Subject: جلسه اول

Year. Month. ۷ Date. ۴ ( )

به نام خدا ۹۰/۰

Electric Power System Analysis : I بررسی سیستم‌های قدرت

مرجع: Elements of power System — Stevenson

Power System Analysis — H. Saadat

Power System Analysis & design — Glover

II , I بررسی سیستم‌های قدرت — احد کاظمی

Introduction to Electric Energy Systems theory — Elgerd

Modern Power System Analysis — Nagrath — ترجمه: دکتر عابدی

در این درس ما سیستم های قدرت را در شرایط نرمال بررسی می کنیم.

شرایط غیر نرمال مثلاً وقوع اتصال کوتاه

از کلید زنی نوعی اغتشاش خواسته است و ما از آن در این درس صرف نظر می کنیم.

بررسی سیستم های قدرت در شرایط نرمال (عادی)

المانهایی که وظیفه تولید، انتقال و توزیع انرژی را بر عهده دارند.

فصل اول ـ کلیات

فصل دوم ـ یادآوری بحث‌های الکتریکی

فصل‌های سوم و چهارم ـ محاسبه پارامترهای خطوط انتقال و توزیع

فصل پنجم ـ مدل سازی خطوط

فصل ششم ـ مدل‌سازی ژنراتور، ترانس و بارهای مصرفی

فصل هفتم ـ ماتریس ادمیتانس و امپدانس شبکه

فصل هشتم ـ پخش بار (حل شبکه) Laad Flow

فصل نهم ـ پخش بار اقتصادی Economic Laad Dispatch

PAPCO
www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

فصل اول:

اهمیت انرژی الکتریکی:

کنترل آسان

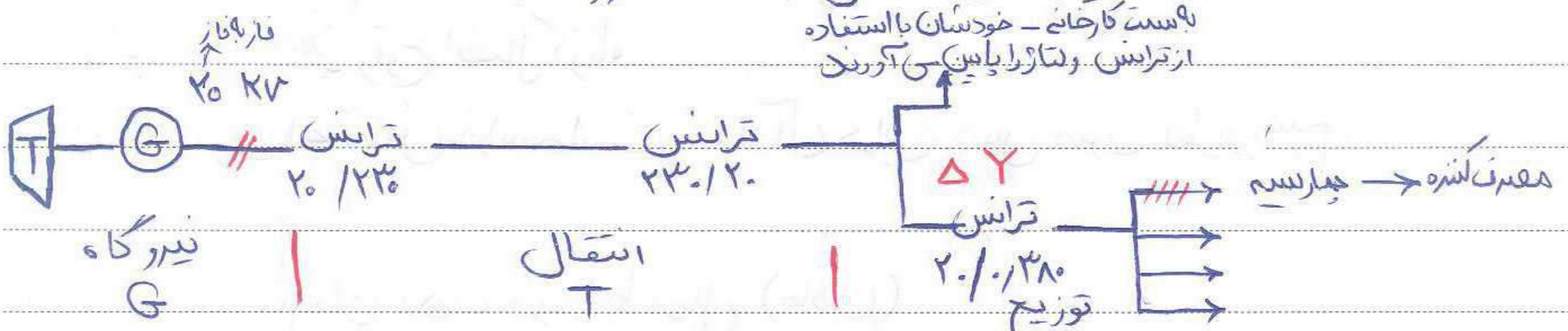
سهولت در انتقال

سهولت در تبدیل به انواع انرژی

آلودگی محیط زیست کمتر

تعریف سیستم قدرت الکتریکی:

مجموعه ابزاری هستند که وظیفه تولید، انتقال و رساندن انرژی به دست مصرف کننده را برعهده دارند



شکل فوق یک سیستم قدرت ساده است.

اجزای سیستم قدرت:

ژنراتور سنکرون سه فاز

ترانسفورماتور قدرت

خطوط انتقال انرژی

مصرف کننده

هدف از تحلیل سیستم قدرت:

چگونه تحلیل کنیم؟

هدف از تحلیل سیستم قدرت پیدا کردن متغیر یکسری کمیت حاد شبکه است. زیرا می خواهیم ببینیم آیا این پارامترها در محدوده مجاز هستند یا خیر.

www.iran-ieee.com

یکی از مهمترین این کمیت‌ها ولتاژ گره‌های مختلف است.

بنابراین ما نیاز داریم یک سیستم قدرت را هم در مرحله نگهداری و هم توسعه باید تحلیل کنیم.

به منظور تحلیل سیستم قدرت، آن را به یک مدار الکتریکی تبدیل کرده و سپس مدار حاصله را تحلیل می‌کنیم.

به منظور تحلیل مدار می‌توان از دو روش گره‌مش استفاده کرد. البته با توجه به اینکه مصرف کننده‌ها معمولاً به صورت موازی اضافه می‌شود، ما معمولاً از روش گره استفاده می‌کنیم.

رشد سیستم‌های قدرت :

* ایجاد خطوط انتقال با سطوح ولتاژ بالاتر علت : ۱- کاهش تلفات، با افزایش ولتاژ جریان کم شده و در نتیجه تلفات که برابر با $P = RI^2$ کاهش پیدا می‌کند. ۲- افت ولتاژ هم کم می‌شود. $\Delta V = ZI$

۳- ظرفیت انتقال خط هم بالا می‌رود. (ظرفیت انتقال با مجذور ولتاژ متناسب است)

با میزانی که خواهیم ظرفیت انتقال را زیاد کنیم، باید ولتاژ را هم بالا ببریم.

LV ⟵ ۳۸۰ V / ۲۲۰ V شبکه توزیع ضعیف

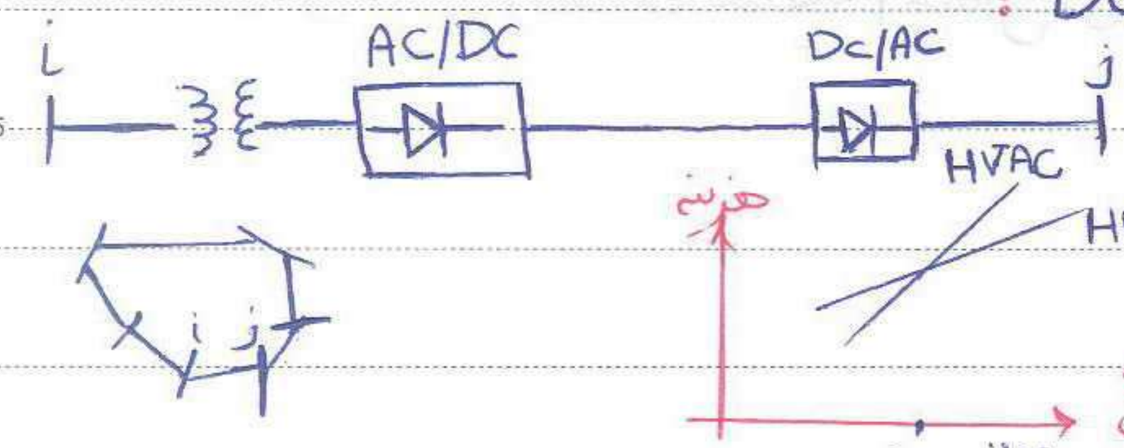
MV ⟵ ۲۰ kV " " متوسط

HV ⟵ ۱۳۲ kV, ۲۳۰ kV, ۴۰۰ kV " " قوی

EHV ⟵ > ۴۰۰ kV

UHV ⟵ > ۷۰۰ kV

* HVDC : خطوط انتقال ولتاژ بالای DC :



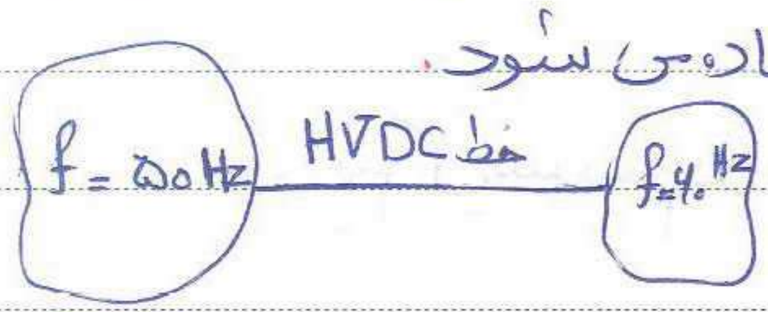
علت : ۱) اقتصادی : احداث خط DC کمتر از خط AC است.

بنابراین در مسافت‌های طولانی از خط HVDC استفاده می‌شود.

Subject:

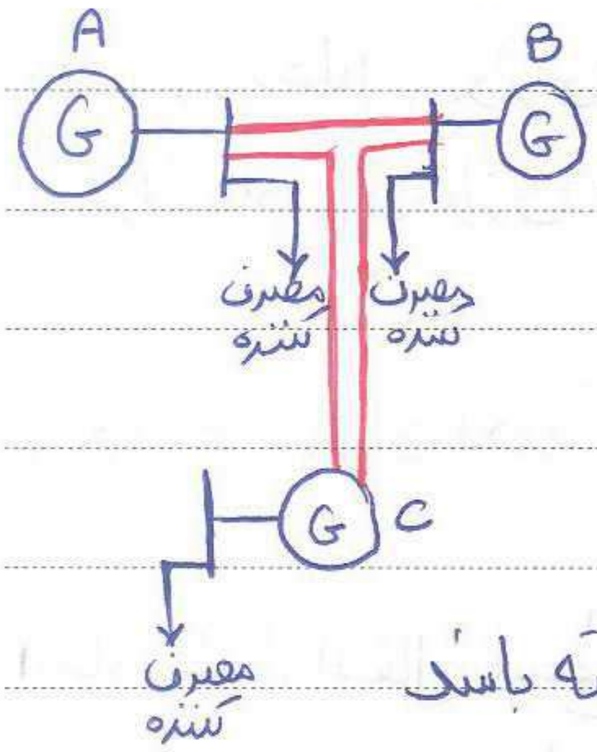
Year. Month. Date. ( )

۱۲) دو کشور که دارای برق با فرکانس متفاوت هستند می خواهند برای انتقال انرژی به یکدیگر متصل شوند. در محل این اتصال از خطوط HVDC استفاده می شود.



* شبکه به هم پیوسته:

در ابتدا نیروگاهها مستقل از هم عمل می کردند و هرکدام از نیروگاهها وظیفه تأمین انرژی یک منطقه خاص را برعهده دارد. اما امروزه شبکه ها به هم متصل شده و یک شبکه سراسری را بوجود آورده اند.



* افزایش قابلیت اطمینان

در شکل مقابل اگر مشکلی برای هرکدام از نیروگاهها بوجود آید، سایر نیروگاهها می توانند به طور موقتی از خاموشی مصرف کننده های آن نیروگاه جلوگیری کنند.

* کاهش سطح رزرو: هر نیروگاهی باید مقداری توان رزرو داشته باشد تا در صورت لزوم آن را آزاد کند.

این سطح رزرو باید در روزهای خاص یا در هنگام نبک بار استفاده شود.

و قتی نیروگاهها مستقل هستند باید یک سطح رزرو داشته باشند، اما هنگام پیوستگی نیروگاهها می توانند از سایر نیروگاهها انرژی دریافت کرده و سطح رزرو را پایین بیاورند.

* تبادل انرژی بین نیروگاهها یا کشورها:

یک نیروگاه می تواند انرژی را از سایر نیروگاهها دریافت کند. امکان دارد این انرژی از انرژی تولیدی نیروگاه خودی نیز کمتر باشد.

مشکل: با ارتباط شبکه ها، شبکه ها پیچیده تر می شوند و در صورت بروز اغتشاش کل سیستم دچار حادثه می شود و حفاظت سیستم مشکل تری شود.

