Subject:

Year Month Date (آ)

«مبانی سیستم های قدرت» «استاد یار محمدی»

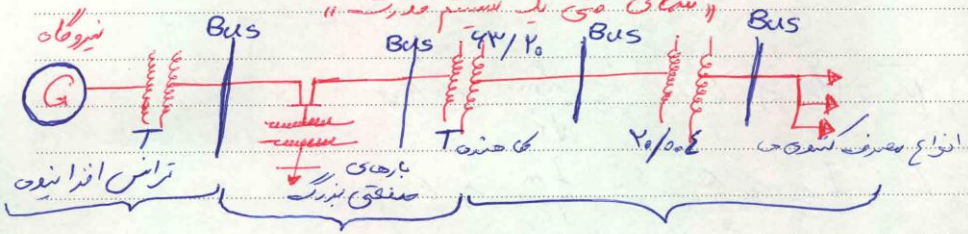
سیستم قدرت:

۱) تولید

۲) انتقال «شبکه انتقال و ولتاژ بالا و فوق توزیع»

۳) توزیع «شبکه متوسط و شبکه ضعیف»

«شمای فنی یک سیستم قدرت»



تولید — انتقال — توزیع

تولید ← نیروگاه هایی با سوخت تجدید ناپذیر مانند: بخار، گاز، سیکل ترکیبی، هسته ای، دیزلی، نفتی، زغال سنگ

تولید ← نیروگاه هایی با سوخت تجدید پذیر مانند: باد، آب، خورشید، زمین گرمایی، جزر و مد

CAPITAL

مفاهیم اساسی در سیستم قدرت ۳ فاز

الف) فازور:

$$v_{(t)} = V_m \cos(\omega t + \theta_v)$$

$$I_{(t)} = I_m \cos(\omega t + \theta_i)$$

روابط ولتاژ و جریان در حوزه زمان

از روابط بالا می‌توان فازور ولتاژ و جریان را نوشت:

فازور ولتاژ $\vec{V} = V_e \angle \theta_v = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \angle \theta_v$

فازور جریان $\vec{I} = I_e \angle \theta_i = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \angle \theta_i$

اگر برحسب cos بودند با cos عمل می‌کنیم.

اگر برحسب sin بودند با sin عمل می‌کنیم.

$$v_{(t)} = 100\sqrt{2} \sin(\omega t + 150)$$

باید تبدیل به cos کرد.

$$v_{(t)} = 100\sqrt{2} \cos(\omega t + 150 - 90)$$

$150 - 90 = 60$ فازور ولتاژ زاویه بالا

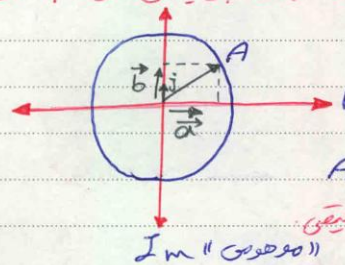
$$\vec{V} = \frac{100\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \angle 60$$

CAPITAL

دستگاه مختصات اعداد مختلط

اعداد به ۲ صورت تقسیم می‌شوند

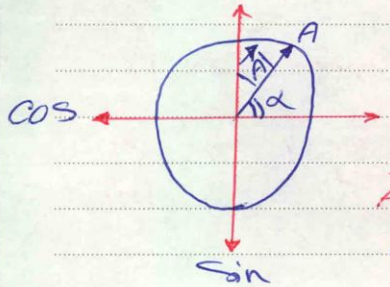
۱- فرم دکارتی: هر بردار در صفحه‌ی ۲ بعدی تجزیه می‌شود به ۲ مولفه تقسیم می‌شود.



$$A = \vec{a} + j\vec{b}$$

مثلث موهومی قسمت حقیقی

۲- فرم قطبی:



