V_R\angle-\delta=V_x-jV_y$

$$\vec{V_S}=\vec{A}\,\vec{V_R}+\vec{B}\left(\frac{\vec{S_R}}{\vec{V_R}}\right)^* \qquad \vec{V_S}\,\vec{V_R}^*=\vec{A}\,V_R^2+\vec{B}\,\vec{S_R}^*$$

$Z = 0 + jX$; $\vec{A} = A$

$\vec{B} = jB$

$$\begin{cases} V_s V_x = A\,(V_x^2 + V_y^2) + B\,Q_R \\ V_s V_y = B P_R \end{cases} \rightarrow \quad V_y = \frac{B P_R}{V_s}, \quad V_x = \frac{V_s}{2A} \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2A}$$

$$\Delta = V_S^2 - 4ABQ_R - 4A^2 \underbrace{\left(B^2 P_R^2 / V_S^2\right)}_{V_y^2} \boxed{\geq 0 \quad \text{شرط ضروری}}$$

$\Delta = 0 \longleftarrow P_{max}$ و $Q = P\tan\varphi$

حداقل مقدار Δ صفر است

زیرا V_x باید حقیقی باشد

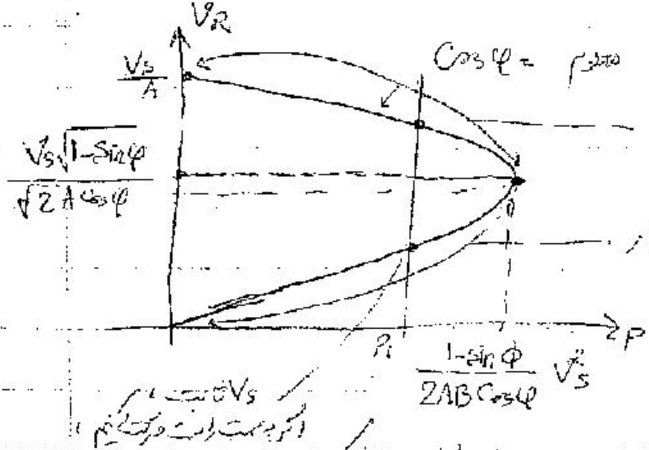
$$P_{max}^2\left(\frac{4A^2B^2}{V_S^2}\right) + P_{max}(4AB\tan\varphi) - V_S^2 = 0 \Rightarrow$$

$$P_{max}(\phi) = \frac{(1-\sin\varphi)}{2AB\cos\varphi}\,V_S^2$$

$$V_y = \frac{BP_R}{V_s} \;\updownarrow\; V_x = \frac{V_s}{2A} \pm \frac{\sqrt{\Delta}}{2A} \Longrightarrow \xrightarrow{\Delta=0} \left[\, V_x = \frac{V_s}{2A} \;,\; V_y = \frac{V_s}{2A}\left(\frac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\right)\right.$$

$$V_R = \frac{V_s\sqrt{1-\sin\phi}}{\sqrt{2}A\cos\phi} \;,\; \delta = \tan^{-1}\left(\frac{1-\sin\phi}{\cos\phi}\right)$$

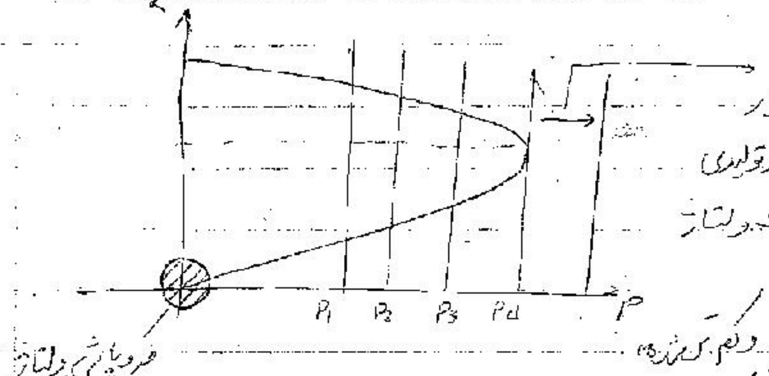
V_R را برحسب P رسم می‌کنیم :