P4PCO
www.iran-ieee.com

Subject: جلسه دوم

Year. Month. ۷ Date. ۶ ( )

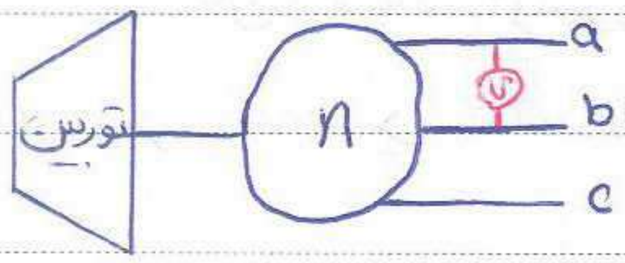
تولید انرژی الکتریکی:

← فرکانس مناسب با دور ژنراتور است.

ژنراتور سنکرون سه فاز هر نوع از این ژنراتورها با دو کمیت مشخص می شوند:

مثلاً: ۱۵۰ MVA - ۲۴ kV

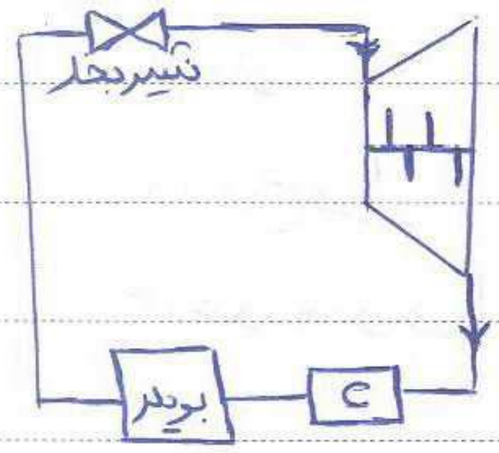
ولتاژ خطی (خط - خط)
ولتاژ فازی (خط - نول)



توربین بخاری
" آبی → نیروگاه آبی
" گازی

نیروگاههای آبی:

جغتا تأمین کننده محل آن جغرافیا آلودگی ایجاد نمی کنند. ← هزینه سوخت ندارند
آب و هوا
سریع وارد مداری شوند و زمان لازم ندارند. برخلاف نیروگاههای حرارتی که برای بخار کردن آب زمان لازم دارند. هزینه احداث بیشتری دارند و زمان بیشتری برای احداث نیاز دارند.



نیروگاه حرارتی:

وابسته به شرایط جغرافیایی نیستند و اگر سوخت آنها تأمین شود به هر میزان می توانند تولید داشته باشند. سوخت هزینه داشته و آلودگی محیط زیست ایجاد می کند. سوخت آنها نسبی است و رو به اتمام است. دیر تر وارد مداری شوند. ورود دوباره آنها به مدار همراه با هزینه است. سهم عمده ای در تولید برق دارند.

نیروگاههای گازی:

برق تولیدی آن گران است. سریع وارد مدار می شوند. سهم اندکی از تولید برق را برعهده دارند.

منابع حرارتی برای تبدیل آب به بخار:

۱) زغال سنگ ← آلودگی محیط زیست در تمام مراحل استخراج تا مصرف دارند.

۲) نفت و گاز طبیعی ← بهتر می سوزند و آلودگی کمتری دارند اما چون در صنایع دیگری توان از آن استفاده ی بهتری کرد، کمتر از آن جهت تولید حرارت استفاده می شود.

۳) فعل و انفعالات هسته ای ← استفاده از اورانیوم جهت انجام شکافت هسته ای: Fission

carbon: ۱۰۰ gr → ۱ kWh تولید

$U^{۲۳۸}$: ۱۰۰ gr → ۲,۳۰۰,۰۰۰ kWh تولید

PAPCO
www. iran-ieee .com

Subject :

Year . Month . Date . ( )

← ترکیب انرژی‌های هیدروژن ← ترکیب هسته‌ای : Fusion

این نوع انرژی دیگر قابل کنترل نیست و این باعث می‌شود نتوان از آن در نیروگاه استفاده کرد.

۴) حرارت داخل زمین : در برخی مناطق اگر در عمق زمین برویم به سنگ‌های گداخته می‌رسیم و می‌توان آب سرد را تزریق کرد و از طرف دیگر آب گرم را دریافت نمود.

۵) گازدایی از فاضلاب و سوزاندن زباله :

۶) انرژی خورشیدی : استفاده در نیروگاه‌های غیر خورشیدی

منابع غیر حرارتی :

۱) آب

۲) باد

۳) امواج دریا

۴) جذر و مد دریا

منابع انرژی {
تجدید پذیر ← خورشید
تجدید ناپذیر ← سوخت‌های فسیلی

فرآیند عمومی اینست که تا حد امکان از انرژی‌های تجدید پذیر استفاده شود.

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

فصل دوم: یادآوری مفاهیم و کمیت‌های الکتریکی:

- جریان AC

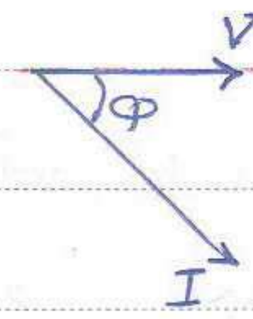
سیستم قدرت در شرایط عادی:

مقدار موثر

$v = V_m \sin\omega t = \sqrt{2}\,|V| \sin\omega t$ $\quad V = |V| \angle 0$: نمایش فازوری

$i = I_m \sin(\omega t - \varphi) = \sqrt{2}\,|I| \sin(\omega t - \varphi)$ $\quad I = |I| \angle -\varphi$: نمایش فازوری

ولتاژ را معیار گرفتیم و این یعنی جریان از ولتاژ به اندازه φ عقب‌تر است.



Ref

ضریب توان - ضریب قدرت $= \cos\varphi$

نمایش برداری:

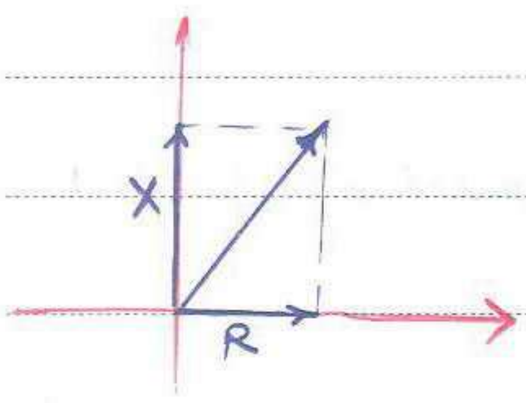
در اینجا جریان پس فاز است و اگر جریان جلوتر باشد آنگاه می‌گوییم جریان پیش فاز است.

امپدانس (Z) $Z = \dfrac{V}{I} = \dfrac{|V| \angle \theta_1}{|I| \angle \theta_2} = |Z| \angle \theta$

ohm

مقاومت اهمی

$Z = |Z|\cos\theta + j|Z|\sin\theta = R + jX$ ← راکتانس { سلفی $X > 0$ ، خازنی $X < 0$



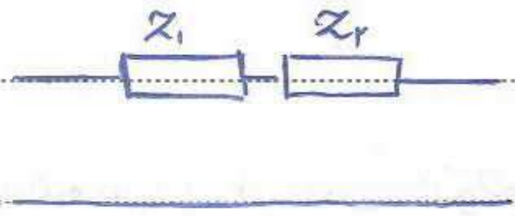
$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}$, $\theta = \tan^{-1}\dfrac{X}{R}$

ادمیتانس $Y = \dfrac{I}{V} = \dfrac{|I| \angle \theta_1}{|V| \angle \theta_2} = |Y| \angle \theta$

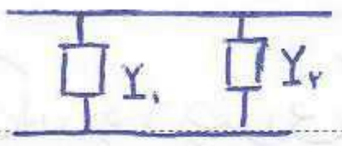
mho

کوندوکتانس

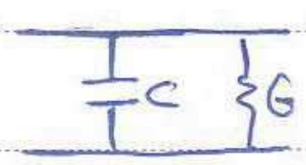
$Y = |Y|\cos\theta + j|Y|\sin\theta = G + jB$ ← سوسپتانس



$Z = Z_1 + Z_2$

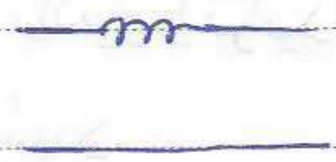


$Y = Y_1 + Y_2$



$B = C\omega$

$Y = G + jB$



$X = L\omega$

$Z = jX$

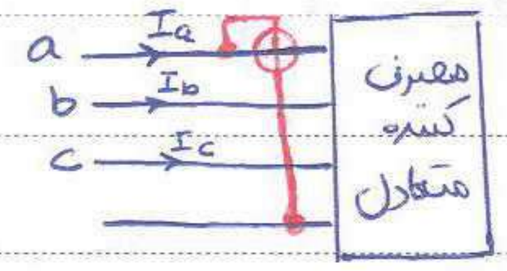
PAPCO

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

محاسبه توان:



$I_a = |I| \angle 0$

$I_b = |I| \angle -120$

$I_c = |I| \angle 120$

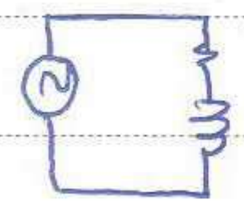
در این جا توان یک فاز را حساب کرده و در ۳ ضرب می‌کنیم.

$P = vi = \sqrt{2}|V| \sin\omega t \times \sqrt{2}|I| \sin(\omega t - \varphi)$

$P = |V||I| \cos\varphi$ توان اکتیو - حقیقی W , kw, Mw

$Q = |V||I| \sin\varphi$ توان راکتیو var , Kvar, Mvar

علامت توان:



$P = |V||I| \cos\varphi = R|I|^2$

$Q = |V||I| \sin\varphi = X|I|^2$

اگر جریان از ولتاژ عقب‌تر باشد ← مصرف کننده توان راکتیو مصرف می‌کند. $P>0$, $Q>0$ ⇐ مصرف کننده سلفی

// // هم فاز با ولتاژ باشد ← توان راکتیو نه مصرف نه تولید می‌شود. $P>0$, $Q=0$ ⇐ مصرف کننده مقاومتی

اگر جریان از ولتاژ جلوتر باشد ← مصرف کننده توان راکتیو تولید می‌کند. $P>0$, $Q<0$ ⇐ مصرف کننده خازنی

توان مختلط:

$S = P + jQ$

$S = |S| \angle\varphi$, $|S| = |V||I|$

مثلاً ⇐ $S_D = 10 + j5$ VA ⇐ 10 وات توان اکتیو مصرف و 5 وار توان راکتیو مصرف می‌کند.

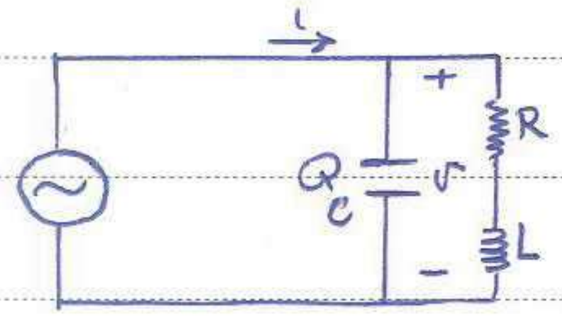
(منظور مصرف کننده است.)

مثلاً ⇐ $S_D = 10 - 5j$ VA ⇐ 10 وات توان اکتیو مصرف و 5 وار توان راکتیو تولید می‌کند.

هنگامی که بار سلفی است در بیرو کاه باید خصلت خازنی داشته باشیم تا توان سلفی مورد مصرف را خازن‌ها تولید کنند.

به همین دلیل است که توصیه می‌شود خود مصرف کننده در صورتی که خاصیت سلفی دارد خود مصرف کننده خازنی سر راه قرار دهد تا بتواند خود توان راکتیو را تولید کند.

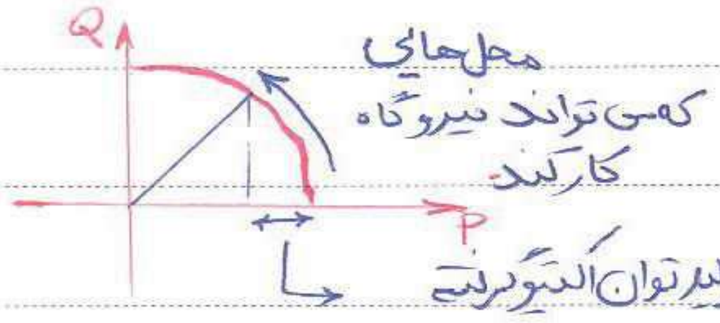
یعنی کارخانه باید کاری کند که C و L با هم خنثی شوند.