$\vec{A} = |A| \angle \alpha$ ← بازاویه

A اندازه

$$\sin\alpha = \cos(\alpha - 90^\circ)$$

$$\cos\alpha = \sin(\alpha + 90^\circ)$$

جمع و تفریق:

$$\vec{A} = a_1 + jb_1 \qquad \vec{B} = a_2 + jb_2$$

$$A + B = (a_1 + a_2) + j(b_1 + b_2)$$

$$A - B = (a_1 - a_2) + j(b_1 - b_2)$$

CAPITAL

Subject:

Year ..... Month ..... Date ..... (٤٢

$\vec{A} = |A| \angle \alpha_1 \qquad \vec{B} = |B| \angle \alpha_2$

ضرب و تقسیم:

$\vec{A}.\vec{B} = |A|.|B| \angle (\alpha_1 + \alpha_2)$

$\frac{\vec{A}}{\vec{B}} = \frac{|A|}{|B|} \angle (\alpha_1 - \alpha_2)$

زاویه خروج ← زاویه صورت

جمع و تفریق ← دکارتی

ضرب و تقسیم ← قطبی

تبدیل دکارتی به قطبی:

$\vec{A} = a_1 + jb_1$ دکارتی $\qquad \vec{B} = a_2 + jb_2$

$|A| = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$ ، $\alpha = \tan^{-1} \frac{b_1}{a_1}$ یا $\cos^{-1} \frac{a_1}{|A|}$

$|A| \angle \alpha$ قطبی $\qquad |B| \angle \alpha$

تبدیل قطبی به دکارتی:

قطبی ←

$\vec{A} = |A| \angle \alpha_1 \qquad \vec{B} = |B| \alpha_2$

$\vec{A} = |A| \cos \alpha_1 + j|A| \sin \alpha_1$

$\vec{B} = |B| \cos \alpha_2 + j|B| \sin \alpha_2$

} ← دکارتی

CAPITAL

Subject:

Year ..... Month ..... Date ..... (٥٧)

$|A| = \sqrt{a^2 + b^2}$

$tg\alpha = \frac{\text{ضلع مقابل}}{\text{ضلع مجاور}} = \frac{b}{a}$

$\cos\alpha = \frac{\text{ضلع مجاور}}{\text{وتر}} = \frac{a}{|A|}$ $\quad \alpha = \cos^{-1}\frac{a}{|A|}$

$\cot\alpha = \frac{\text{ضلع مجاور}}{\text{ضلع مقابل}} = \frac{a}{b}$ $\quad \alpha = \cot^{-1} = \frac{a}{b}$

* مفهوم امپدانس:

R	مقاومت	R = R	پریز Ω و امپدانس اهمی
L	سلف	$X_L = jL \cdot w$	» Ω » سلفی
C	خازن	$X_C = \frac{1}{jCw}$	» Ω » خازنی

DC: AC:

* امپدانس Z

$Z = R + jX$ «مقاومت ظاهری» امپدانس

$\bar{Z} = |\sqrt{R^2 + X^2}| \angle tg^{-1}\frac{X}{R}$

$\vec{Z} = \frac{1}{Y}$ $\qquad \vec{Y} = \frac{1}{Z} = G + B$ (هدایت، سوسپتانس)

مقاومت ظاهری — ادمیتانس — هدایت ظاهری

مقاومت الکتریکی — هدایت الکتریکی

$R = \frac{1}{G}$ $\qquad G = \frac{1}{R}$

CAPITAL

روابط توان در شبکه های قدرت:

ولتاژ لحظه ای $v_{(t)} = V_m \cos(\omega t + \phi_v)$ ← تبدیل به فازور → $\vec{V} = \left|\frac{V_m}{\sqrt{2}}\right| \angle \phi_v = V_e \angle \phi_v$

جریان لحظه ای $I_{(t)} = I_m \cos(\omega t + \phi_i)$ ← " → $\vec{I} = \left|\frac{I_m}{\sqrt{2}}\right| \angle \phi_i = I_e \angle \phi_i$

سرعت زاویه ای ⇐ ω

اختلاف فاز ⇐ ϕ

اگر در رابطه بعدی sin و cos داشتیم باید تبدیل به cos شود "۹۰-"

* توان لحظه ای

$$p_{(t)} = v_{(t)} \cdot I_{(t)} = \frac{V_m I_m}{2}\left[\cos(2\omega t - \phi_i) - \cos\phi_i\right]$$

در این حالت عبارت بزرگی باید نوشته شود و کمی سخت می شود برای همین بهتر است در حوزه فازور این کار را انجام دهیم.