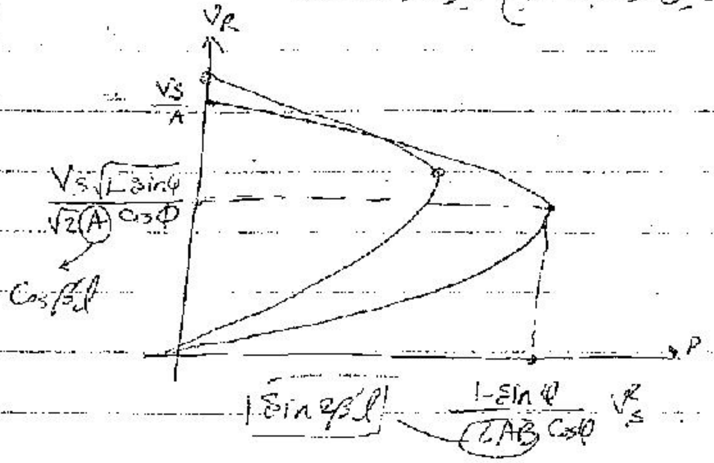
V_s ثابت است ، اگر درست دقت کنیم ،
انتقال توان کم را که خود به خود پایدار
است به سمت ناپایدار می‌رود .

$\cos\phi$ ثابت :

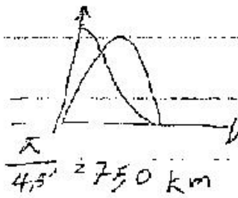
حال اگر φ نیز تغییر کند :

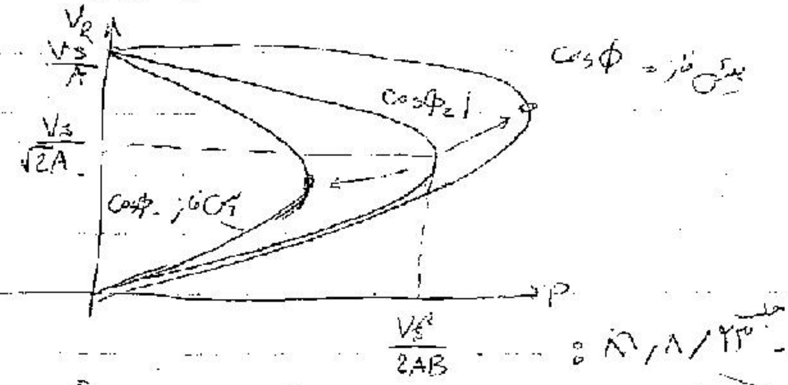


شبکه توزیع وقتی می‌بینیم بین مقدار
در ترانسمیشن مصرف کننده و تولیدی
تفاوت وجود دارد. افت ولتاژ
ایجاد می‌کند.
بدین ترتیب ولتاژ کم و کم کم شده
تا جایی که ولتاژ صفر می‌گردد در این حالت
فروپاشی ولتاژ صورت می‌گیرد در شبکه توزیع زیر بار می‌باشند:



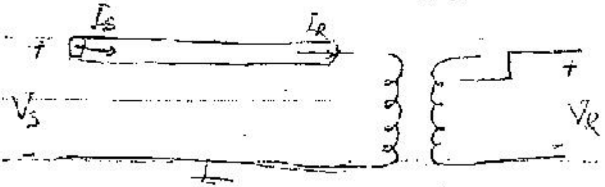
$\boxed{10}$





تنظیم انتقال توان - جلسه ۸۶/۸/۲۳ :

کنترل مقدار ولتاژ :



الف) با کنترل توان راکتیو عبوری (یا تزریقی)

ب) با تنظیم کننده ولتاژ در ترانسفورماتور (تپ چنجر)