PAPCO

www.iran-ieee.com

نیروگاه ظرفیت خاصی دارد و این توان می‌تواند هم به صورت اکتیو و هم راکتیو و هم هردو تولید کند.



اگر خودکار خانه خاصیت سلفی یا خازنی خود را از بین ببرد، آنگاه دیگر هزینه فرصت را نمی‌دهد.

در زمینه علامت، فرض ما بر اینست که در مورد مصرف کننده صحبت می‌کنیم.

در مصرف کننده همواره $P_D > 0$ است اما Q_D می‌تواند حالات مختلفی داشته باشد. $S_D = P_D + j Q_D$

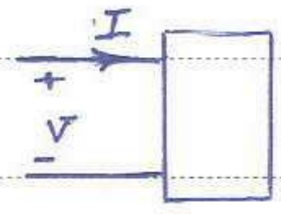
P_G همواره مثبت است. $Q_G > 0$ ← تولید توان راکتیو

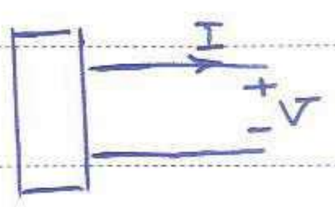
$Q_G < 0$ ← مصرف توان راکتیو

$S_G = P_G + j Q_G$ ← مولد

تولید کننده

مصرف کننده



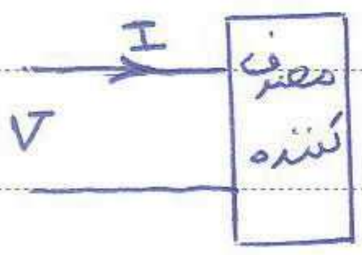


بهترین فرمول برای محاسبه توان:

$S = VI^* = P + jQ$

P4PCO
www.iran-ieee.com

علامت توان راکتیو:



I عقب‌تر از V، مصرف‌کننده‌ٔ سلفی $S = 100 + j\,50$

I جلوتر از V، مصرف‌کننده خازنی $S = 100 - j\,50$

مصرف‌کننده خازنی توان راکتیو تولید و مصرف‌کننده سلفی توان راکتیو مصرف می‌کند.

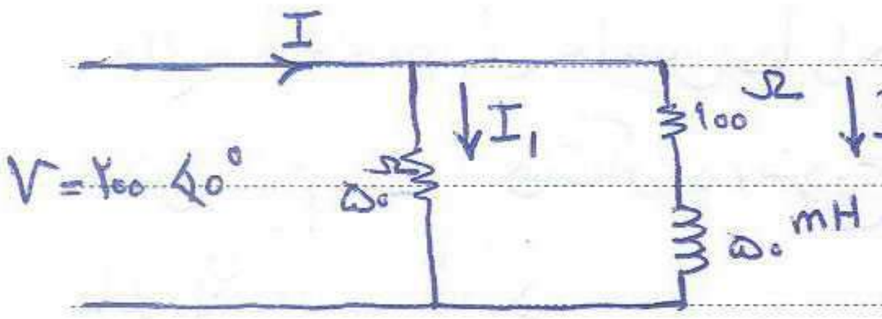
$S = VI^*$

مثلاً $\Rightarrow \begin{cases} V = 100 \angle 0^\circ \\ I = 10 \angle -30^\circ \end{cases} \rightarrow S = 1000 \angle 30^\circ = 1000\cos 30 + j\,1000\sin 30$

$\rightarrow S = 866 + j\,500$ همانطور که انتظار داشتیم مصرف‌کننده توان راکتیو مصرف می‌کند.

توان مصرفی مجموعه مقابل را بدست آورید.

در مدار مقابل ضریب قدرت را حساب کنید. چگونه آن را اصلاح کنیم.

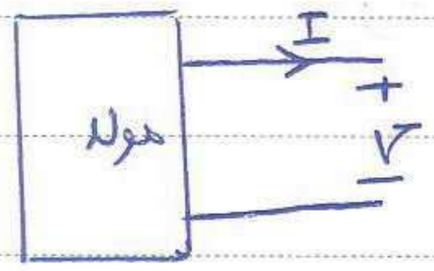


$$I_1 = \frac{200 \angle 0}{50} = 4 \angle 0^\circ \ A$$

$$I_2 = \frac{200 \angle 0}{100 + j\,2\pi(50)(50)(10^{-3})} \Rightarrow I_2 = \frac{200 \angle 0}{100 + j\,15}$$

بهترین راه اینست که I را به دست آورده و از فرمول $S = VI^*$، توان راکتیو را بدست می‌آوریم.

www.iran-ieee.com



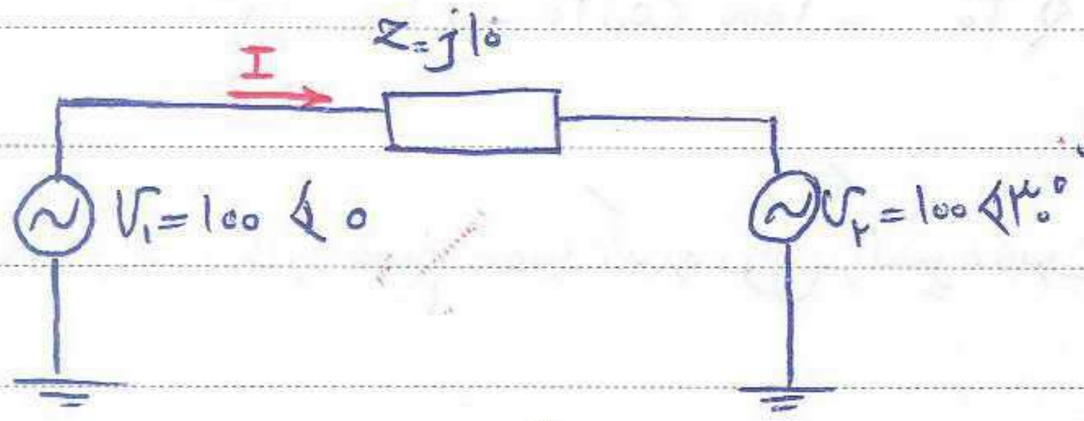
$S_G = P + jQ$

$P > 0 \Rightarrow$ تولید توان اکتیو

$Q < 0 \Rightarrow$ مصرف توان راکتیو

$Q > 0 \Rightarrow$ تولید توان راکتیو

مولد مورد توان اکتیو همواره تولید می‌کند اما مولدی توان توان راکتیو تولید، مصرف ریا نا تولید و مصرف کند. بستگی به بار دارد.



مثال: دو ماشین با یک امپدانس به هم وصل شده اند.

حال می خواهیم توان ماشین ها را حساب کنیم. اولین قدم این است که فرض کنیم جریان I باچه جهتی خواهیم. I را بدست آورده، مزدوج می کنیم و در V_1 ضرب می کنیم. اگر انتخاب جهت I درست باشد باید P_1 مثبت باشد.

سپس S_2 را حساب می کنیم. در اینجا حتماً $P_2 > 0$ است زیرا قبلاً اثبات کردیم که V_2 مصرف کننده است.

اگر نمیدیم که جهت I چه بوده است می توانیم راه حل را ادامه دهیم فقط I را باید در یک منفی ضرب کنیم.

در مورد موتور اگر $Q_2 < 0$ باشد آنگاه موتور سنکرون است.

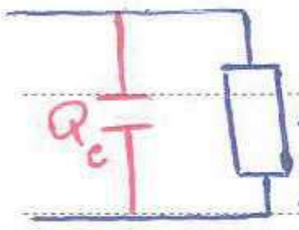
موتور آسنکرون همیشه سلفی بوده و $\cos\theta$ آنها پس فاز است.

الف) محاسبه توان (توان مختلط) ماشین ها

ب) مشخص کردن تولید یا مصرف

ج) بررسی تعادل توان ← همیشه در یک مدار باید بین توان اکتیو تولیدی و مصرفی و توان راکتیو تولیدی و مصرفی تعادلی برقرار باشد ← جمع جبری توان های اکتیو و جمع جبری توان های راکتیو صفر است.

www.iran-ieee.com



فرض کنیم مصرف کننده‌ای مانند مقابل داریم که دارای $Q>0$ شده است.

$$\tan\varphi = \frac{Q}{P} \Rightarrow Q = P\tan\varphi$$

مثلاً $\Rightarrow \begin{cases} P = 500\ kW \\ \cos\varphi = 0.8 \end{cases} \Rightarrow Q = 500 \tan 0.8$

اگر بار مقاومتی باشد $\cos\varphi = 1$ بوده و $\tan\varphi = 0$ بنابراین $Q = 0$

در بعضی مصرف کننده ها کنتری داریم که هم P و هم Q را محاسبه کرده و هزینه‌ی هردو از مصرف کننده دریافت می‌شود. در این مصرف کننده ها $\cos\varphi$ از ۱ فاصله می‌گیرد. در این موارد مصرف کننده با گذاشتن خازن $\cos\varphi$ را اصلاح کرد و در حدود ۱ می‌برد. حال می‌خواهیم Q_c را محاسبه کنیم.

$$\left.\begin{aligned} Q_1 &= P\tan\varphi_1 \\ Q_2 &= P\tan\varphi_2 \\ Q_c &= Q_2 - Q_1 \end{aligned}\right\} \Rightarrow Q_c = P(\tan\varphi_2 - \tan\varphi_1)$$

$$\left.\begin{aligned} \cos\varphi_1 &= 0.8 \\ \cos\varphi_2 &= 0.95 \end{aligned}\right\} \Rightarrow Q_c = -209\ kvar$$

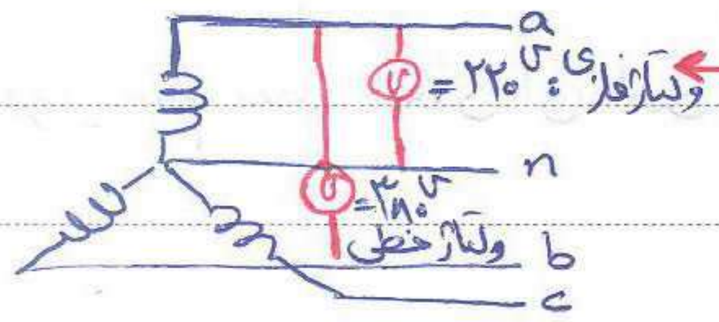
$$Q_c = B|V|^2 = 2\pi fc|V|^2 \Rightarrow 209\times 10^3 = 2\pi\times 50\, C\,|200|^2 \Rightarrow C$$

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

* در تراس مصرف کننده، ثانویه بصورت ستاره بسته می شود تا نول تولید شود.



مدارهای سه فاز:

مدارهای سه فاز:
- ۳ سیمه: نیروگاه - خطا انتقال (a, b, c)
- ۴ سیمه: مصرف کننده نشار ضعیف (a, b, c, N)

نمایش لحظه ای ولتاژها:

a ——— $V_a = V_m \sin \omega t$

b ——— $V_b = V_m \sin (\omega t - 120)$

c ——— $V_c = V_m \sin (\omega t + 120)$

N ———

V_b به اندازه 120° از V_a عقب تر است.

V_c به اندازه 120° از V_a جلوتر است.

علت استفاده از ژنراتور سه فاز: اگر بخواهیم ژنراتور تک فاز داشته باشیم از تمام فضای روتور استفاده نمی شود، به همین دلیل از ژنراتور سه فاز استفاده می کنیم که در آن هر 120° را به یک فاز اختصاص داده و در نتیجه از کل فضای 360° روتور استفاده می شود.