* توان اکتیو

$$P = V_e I_e \cos\phi$$

* توان راکتیو

$$Q = V_e I_e \sin\phi$$

$$\phi = \phi_v - \phi_i = \angle V - \angle I$$

* توان ظاهری ← اندازه $|S| = \sqrt{P^2 + Q^2}$

$\vec{S} = \vec{P} + j\vec{Q}$ یا $\vec{S} = \vec{V}\vec{I}^*$ ← فازور مزدوج جریان

CAPITAL

«دیاگرام جریان در بارهای مختلف»

$\vec{I} = I \angle +\phi$

بار اهمی خازنی

$+\phi$

V

$-\phi$

بار اهمی سلفی

$\vec{I} = I \angle -\phi$

«مثلث توان در بارهای مختلف»

بارهای اهمی سلفی $+Q$

S

$+\phi$

P

$-\phi$

S

بارهای اهمی خازنی $-Q$

P, I, V

توان لحظه‌ای S

مقدار متوسط توان کل

$V_e I_e \cos\phi$

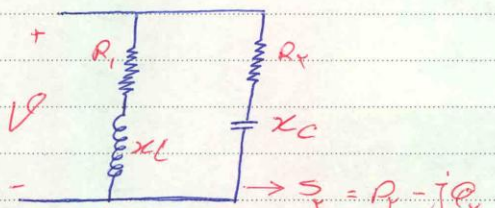
t

$I_{(t)}$

$V_{(t)}$

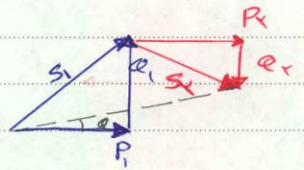
CAPITAL

خازن گذاری در شبکه های قدرت :



$\rightarrow S_2 = P_2 - jQ_2$

$S_1 = P_1 + jQ_1$



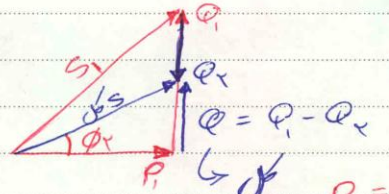
$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$

کل ↓ کل ↓

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

$P = P_1 + P_2 \qquad Q = Q_1 - Q_2$

اگر شبکه راست فقط خازن باشد :



$Q = Q_1 - Q_2$

↳ کل

$P = P_1$

$\cos\phi_2$ ↳ $S = \frac{P}{\cos\phi_2} \Rightarrow Q = \sqrt{S^2 - P^2}$

* تعیین ظرفیت خازن

۱) $Q_C = Q_2 = Q_1 - Q_2$

↳ مقدار ظرفیت خازن بر حسب کیلو وار

۲) $Q_C = C\omega V^2 \Rightarrow C = \frac{Q_C}{\omega V^2}$

↳ مقدار ظرفیت خازن بر حسب فاراد

Subject:

Year Month Date ۹۷

روابط ولتاژ، جریان و توان در سیستم ۳ فاز:

ولتاژهای ۳ فاز:

$$v_{a(t)} = V_{m_a} \sin \omega t$$

$$v_{b(t)} = V_{m_b} \sin(\omega t - 120^\circ + 240^\circ)$$

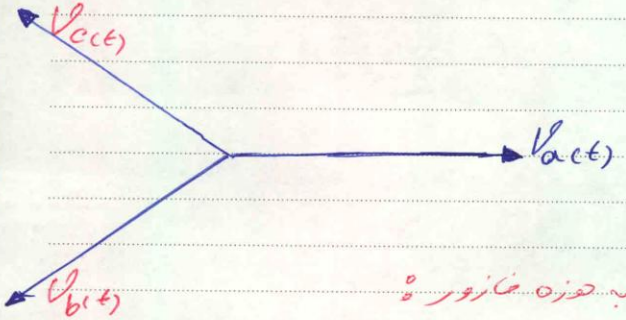
$$v_{c(t)} = V_{m_c} \sin(\omega t - 240^\circ + 120^\circ)$$

جریان‌های ۳ فاز:

$$I_{a(t)} = I_{m_a} \sin(\omega t - \phi)$$

$$I_{b(t)} = I_{m_b} \sin(\omega t - 120 - \phi)$$

$$I_{c(t)} = I_{m_c} \sin(\omega t - 240 - \phi)$$



تبدیل روابط به کمک حوزه فازور:

$$V_a = \frac{V_{ma}}{\sqrt{2}} \angle 0$$

$$V_b = \frac{V_{mb}}{\sqrt{2}} \angle -120 \text{ یا } +240$$

$$V_c = \frac{V_{mc}}{\sqrt{2}} \angle -240 \text{ یا } +120$$

CAPITAL

Subject:

Year..... Month..... Date..... ( )

$$\vec{I}_a = \frac{I_{ma}}{\sqrt{2}} \angle 0$$ فقط در مورد روابط جریان

$$\vec{I}_b = \frac{I_{mb}}{\sqrt{2}} \angle(-120 - \phi)$$

$$\vec{I}_c = \frac{I_{mc}}{\sqrt{2}} \angle(-240 - \phi)$$

توان های ۳ فاز:

$$P_{3\phi}(t) = V_a(t) I_a(t) + V_b(t) I_b(t) + V_c(t) I_c(t)$$

$$S_{3\phi} = (P_a + P_b + P_c) + j(Q_a + Q_b + Q_c)$$

CAPITAL

Subject:

Year..... Month..... Date..... (۱۱)

توان های ۳ فاز بر حسب ولتاژ و جریان خط به خط:
هم برای حالت ستاره و هم برای حالت مثلث

$$P_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_l I_l \cos\phi$$

$$Q_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_l I_l \sin\phi$$

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}\, V_l I_l$$

* در حالت ستاره:

$$V_{l-l} = \sqrt{3}\, V_{ph} \qquad "V_{ph} = V_a"$$

$$I_{l-l} = I_{ph}$$

* در حالت مثلث:

$$I_{l-l} = \sqrt{3}\, I_{ph}$$

$$V_{l-l} = V_{ph}$$

$$I_N = \vec{I}_a + \vec{I}_b + \vec{I}_c$$

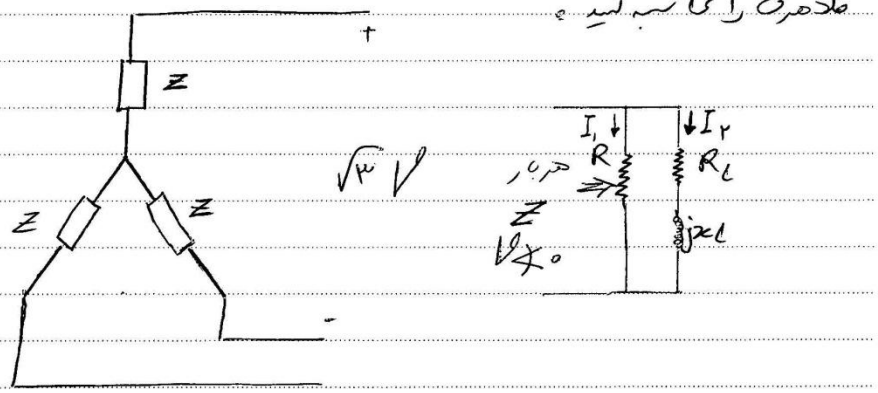
جریان سیم نول در ستاره:
در حالت متعادل $\Rightarrow I_N = 0$