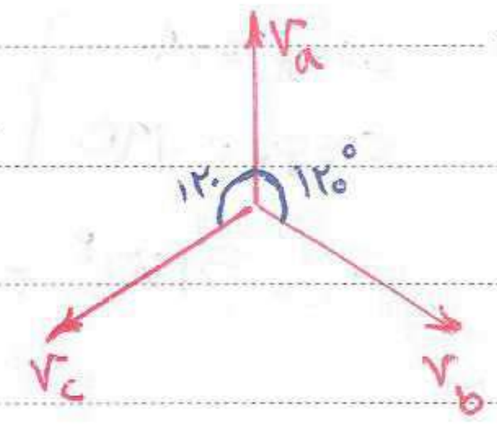
ولتاژ خطی	ولتاژ فازی
V_{ab}	V_{an}
V_{ac}	V_{bn}
V_{bc}	V_{cn}

نمایش فازوری:

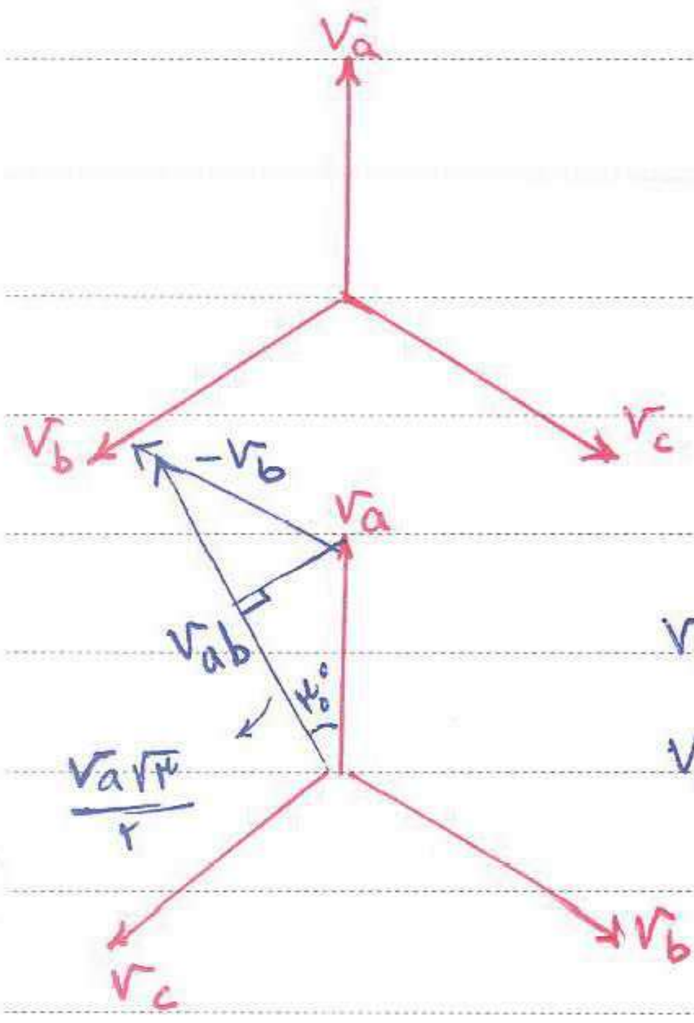
$V_a = |V| \angle 0$

$V_b = |V| \angle -120$

$V_c = |V| \angle 120$



در توالی abc، b از a عقب تر و c از b عقب تر است.



شکل مقابل توالی acb است یعنی c از a و b از c عقب تر است.

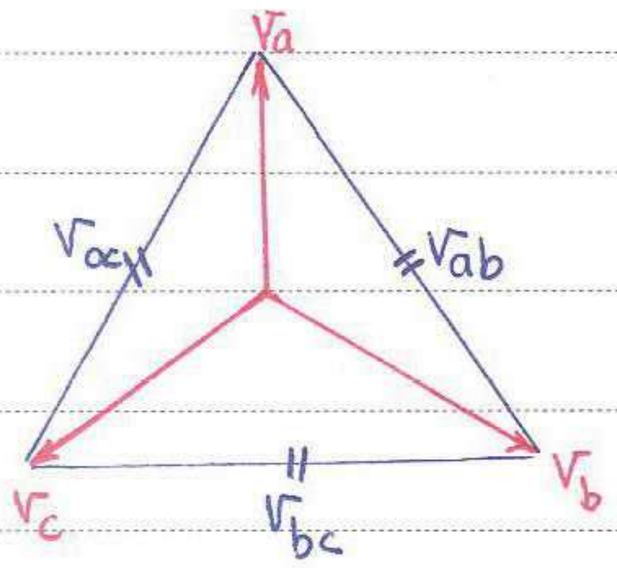
$V_{ab} = \sqrt{3}\, V_a$

$V_{ab} = \sqrt{3}\, V_a \angle 30^\circ$ ⟸ ولتاژ V_{ab} به اندازه 30° از V_a جلوتر است

P4PCO
www.iran-ieee.com

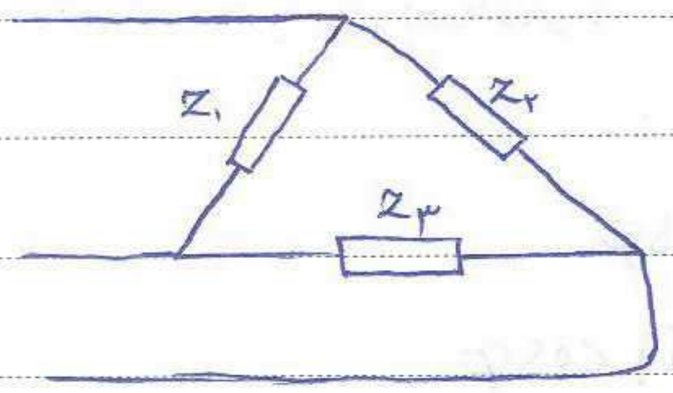
Subject :

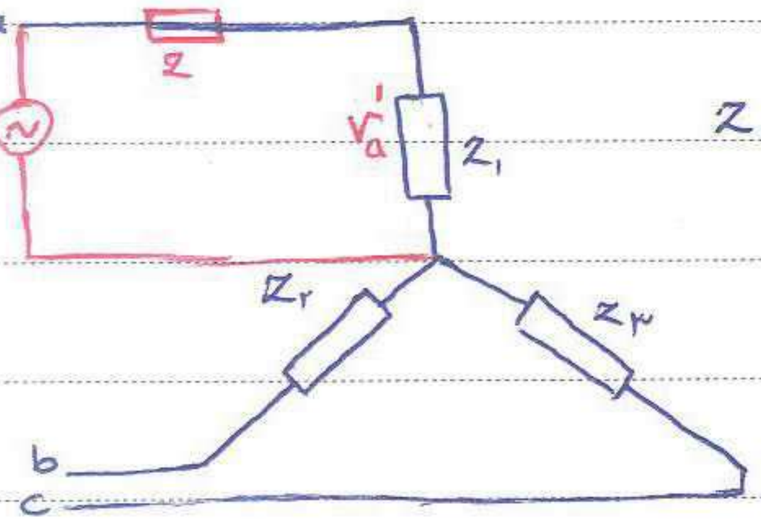
Year . Month . Date . ( )



iran-ieee .com

اتصال ستاره-مثلث:





$Z_1 = Z_2 = Z_3$

منبع ولتاژ متعادل $\Rightarrow$ $\begin{cases} V_a = |V| \angle 0 \\ V_b = |V| \angle -120 \\ V_c = |V| \angle 120 \end{cases}$ $\xrightarrow[\text{متعادل}]{\text{به طور}}$ $\begin{cases} V_a = |V| \angle \alpha \\ V_b = |V| \angle \alpha - 120 \\ V_c = |V| \angle \alpha + 120 \end{cases}$

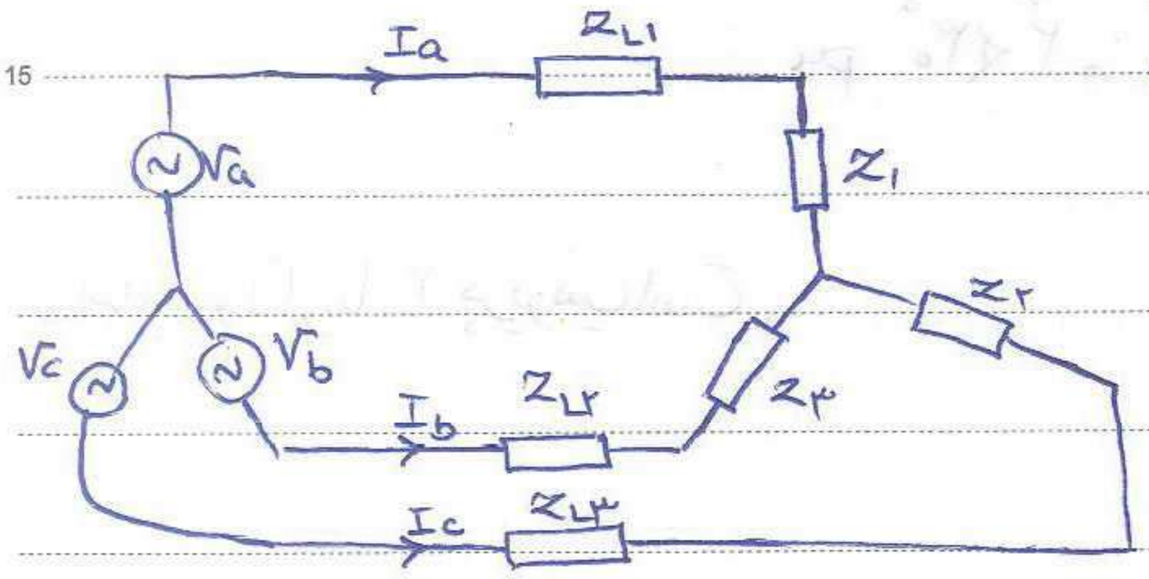
چون سیستم را متعادل فرض کرده ایم می توانیم با به دست آوردن جریان در یک فاز، جریان فازهای دیگر را نیز تعیین کنیم.

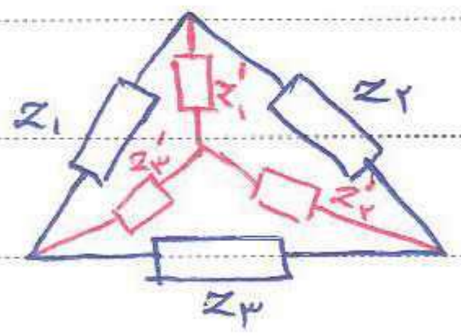
$$I_a = \frac{V_a - V'_a}{Z}$$

$$I_b = |I_a| \angle \varphi_a - 120$$

$$I_c = |I_a| \angle \varphi_a + 120$$

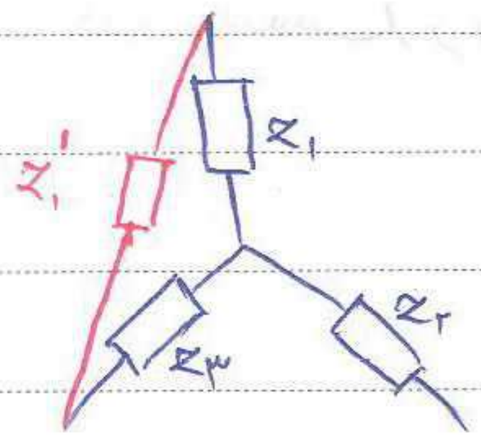
مدار متقابل را که نامتعادل است، با روش گره یا مش حل می کنیم.





$$Z'_1 = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_3}$$

$$Z_Y = \frac{ZZ}{3Z} = \frac{Z_\Delta}{3}$$



$$Z'_1 = Z_1 + Z_3 + \frac{Z_1 Z_2}{Z_2} = \frac{Z_1 Z_2 + Z_3 Z_2 + Z_1 Z_3}{Z_2}$$

$$Z_\Delta = 3 Z_Y$$

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

محاسبه توان در مدار سه فاز:

فازی

$$P = 3|V||I|\cos\varphi$$

$$P = \sqrt{3}\sqrt{3}|V||I|\cos\varphi$$

خطی

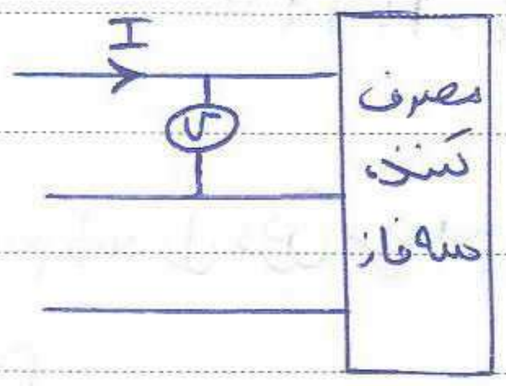
$$P = \sqrt{3}|V||I|\cos\varphi$$

$$Q = \sqrt{3}|V||I|\sin\varphi$$

ظاهری $S = \sqrt{3}|V||I|$

مختط $S = \sqrt{3}\,V I^*$

فازور



Perunit Systems

نسبت به واحد:

پریونیت

$$V = 200\angle 30^\circ \text{ ولت} \quad \left.\begin{array}{l} \\ V_{base} = V_b = 100 \text{ ولت} \end{array}\right\} \Rightarrow \frac{200\angle 30^\circ}{100} = 2\angle 30^\circ \text{ pu}$$

بنابراین ولتاژ ما ۲ پریونیت است

$$\text{تبدیل به پریونیت} = \frac{\text{مقادیر واقعی}}{\text{مقدار مبنا}}$$

$$I = 100\angle -60^\circ \text{ A} \quad \left.\begin{array}{l} \\ I_B = 200 \text{ A} \end{array}\right\} \Rightarrow I = 0.5\angle -60^\circ$$

مقادیر مبنا فازور نیستند و زاویه نداشته و فقط دارای اندازه می باشند

PAPCO

www.iran-ieee.com

چون کمیت‌ها باهم در ارتباط‌اند بنابراین لازم نیست برای همه مبنا تعریف کنیم، یعنی :
با داشتن مبنا برای کمیت‌های زیر می‌توانیم سایر کمیت‌ها را پریونیت کنیم :

V_b → در کمیت‌های مقابل نیز می‌توانیم با تعریف مبنا
I_b $I_b = \frac{S_b}{V_b}$ برای دو متغیر مشخصه، مبنای سایر متغیرها را
S_b → بدست آوردیم.
Z_b $Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$ متداول است که با انتخاب متغیرهای روبرو
Y_b $Y_b = \frac{1}{Z_b}$ کمیت‌ها را پریونیت کنیم
سیستم مقابل تک فاز بوده پس توان تک فاز و
ولتاژ نیز فازی است.

← اگر سیستم سه‌فاز باشد، ولتاژ داده شده خطی است و با تقسیم آن بر $\sqrt{3}$ ولتاژ فازی را بدست می‌آوریم. لذا برای سیستم سه‌فاز با منظور داشتن کار S_b را توان سه‌فاز و V_b را ولتاژ خطی می‌گیریم. داریم :

$$I_b = \frac{3S_b}{3V_b} = \frac{3S_b}{\sqrt{3}\sqrt{3}V_b} = \frac{S_b(\text{سه‌فاز})}{\sqrt{3}V_b(\text{خطی})} \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}V_b}$$

(تک فاز ↓ فازی)

$$Z_b = \frac{3V_b^2}{3S_b} = \frac{(\sqrt{3}V_b)^2}{S_b(\text{سه‌فاز})} = \frac{V_b^2(\text{خطی})}{S_b(\text{سه‌فاز})}$$

(تک فاز ↑)

$$Y_b = \frac{1}{Z_b}$$

بنابراین اگر با سیستم سه‌فاز داشتیم بهتر است از توان سه‌فاز و ولتاژ خطی استفاده کرده و در هنگام محاسبه مبنای I_b هم کنیم.

$S = 50\angle 45^\circ \Rightarrow$ تبدیل به پریونیت : $\frac{|S|\angle\varphi}{S_b} = \frac{|S|}{S_b}\angle\varphi$

بنابراین برای P و Q مبنای جداگانه‌ای نداریم.

$$S_{pu} = \frac{P+jQ}{S_b} = \frac{P}{S_b} + j\frac{Q}{S_b} = P_{pu} + jQ_{pu} \Rightarrow \begin{cases} P_{pu} = \frac{P}{S_b} \\ Q_{pu} = \frac{Q}{S_b} \end{cases}$$

iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$Z = R + jX$$

$$Z_{pu} = \frac{R+jX}{Z_b} = \frac{R}{Z_b} + j\frac{X}{Z_b} \Rightarrow Z_{pu} = R_{pu} + jX_{pu} \Rightarrow \begin{cases} R_{pu} = \frac{R}{Z_b} \\ X_{pu} = \frac{X}{Z_b} \end{cases}$$

دلایل استفاده از پریونیت:

۱) کوچکتر شدن اعداد و بالارفتن سرعت محاسبات.

۲) اطلاعاتی می‌توانیم بگیریم که شاید خود کمیت آن را ندهد. ← مثلاً در یک خط 20^{KV}، اعداد را با پایه 20^{k} پریونیت می‌کنیم و بدین ترتیب تمامی اعداد به حدود یک پریونیت تبدیل می‌شوند.

۳) اگر ترانس را پریونیت کنیم، از ارقام و یا ثانویه بودن کمیت‌ها مستقل می‌شویم.

$$S_{3\phi} = \sqrt{3}\, VI^* \xrightarrow{S_{pu}} \frac{\sqrt{3}\, VI^*}{\sqrt{3}\, V_b I_b} = VI^*$$

بنابراین:

$$\begin{cases} S_{1\phi} = VI^* \rightarrow \text{مقادیر واقعی} \\ S_{3\phi} = \sqrt{3}\, VI^* \rightarrow \text{مقادیر واقعی} \end{cases}$$

اما $S_{pu} = V_{pu} I_{pu}^*$

مثال: یک موتور سنکرون $10\,MW$ در ولتاژ $100kV$، ضریب توان 0.8 پیشفاز کار می‌کند. جریان این موتور را برحسب پریونیت حساب کنید. توان مبنا را $10\,MVA$ و ولتاژ مبنا را $50\,kV$ در نظر بگیرید. به دو طریق:

الف) مقدار واقعی جریان را حساب و سپس آن را پریونیت کنید.

ب) مقادیر را P_{pu} کرده و سپس جریان را حساب کنید.

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}\, V \cos\varphi} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 100 \times 10^3 \times 0.8} = \frac{100}{\sqrt{3} \times 0.8} = 72\ A$$

$$I = 72 \angle 36.8^\circ$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}\, V_b} = \frac{10 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 50 \times 10^3} = \frac{200\sqrt{3}}{3}$$

$$I_{pu} = \frac{\frac{100}{\sqrt{3} \times 8}}{\frac{200\sqrt{3}}{3}} = \frac{100 \times 3}{200 \times 8 \times 3} = \frac{10}{16} = 0.625 \angle -36.8^\circ$$

$$\left.\begin{array}{l} P_{pu} = V_{pu} I_{pu} \cos\varphi \\ P = \frac{10}{10} = 1\ pu \\ V = \frac{100}{50} = 2\ pu \end{array}\right\} \Rightarrow I = 0.625 \angle -36.8^\circ$$

PAPCO
www.iran-ieee.com

تغییر مبنا : این وضعیت معمولاً برای اسیداس ها اتفاق می افتد یعنی می خواهیم یک امپدانس pu داده شده را در یک مبنای خاص به مبنای دیگر ببریم ، پس داریم :

مبنای جدید	مبنای قدیم
S_{b2}	S_{b1}
V_{b2}	V_{b1}
$Z_2(pu)$	$Z_1(pu)$

مثلاً ترانس ⇒ { ۱۰۰ MVA, ۲۰ kV, $Z_1 = ۰.۲$ pu } — مبنای دوم → { ۲۰۰ MVA, ۵ kV, $Z_2 = ?$ }

$$Z_1^{\Omega} = Z_{1pu}\, Z_{1b} = Z_1^{pu} \times \frac{V_{b1}^2}{S_{b1}}$$

$$Z_2^{pu} = Z_1^{\Omega} \times \frac{1}{Z_{b2}} = \frac{Z_1^{pu} \times \frac{V_{b1}^2}{S_{b1}}}{\frac{V_{b2}^2}{S_{b2}}} \Rightarrow Z_2^{pu} = Z_1^{pu} \left(\frac{V_{b1}}{V_{b2}}\right)^2 \left(\frac{S_{b2}}{S_{b1}}\right)$$

$$\Longrightarrow Z_2^{pu} = ۰.۲ \left(\frac{۲۰}{۵}\right)^2 \left(\frac{۲۰۰}{۱۰۰}\right) = ۰.۲ \times ۱۶ \times ۲ = ۹.۴ \ pu$$

راکتانس یک ترانس ۰.۱۲ pu در مبنای ۱۰۰ MVA , ۲۰ kV
مقدار این راکتانس در مبنای ۲۰۰ MVA , ۳۰ kV چقدر است ؟

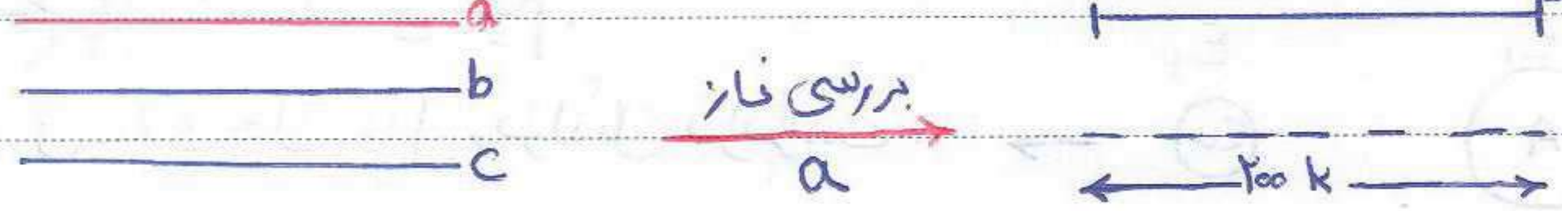
$$X_2^{pu} = ۰.۱۲ \left(\frac{۲۰۰}{۱۰۰}\right)\left(\frac{۲۰}{۳۰}\right)^2 = ۰.۱$$

www.iran-ieee.com

فصل سوم: محاسبه امپدانس سری خط:

$Z \quad R+jX \Rightarrow Z=R+jLw$

محاسبه L, R:

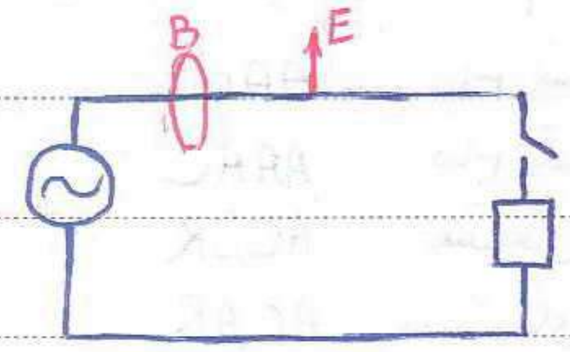


خطوط انتقال { خطوط هوایی / کابل زمینی

در داخل شهر معمولاً خطوط انتقال از نوع کابل زمینی اند به دو دلیل: ۱- ایمنی ۲- زیبایی
هزینه ی خطوط هوایی بسیار کمتر از کابل زمینی است.
در بعضی موارد نیز به دلایل فنی از کابل زمینی استفاده می شود.
خطوط انتقال ← عمدتاً ← خطوط هوایی
خطوط توزیع ← عمدتاً ← کابل زمینی

خطوط هوایی { ۱/ آلومینیوم / ۲/ ترکیبات آلومینیوم / ۳/ مس

نوع جنس خطوط را نیز هزینه تعیین می کند اما عمدتاً از آلومینیوم استفاده می شود و یا ترکیبات آن زیرا سبک تراست و در وزن ثابت سطح مقطع آلومینیوم بیشتر از مس خواهد بود.



میدان الکتریکی و مغناطیسی حتی اگر خطی با هم باشد باز هم وجود دارند.

همانطور که گفتیم در وزن و طول ثابت سطح مقطع آلومینیوم بیشتر از مس است و میزان E نوق نیز هرچه سطح مقطع بیشتر باشد کمتر است.