در حالت متعادل:

$$\begin{cases} \vec{V}_{ph(a)} + \vec{V}_{ph(b)} + \vec{V}_{ph(c)} = 0 \\ \vec{V}_{l(a)} + \vec{V}_{l(b)} + \vec{V}_{l(c)} = 0 \end{cases}$$

CAPITAL

مثال: بار ۳ فاز R_L به صورت ستاره به ولتاژ ۳ فاز $\sqrt{3}V$ وصل شده است. بار هر فاز به صورت زیر می باشد. توان های مختلف، اکتیو و راکتیو و ظاهری را محاسبه کنید.



قدم اول: بدست آوردن جریان ها

$Z_1 = R$ ادمیتانس $Y = \frac{1}{R}$

$Z_2 = R_L + jx_L$ ~ $Y = \frac{1}{Z}$

$$I_1 = \frac{\vec{V_1}}{\vec{Z_1}} = \frac{V\angle 0}{R\angle 0} = \frac{V}{R}\angle 0$$

$$I_2 = \frac{\vec{V_2}}{\vec{Z_2}} = \frac{V\angle 0}{R_L + jx_L} = \frac{V\angle 0}{\sqrt{R_L^2 + x_L^2}\angle tg^{-1}\frac{x_L}{R}} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{V}{\sqrt{R_L^2 + jx_L^2}}\angle - tg^{-1}\frac{x_L}{R} \Rightarrow \phi = -tg^{-1}\frac{x_L}{R}$$

Subject:

Year ..... Month ..... Date ..... (۱۱۷

محاسبه توان هرکدام از شاخه‌ها:

$$\begin{cases} P_1 = V_1 I_1 \cos\varphi = V \frac{V}{R} \cos 0 = \frac{V^2}{R} \\ Q_1 = V_1 I_1 \sin\varphi = V \frac{V}{R} \sin 0 = 0 \\ S_1 = V_1 I_1 = P_1 + jQ_1 = P_1 + 0 \end{cases}$$

($\cos 0 = 1$ ، $\sin 0 = 0$)

$$\begin{cases} P_2 = V I_2 \cos\varphi = V \frac{V}{\sqrt{R_L^2 + x_L^2}} \cos\left(-tg^{-1}\frac{x_L}{R_L}\right) \\ Q_2 = V I_2 \sin\varphi = V \frac{V}{\sqrt{R_L^2 + x_L^2}} \sin\left(-tg^{-1}\frac{x_L}{R_L}\right) \\ S_2 = V I_2 = P_2 + jQ_2 \end{cases}$$

محاسبه توان‌های تک‌فاز:

$$P_{t(1\phi)} = P_1 + P_2$$

$$Q_{t(1\phi)} = Q_1 + Q_2$$

$$S_{t(1\phi)} = P_{t(1\phi)} + jQ_{t(1\phi)}$$

محاسبه توان‌های ۳ فاز:

$$P_{3\phi} = 3P_{1\phi}$$

$$Q_{3\phi} = 3Q_{1\phi}$$

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi} = 3S_{1\phi}$$

CAPITAL

Subject:

Year ..... Month ..... Date ..... (۱۴)

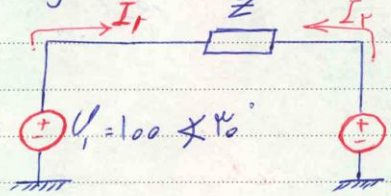
اگر $S = P + jQ$ موتور و ژنراتور توان اکتیو و راکتیو مصرف می‌کند

اگر $S = P - jQ$ " " " " راکتیو تولید می‌کند.

$P = V.I > 0$ مصرف ، $P = V.I < 0$ تولید

مثال : در شبکه قدرت زیر مشخص کنید کدام یک از ماشین‌ها به صورت موتور و کدام یک مولد می‌باشد.

$Z = 2 + j5$



* فرض می‌کنیم V_1 = مولد و V_2 = موتور

$$I_1 = \frac{V_1 - V_2}{Z} = \frac{100\angle 30 - 120\angle 0}{2 + j5} = 11{,}18 \angle 55{,}5^\circ$$

* فرض می‌کنیم V_1 : موتور و V_2 : مولد

$$I_2 = \frac{V_2 - V_1}{Z} = \frac{120\angle 0 - 100\angle 30}{2 + j5} = 11{,}18 \angle -124{,}45$$

* از دید جریان I_1

$$S_1 = -V_1 I_1^* = -(100\angle 30)(11{,}18 \angle -55{,}5) = 1009 - j481$$

منفی جلوی جریان ، علامت زاویه معکوس می‌گردد.

CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۱۵)

علامت منفی در S_1 به این خاطر است که در این حالت فرض کردیم P_1 مولد است. پس علامت منفی می گیرد

$$S_2 = +V_2 I_2^* = (۱۲۰ \angle ۰)(۱۱,۱۸ \angle -۵۵,۵) = ۷۹۰ - j ۱۱۰۵,۶$$

P_2 موتور پس علامت +

با توجه به توضیحات، فرض ما در خصوص جریان و P_1 و P_2 درست بوده است. P_1 مولد و P_2 موتور

* از دید جریان I_2:

$$S_1 = +V_1 I_2^* = (۱۰۰ \angle ۳۰)(۱۱,۱۸ \angle +۱۲۴,۵) =$$

توان راکتیو تولید

$$S_2 = -V_2 I_2^* = (۱۲۰ \angle ۰)(۱۱,۱۸ \angle +۱۲۴,۵) = -۷۹۰ + j ۱۱۰۵$$

توان راکتیو مصرف

فرض اول ما درست است. منفی قبل از رابطه را در نظر گرفتیم ولی جهت حقیقی آن هم باز منفی شد که باید + باشد

* سیستم پریونیت per unit

برای این سیستم ۴ پارامتر باید داشته باشیم.

ام مقدار پریونیت ← $pu = \frac{\text{مقدار واقعی}}{\text{مقدار مبنا}} = \frac{Actual}{Base}$

① $V_{pu} = \frac{V}{V_b}$ ② $I_{pu} = \frac{I}{I_b}$

② $Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{V_{pu}}{I_{pu}} = \frac{V_{pu}^2}{S_{pu}} = R_{pu} + jX_{pu}$

CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۱۴)

④ $S_{pu} = \frac{S}{S_b} = \frac{VI^*}{V_b I_b} = \frac{P+jQ}{S_b} = P_{pu} + j Q_{pu}$

$S_b = V_b \cdot I_b \qquad Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b^2}{S_b}$

در شبکه های قدرت معمولا به جای بیان مقادیر مقاومت، مقاومت آمپر، کیلو ولت و ... این مقادیر برحسب درصد یا نسبت به واحدی از یک مقدار مبنا برای هر یک از کمیت ها بیان می شود که دارای مزایای زیر است.

۱- به علت بزرگ بودن اعداد توان، ولتاژ و جریان در سیستم های قدرت، کار بر روی مقادیر پریونیت یا اعداد کوچک تر و مقادیر نسبی تحلیل بهتر و درک درست تری از کمیت ها می شود.

۲- تحلیل شبکه های قدرت با وجود سطوح مختلف ولتاژ و ترانس ها ساده تر می شود.

CAPITAL

Subject:

Year Month Date

نکته: اگر مقادیر مبنا در سیستم های قدرت تغییر کند پارامتر ها مجددا باید محاسبه شود.