Corona ↑
اگر این میدان E از $3000 \frac{kv}{m}$ بیشتر شود هوا یونیزه شده و تخلیه الکتریکی صورت می گیرد. (پدیده تخلیه الکتریکی ۲ منشا بوجود می آورد: ۱- مقداری انرژی به فضا منتقل می شود ← تلفات کرونا (کرونا)
۲- تداخل مخابراتی

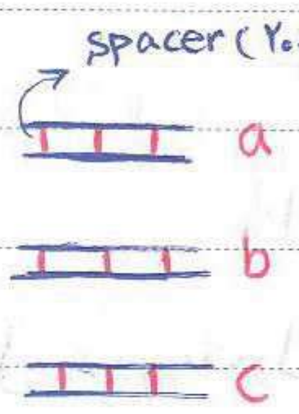
احتمال پدیده کرونا در هوای مرطوب بیشتر است

iran-ieee.com

بنابراین آلیاژ آلومینیوم استفاده کنیم احتمال رخداد کرونا کمتر می‌شود.

راه‌گیری برای کم کردن سطح میدان به‌جای یک هادی با سطح مقطع A، از دو هادی با سطح مقطع $A/2$ استفاده می‌کنیم.

وزن هادی‌های مقابل و طولشان برابر است. → در این صورت احتمال رخداد کرونا کمتر از حالت سه خط خواهد شد

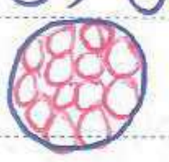


هرچه ولتاژ بالاتر رود تعداد هادی‌های هر باندل بیشتر می‌شود.

* استحکام آلومینیوم کم است.

هادی‌های خطوط انتقال باید دو ویژگی داشته باشند { ۱) استحکام ۲) انعطاف (هادی باید رشته‌ای باشد)

برش عرضی



همانطور که در برش عرضی پیچ هادی از تعداد زیادی رشته تشکیل می‌شود و همه رشته‌های هادی نیز باید از یک جنس باشند.

چون آلومینیوم استحکام کمی دارد بنابراین به‌جای آلومینیوم از آلیاژ آلومینیوم استفاده می‌شود

AAC ← تمام رشته‌ها از آلومینیوم
AAAC تمام رشته‌ها از آلیاژ آلومینیوم
ACSR رشته‌های وسط از فولاد و اطراف از آلومینیوم
ACAR رشته‌های وسط از آلیاژ آلومینیوم و اطراف از آلومینیوم

آلیاژهای آلومینیوم دارای هدایت کمتری بوده و مقاومت مکانیکی بیشتری نسبت به آلومینیوم خالص دارند. برای اینکه هم استحکام داشته باشیم و هم مقاومت خیلی زیاد نشود تعدادی از رشته‌ها از آلومینیوم و تعدادی از رشته‌های وسط را از آلیاژ آلومینیوم استفاده می‌کنند.

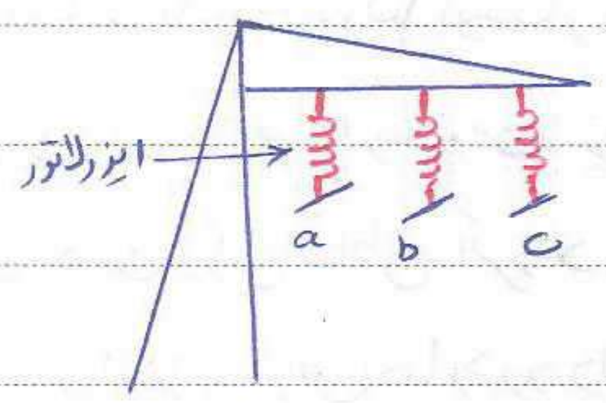
برای بالابردن استحکام بازه‌های آلیاژ آلومینیوم در رشته‌های وسط، از فولاد در رشته‌های وسط استفاده می‌شود.

www. iran-ieee .com

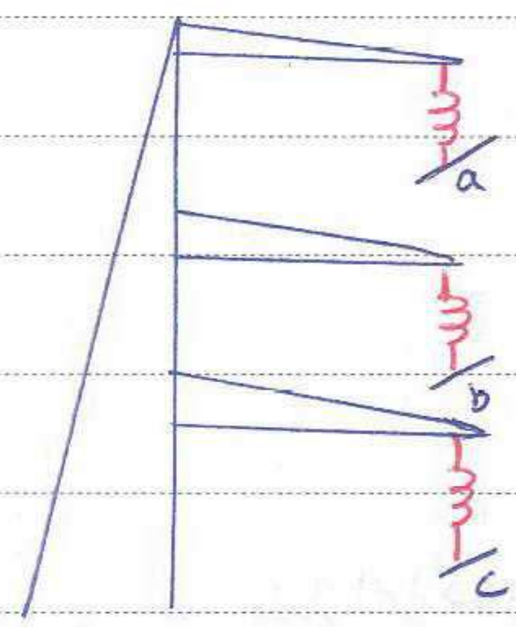
در مرکز کابل هوایی کمتری داریم، از رشته‌ای استفاده می‌کنیم که هادیت کمتری دارد.

در بعضی موارد نیز در رشته‌های مرکزی از فولاد استفاده می‌شود سپس اطراف آن کاغذ قرار می‌دهند و بعد از آن رشته‌های آلومینیوم قرار می‌گیرند در این حالت چون سطح مقطع بیشتر می‌شود احتمال جدا کردن کمتر می‌شود.

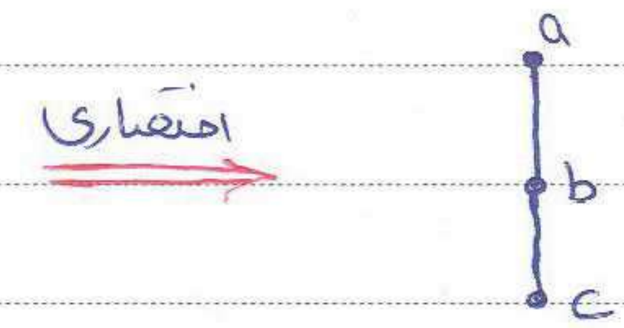
آرایش : نحوه قرارگیری هادی‌ها روی دکل.

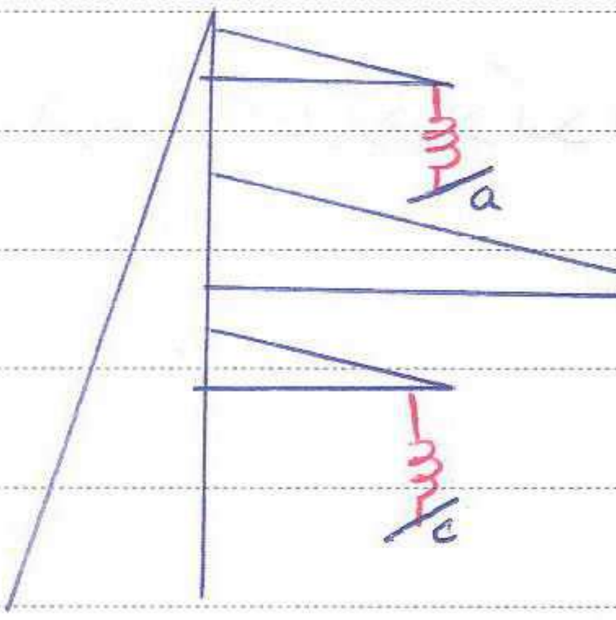


آرایش افقی

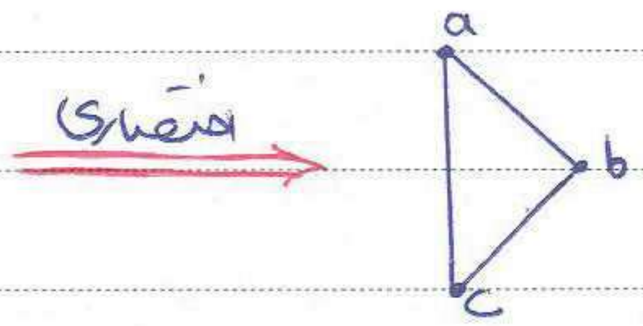


آرایش قائم





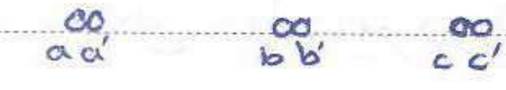
آرایش مثلث



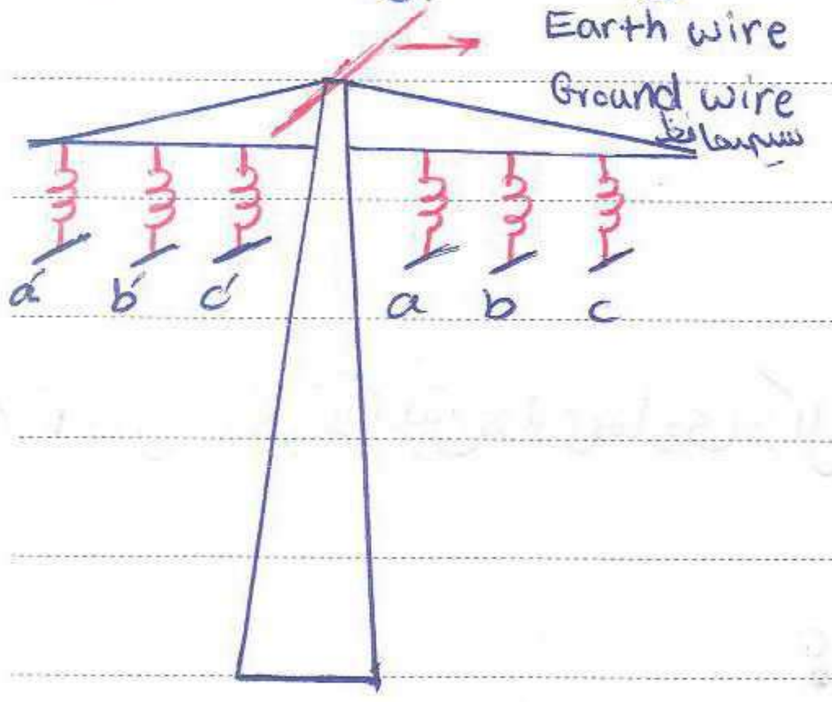
www.iran-ieee.com

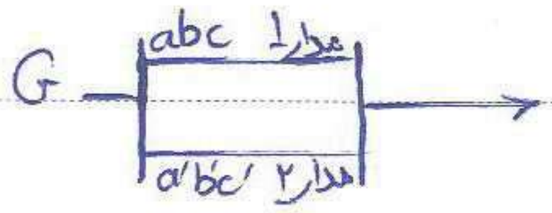
در هر یک از نمایش های فوق ، هادی ها می توانند با بندل چند تایی باشند.