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \left(\frac{sb^{new}}{sb^{old}}\right)\left(\frac{Vb^{old}}{Vb^{new}}\right)^2$$

مثال: یک ژنراتور تک فاز $S=10kVA$ ، $200V$ دارای اسپانس داخلی معادل 2Ω هم می باشد. ولتاژ نامی برحسب پریونیت را جهت ایجاد جریان نامی تحت شرایط اتصال کوتاه و با استفاده از کمیات نامی ژنراتور به عنوان مقادیر مبنا تعیین کنید. (SC اتصال کوتاه)

$$\left.\begin{array}{l} S_b = 10\ kVA \\ V_b = 200\ V \\ Z = 2\ \Omega \end{array}\right\} \quad V_{sc} = I_{sc} \cdot Z$$

$$Z_{pu} = \frac{Z}{Z_b} \Rightarrow Z_b = \frac{V_b^2}{Sb} = \frac{200^2}{10 \times 10^3} = \frac{40000}{10000} = 4$$

$$Z_{pu} = \frac{2}{4} = 0.5$$

$$I_{pu} = \frac{I}{I_b} = 1$$

چون در انتهای سوال ذکر شده کمیات نامی ژنراتور به عنوان مقادیر مبنا می باشند.

$$V_{sc} = I_{sc_{pu}} \times Z_{pu} = 1 \times 0.5 = 0.5\,(pu)$$

طبق اطلاعات مسئله جهت مقادیر ولتاژ و توان واقعی و مبنا یکسان در نظر گرفته شده. بنابراین می توان گفت مقدار مبنای جریان هم همان مقدار نامی خواهد بود. پس I_{pu} برابر یک است.

CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۱۳۹۷)

بنابراین ولتاژ لازم برای ایجاد جریان انتقال کوتاه یک پریونیتی برابر

۰٫۵ پریونیت خواهد بود پس $200 \times 0.5 = 100kV$ است.

انواع خطوط انتقال:

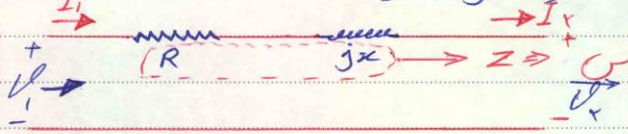
۱) کوتاه: به خطوطی گفته می‌شود که طول آن کمتر از ۸۰km باشد. $l < 80km$

۲) متوسط: اگر طول مسیر بین ۸۰ تا ۲۴۰ km باشد $80km < l < 240km$

۳) بلند: اگر طول مسیر از ۲۴۰km بیشتر باشد. $l > 240km$

۱) کوتاه:

در آنها از امپدانس موازی خط که مربوط به خازن های موازی خطوط می باشد صرف نظر می شود.



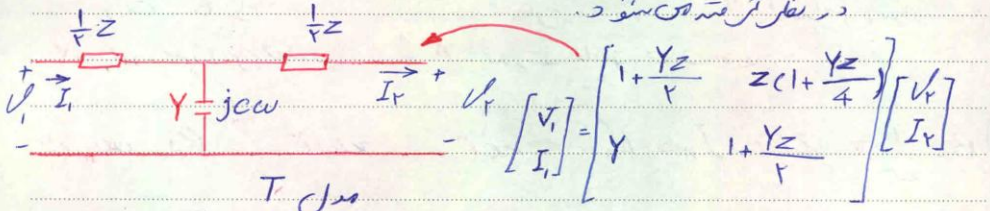
ابتدای خط — انتهای خط

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

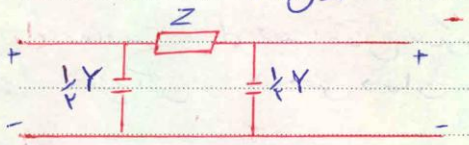
اگر $I_1 = I_2 \Rightarrow V_1 = V_2 + ZI_1$

CAPITAL

۲ - خط متوسط: به خطوطی که طول آنها بین ۸۰ تا ۲۴۰ Km بوده و در آنها پارامترهای سری خط و موازی خط بصورت متمرکز در نظر گرفته می‌شود.