آرایش افقی با بندل دو تایی :

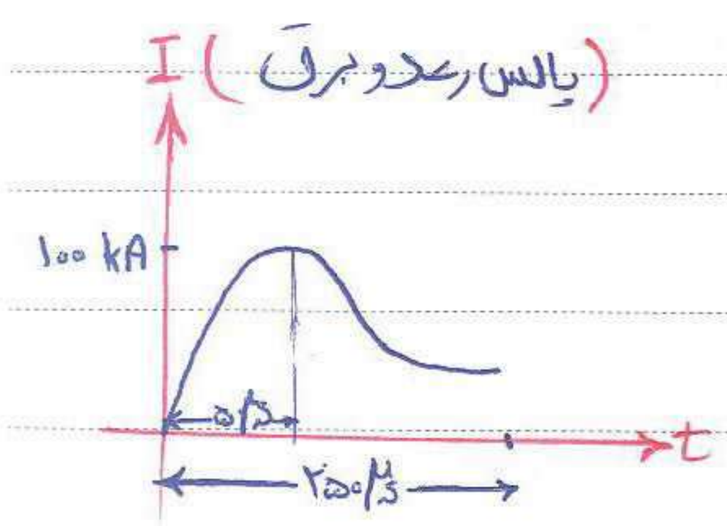


گاهی برای انتقال از دو خط موازی استفاده می شود که اصطلاحاً با آن دو مداره می گویند یعنی می گویند شبکه از محل a و b دو مداره است . برای اینکار ترجیح داده می شود که از دکل های دوبل استفاده شود





سیم محافظ با نیروگاه وصل نیست و در هر فاصله ای با زمین متصل می شوند . در مناطقی که رعد و برق زیاد اتفاق می افتد ، این سیم اتراری دهند در این مناطق اگر رعد و برق به سیم های فاز بخورد امکان سوراندن ترانس ها وجود دارد اما با برخورد رعد و برق با این سیم ، پالس به زمین منتقل شده و خرابی ایجاد نمی کند

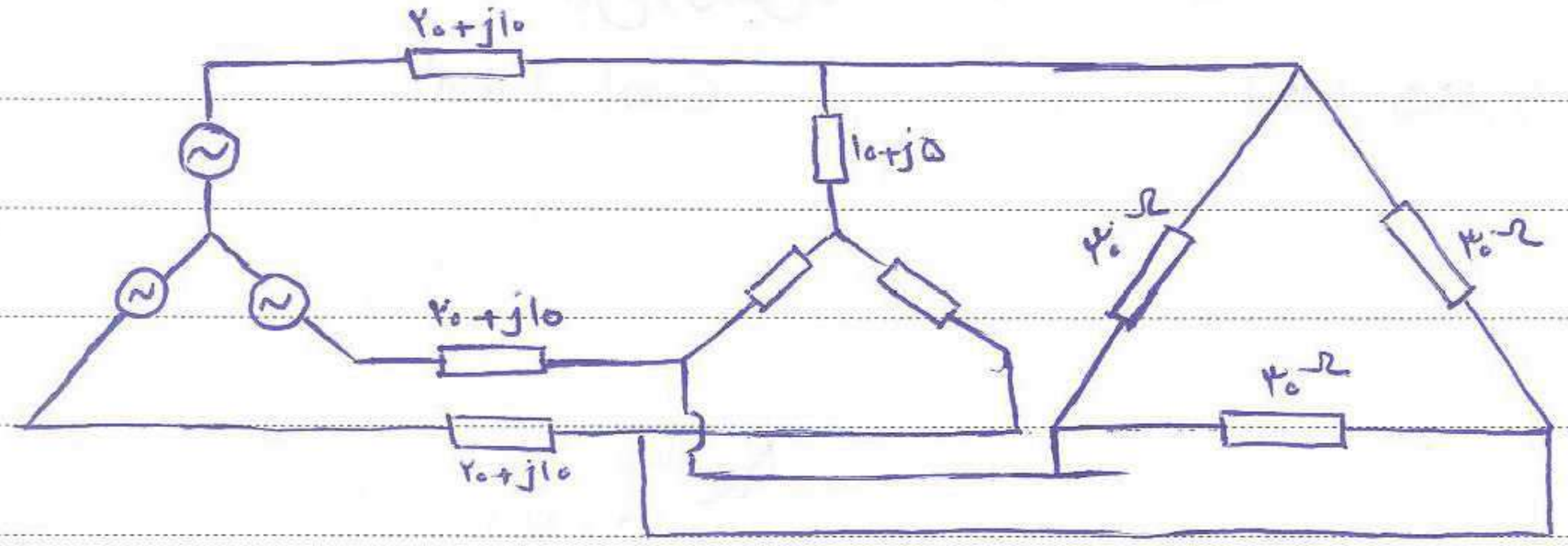


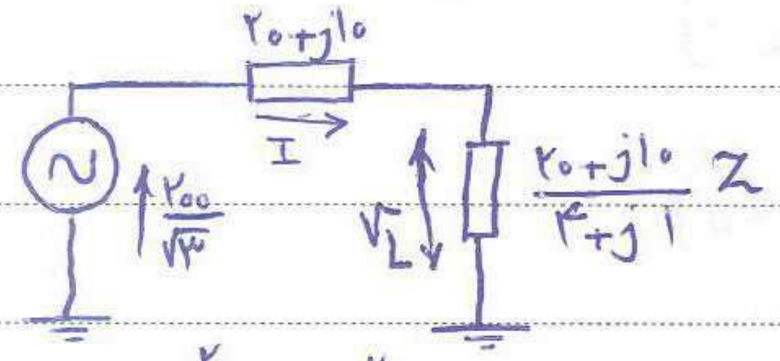
برق گیر میله ای است که ولتاژ اگر از حدی زیادتر شود مقاومت آن کم شده و سیگنال تقریباً زمین می شود

بنابراین اگر ضربه با فاز برخورد کند ، باز هم برقگیر وجود دارد و می تواند از ترانس محافظت کند .

www.iran-ieee.com

یک بار متعادل با اتصال مثلث $Z_\Delta = 30\Omega$ در هر فاز با یک بار متعادل اتصال ستاره $Z_Y = 5 + j10$ در هر فاز به صورت موازی قرار دارند و از طریق یک خط دارای امپدانس $Z_L = 1 + j2$ در هر فاز است با یک منبع ولتاژ سه فاز $200\,V$ ، حل شده است. ولتاژ دو سر بار را حساب کنید. مسأله را در سیستم pu حل کنید.





$$Y_1 = \frac{1}{10+j5}$$

$$Y_2 = \frac{1}{10}$$

$$\Rightarrow Y = \frac{4+j}{20+j10}$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{200^2}{1000} = 40\,\Omega$$

$$Z_D = \frac{0.125(0.125+j0.1125)}{0.125+0.125+j0.1125} =$$

$$Z_1 = \frac{10}{40} = 0.125\ pu$$

$$Z_L = \frac{20+j10}{40} = 0.5 + j0.125\ pu$$

$$Z_2 = \frac{10+j5}{40} = 0.125 + j0.1125\ pu$$

$$I = \frac{10\ pu}{Z_L + Z_D}$$

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3}\,V_b}$$

در اینجا بار متعادل بود و توانستیم مدار را تک فاز حل کنیم اما اگر بار متعادل نباشد نمی توانیم مدار را تک فاز حل کنیم و باید مدار را به طور سه فاز و هم زمان حل کنیم.

- علامت اینچ " : $2''$
علامت فوت ' : $2'$

1 inch = 2.54 cm

12 inch = 1 foot

mile > km

1 mile = 1.609 km

$1\ mil = \frac{1}{1000}\ inch = 0.001'' = 2.54 \times 10^{-3}\ cm$

www.iran-ieee.com

اگر دایره‌ای داشته‌باشیم که قطر آن 1 mil باشد آنگاه مساحت آن را یک Cmil می‌گویند.

$$C_{mil} = \pi\left(\frac{1\ mil}{2}\right)^2 = \pi\left(\frac{2{,}54\times10^{-4}}{2}\right)^2 = \underbrace{5{,}067\times10^{-4}}_{\text{ضریب تبدیل برای رفتن به Cmil از } mm^2}\ mm^2$$

$$\Rightarrow 1\ mm^2 = 1973{,}525\ C_{mil}$$

محاسبه امپدانس سری خط:

۱- محاسبه مقاومت اهمی (R) $\begin{cases} R_{dc} - \\ R_{ac} - \end{cases}$

مقاومت dc:

$$R_{dc} = \rho\frac{l}{A_c}$$

(طول، مقاومت ویژه، سطح مقطع)

$$R_{t_2} = R_{t_1}\left(1+\alpha(t_2-t_1)\right)$$

(α: ضریب حرارتی)

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

(T: ثابت حرارتی)

20° ، $\rho_{Al} = 2{,}83\times10^{-8}$

مثلا $\Rightarrow \begin{cases} R_{20} = 15\ \Omega \\ R_{50} = ? \end{cases} \Rightarrow R_{50} = \frac{228+50}{228+15}\times 15$

مقاومت ac:

$P_1 \longrightarrow P_2 \quad P_2 < P_1$

$$R_{ac} = \frac{\text{تلفات خط}}{\text{مجذور جریان}} = \frac{R|I|^2}{|I|^2}$$

$R_{ac} > R_{dc} \Rightarrow$ ۱٪ طول رشته از هادی بزرگتر است

۲٪ سطح مؤثر از سطح واقعی کمتر است

R_{ac} چند درصدی بیشتر از R_{dc} است علت نیز این است که در حالت ac جریان از تمام سطح رسانا عبور نمی‌کند.

(به علت اثر پوستی)

در حالت ac جریان از تمام خط به طور یکنواخت عبور نمی‌کند

بنابراین سطحی که در فرمول محاسبه مقاومت می‌گذاریم باید سطح مؤثر باشد که در حالت ac سطح مؤثر کوچکتر است.

همچنین طول رشته‌ها از هادی بزرگتر است و در حالت ac طول هادی را به عنوان l می‌گذاریم.

www.iran-ieee.com

Subject:

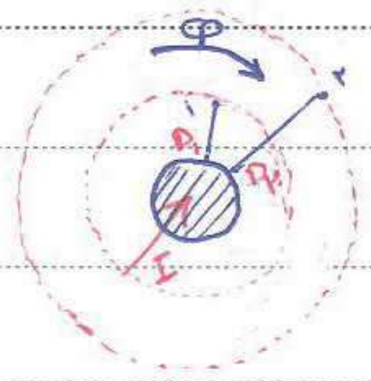
Year. Month. Date. ( )

مثال: مقاومت کابل‌های ACSR با سطح مقطع ۳۰۰ MCmil در دمای ۵۰ برحسب اهم برمایل بدست آورید. اثر پوستی و اثر لبه‌ای بودن را هر کدام ۲٪ در نظر بگیرید.

$\rho_L = 2,83 \times 10^{-8}\ \Omega m, 20^\circ \qquad T = 228$

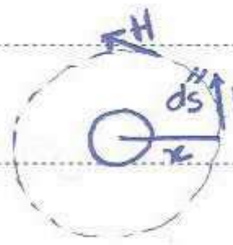
P4PCO
www.iran-ieee.com

محاسبه اندوکتانس:



حال می خواهیم شار عبوری از سطحی که تفاضل ۱ و ۲ است را بدست آوریم.
چون طول هادی را یک متر در نظر گرفتیم پس مقدار L را به صورت $\frac{H}{m}$ بدست می آوریم.

$$\left.\begin{aligned} d\varphi = dx\,L\,B \\ d\varphi = B\,dx \\ B = \mu_0 H \end{aligned}\right\} \Rightarrow d\varphi = \mu_0 H\,dx$$



$$\oint H\,ds = I \Rightarrow H\,2\pi x = I \Rightarrow H = \frac{I}{2\pi x}$$

$$\Rightarrow d\varphi = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}\,dx$$

$$\varphi_{12} = \int_{D_1}^{D_2} \frac{\mu_0 I}{2\pi x}\,dx = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\frac{D_2}{D_1}$$

$$\varphi_{12} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \ln\frac{D_2}{2}$$

شار خارج هادی از سطح هادی تا نقطه P:

$L = \frac{\varphi}{I}$ بنابراین هرچه جریان عبوری از هادی را زیاد کنیم، شار نیز زیاد خواهد شد.
رابطه فوق تا هنگامی برقرار است که هسته اشباع نشود.
اگر هسته نداشته باشیم یعنی هسته هوا باشد آنگاه رابطه فوق همواره برقرار است.

$$\left.\begin{aligned} L = \frac{\varphi}{I} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\frac{D}{2} \quad H/m \\ \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \end{aligned}\right\} \Rightarrow L = 2\times10^{-7} \ln D/2$$

چون شار خارج هادی را در نظر گرفتیم با آن اندوکتانس خارجی می گوییم یعنی از شار داخل های صرف نظر کردیم. برای بدست آوردن اندوکتانس داخلی باید شار داخلی را حساب کرده و بر I تقسیم کنیم داریم:
داخل هادی هوا نیست و یک ماده با μ مخصوص با خواص است. $\rightarrow L = \frac{\mu}{8\pi}$