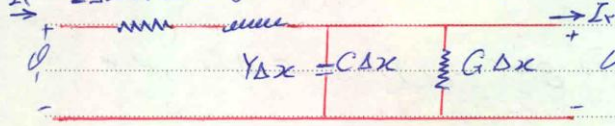
مدل T



مدل π یا I

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1+\frac{YZ}{2} & Z \\ Y\left(1+\frac{YZ}{4}\right) & 1+\frac{YZ}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$$

به خطوط با طول بیش از ۲۴۰ Km گفته می‌شود و در این خطوط می‌توان پارامترهای خط را به صورت متمرکز در نظر گرفت. در این خطوط پارامترها باید در طول خط تقسیم شوند و هر قسمت انتخابی Δx از خط به صورت زیر مدل می‌شود.



CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۲۵

مشخصات الکتریکی خطوط انتقال:

۱- مقاومت الکتریکی ۲- راکتانس سلفی ۳- راکتانس خازنی

۴- ولتاژ نامی ۵- جریان نامی ۶- امپدانس موجی

۷- توپولوژی خط ۸- قدرت طبیعی خط SIL

۱) R_{dc} ۲) X_L ۳) X_C ۴) I_n ۵) V_n ۶) Z_L ۷) $B = \frac{1}{X_C}$

۱) مقاومت dc خط انتقال سیمی به جنس هدی، طول هادی و سطح مقطع آن و همچنین دمای هادی دارد، با توجه به افزایش دما مقدار آن تغییر می کند $T \uparrow \Rightarrow R \uparrow$

$R = \rho \frac{l}{A}$ ↓ مقاومت ویژه

$R_{t_2} = R_{t_1} \frac{t_2 + T}{t_1 + T}$ دمای ثابت

۱) مقاومت AC خطوط انتقال که مقاومت موثر هم خوانده می شود سیمگی به توان تلف شده و جریان موثر مقاومت و همچنین سیمگی به جنس، حرارت، طول و سطح مقطع و فرکانس نیز دارد.

$R = \frac{P}{|I^2|}$

CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۲۷)

نکته: مقاومت AC بنابر دلایل زیر از مقاومت DC بیشتر است.

۱) اثر پوستی (skin effect)

۲) جریان فوکو یا گردابی (Eddy Current)

۳) اثر مجاورت هادی ها (proximity)

۱) در هنگام عبور الکترون ها از سیم ها یا هادی ها میل حرکت الکترون از پوسته هادی ها بیشتر است و به علت عبور الکترون ها از پوسته خارجی هادی ها، عملاً مرکز هادی بلا استفاده می ماند و همین امر موجب افزایش مقاومت سیم عبور الکترون ها و افزایش تلفات خط می شود.

برای کاهش اثر پوستی هادی ها را می توان به جای مفتولی به صورت رشته های جدا از هم ساخت که به یکدیگر تابیده شوند مانند سیم ACSR

CAPITAL

Subject:

Year Month Date (۲۲/

جریان گردابی: با عبور جریان AC متغیر با زمان، شار متغیر با زمانی ایجاد می‌شود که اگر از مواد فرو مغناطیس مانند هادی‌ها عبور کند باعث ایجاد ولتاژ القایی $e = -N\frac{d\Phi}{dt}$ شده و به‌علت اینکه مسیر آن بسته می‌باشد باعث ایجاد جریانی به نام جریان گردابی یا فوکو یا Eddy می‌شود. این جریان گردابی با عبور از مقاومت الکتریکی هادی، منجر به ایجاد تلفاتی به نام فوکو می‌شود که از طریق روابط زیر قابل محاسبه است.

$$P_f = RI_f^2$$

$$P_f = KB^2 f^2$$

اثر پوستی: اثر پوستی در هادی‌های نزدیک به هم باعث کاهش خازنی جریان در هادی‌های مجاور می‌گردد که علت آن نزدیکی هادی‌ها و شار پیوندی مغناطیسی می‌باشد در خطوط هوایی از اثر مجاورت صرف نظر می‌شود ولی در کابل‌های زیر زمینی و رشته‌ای، اثر آن قابل ملاحظه است.

CAPITAL