اندوکتانس کل: $L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\frac{D}{2} + \frac{\mu}{8\pi}$ $\xrightarrow[\frac{\mu}{8\pi} \simeq \frac{\mu_0}{8\pi}]{\text{تقریب می زنیم}}$ $L = 2\times10^{-7}\left(\ln D/2 + \frac{1}{4}\right)$

$$\rightarrow L = 2\times10^{-7}\left(\ln D/2 + \ln e^{1/4}\right) = 2\times10^{-7} \ln\frac{D}{2e^{-1/4}} = 2\times10^{-7} \ln\frac{D}{0.7788 \times 2} = 2\times10^{-7} \ln\frac{D}{2'}$$

www.iran-ieee.com

اندوکتانس کامل :

$\Rightarrow L = 2\times10^{-7} \ln \frac{D}{r'}$ ← شعاع متوسط هندسی

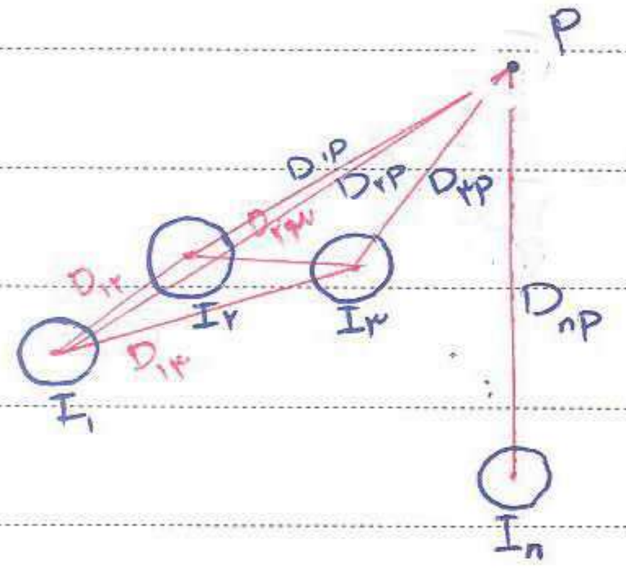
اندوکتانس خارجی :

$\Rightarrow L = 2\times10^{-7} \ln \frac{D}{r}$ ← شعاع واقعی

برای محاسبات دقیق تر می توان از خود r به جای r' استفاده کرد.

خطوط لازم: { خط رفت / خط برگشت

فرض کنیم گروه با n هادی مقابل را داشته باشیم :



$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0$ I

باید ارتباط بین شاری که با هادی شماره ۱ پیوست دارد را با جریان عبوری از هادی ۱ بدست آوریم.

اندوکتانس بین دو هادی را اندوکتانس متقابل می گوییم.

در اینجا شارهای ناشی از تک تک هادی ها را بدست می آوریم و با هم جمع می کنیم. با تقسیم این شار بر جریان می توانیم هم اندوکتانس های متقابل و هم خودی را بدست آوریم.

ψ_{1P_1}	شار پیوست با هادی ۱ ناشی از I_1	$\psi_{1P_1} = 2\times10^{-7} I_1 \ln \frac{D_{1P}}{r'}$
ψ_{1P_2}	شار پیوست با هادی ۱ ناشی از I_2	$\psi_{1P_2} = 2\times10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{12}}$
⋮	⋮	⋮
ψ_{1P_n}	شار پیوست با هادی ۱ ناشی از I_n	$\psi_{1P_n} = 2\times10^{-7} I_n \ln \frac{D_{nP}}{D_{1n}}$

$\psi_{1P} = \psi_{1P_1} + \psi_{1P_2} + \dots + \psi_{1P_n}$ شار پیوست با هادی ۱ ناشی از همه جریان ها

$$\psi_{1P} = 2\times10^{-7}\left(I_1 \ln \frac{D_{1P}}{r'_1} + I_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{D_{3P}}{D_{13}} + \dots + I_n \ln \frac{D_{nP}}{D_{1n}}\right)$$

D''_{11}

$I_n = -I_1 - I_2 - I_3 - \dots - I_{n-1}$

$$= 2\times10^{-7}\left(I_1 \ln \frac{1}{D_{11}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}}\right) + 2\times10^{-7}\left(I_2 \ln D_{1P} + I_2 \ln D_{2P} + \dots + I_n \ln D_{nP}\right)$$

در رابطه فوق به جای I_n از رابطه I استفاده می کنیم.

$$\Rightarrow \psi_{1P} = 2\times10^{-7}\left(I_1 \ln \frac{1}{D_{11}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}}\right) + 2\times10^{-7}\left(I_1 \ln \frac{D_{1P}}{D_{nP}} + I_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{nP}} + \dots + I_{n-1} \ln \frac{D_{(n-1)P}}{D_{nP}}\right)$$

www.iran-ieee.com

حال نقطه‌ی P را به بی‌نهایت میل می‌دهیم در این صورت عبارت دوم صفر می‌شود و خواهیم داشت:

شار پیوست با هادی یک ناشی از تمام جریان‌ها $\psi_{1P} = 2\times10^{-7}\left(I_1 Ln\frac{1}{D_{11}} + I_2 Ln\frac{1}{D_{12}} + I_3 Ln\frac{1}{D_{13}} + \dots + I_n Ln\frac{1}{D_{1n}}\right)$

شار پیوست با هادی دو ناشی از تمام جریان‌ها $\psi_{2P} = 2\times10^{-7}\left(I_1 Ln\frac{1}{D_{21}} + I_2 Ln\frac{1}{D_{22}} + I_3 Ln\frac{1}{D_{23}} + \dots + I_n Ln\frac{1}{D_{2n}}\right)$

حال نوع خط خود را مشخص می‌کنیم:

خط تک‌فاز:

$I_1 + I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = -I_1$

شاری که با هادی یک پیوست دارد ناشی از هر دو جریان $\psi_a = 2\times10^{-7}\left(I_1 Ln\frac{1}{D_{aa}} + I_2 Ln\frac{1}{D_{ab}}\right)$

$\psi_a = L_a I_a$

$\psi_a = 2\times10^{-7}\left(I_1 Ln\frac{1}{D_{aa}} - I_1 Ln\frac{1}{D_{ab}}\right) \Rightarrow \psi_a = 2\times10^{-7} I_1\left(Ln\frac{D_{ab}}{D_{aa}}\right) \Rightarrow L_a = 2\times10^{-7} Ln\frac{D_{ab}}{D_{aa}}$

بنابراین یک متر از هادی‌ها به اندازه‌ی تورق اندوکتانس دارند.

$\Rightarrow L_a = 2\times10^{-7} Ln\frac{D}{D_{Sa}} = \underbrace{2\times10^{-7} Ln\frac{1}{D_{Sa}}}_{\text{اندوکتانس خودی}} + \underbrace{2\times10^{-7} Ln D}_{\text{اندوکتانس متقابل}}$

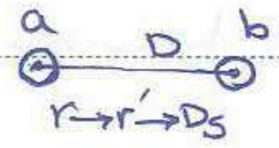
$\xrightarrow[\text{مشابه}]{\text{به‌طور}} L_b = 2\times10^{-7} Ln\frac{D}{D_{Sb}}$

اطلاعات مورد نیاز: فاصله بین خطوط، شعاع خطوط

Subject:

Year. Month. Date. ( )

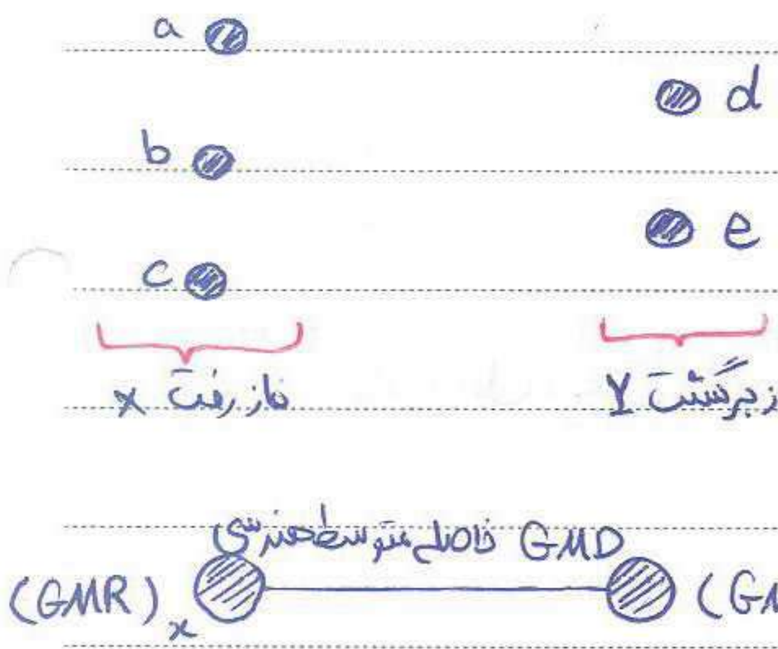
خط تک فاز: هادی رفت / هادی برگشت



$$L = 2\times10^{-7}\ln\frac{D}{D_S}\ H/m$$

L به دست آمده را در طول خط ضرب کرده و در نتیجه اندوکتانس خط را به دست می آوریم. در $2\pi f$ ضرب کرده و راکتانس را بدست می آوریم.

فرض کنید خط تک فازی به صورت مقابل داشته باشیم که هر خط چیدمانی باشد.



$$L_x = 2\times10^{-7}\ln\frac{GMD}{(GMR)_x}$$

$$L_y = 2\times10^{-7}\ln\frac{GMD}{(GMR)_y}$$

$$GMD = \sqrt[4]{ad.ae.bd.be.cd.ce} \overset{\text{مثلاً}}{\simeq} 10,744$$

$$(GMR)_x = \sqrt[9]{r'_a.ab.ac.r'_b.ab.bc.r'_c.bc.ac} \simeq 0,1481\ m$$

* r'_a برداشتیم تا اندوکتانس خارجی و داخلی را باهم داشته باشیم.

$$(GMR)_y = \sqrt[4]{r'_d.de.ed.r'_e} \simeq 0,153\ m$$

(r'_d = شعاع × 0,7788)

$$L_x = 2\times10^{-7}\ln\frac{10,744}{0,1481} = 4,212\times10^{-7}\ H/m$$

$$L_y = 2\times10^{-7}\ln\frac{10,143}{0,153} = 8,503\times10^{-7}\ H/m$$

بنابراین وقتی هادی را از هم فاصله دهیم آنگاه اندوکتانس نیز کاهش می یابد.

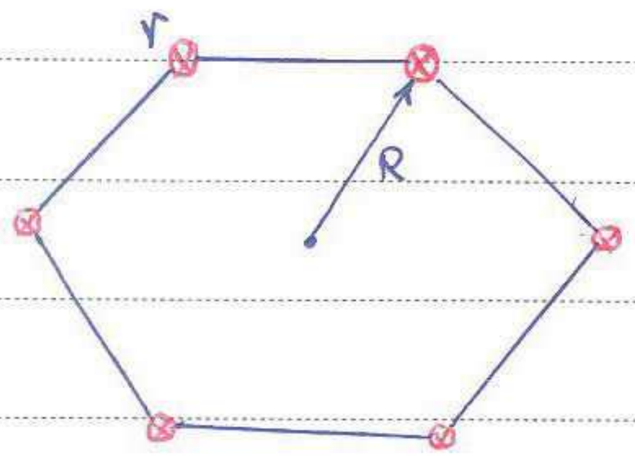
پس باندل کردن هم احتمال کرونا را کاهش می دهد و هم اندوکتانس را.

GMR موجود در جدول را با این فرض حساب کرده اند که هادی متشکل از تعدادی رشته باشد و سپس شعاع متوسط هندسی آن گروه را به دست آورده و در جدول تحت عنوان GMR نوشته اند.

P4PCO
www.iran-ieee.com

Subject :

Year . Month . Date . ( )



تمرین : شعاع متوسط هندسی گروه مقابل را بدست آورید.

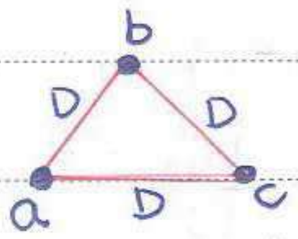
محاسبه GMR : تعداد سیم‌ها = n ⇐ تعداد حبلات n^2

محاسبه GMD : از حاصلضرب m خط ⇐ تعداد حبلات nm

PAPCO

www.
iran-ieee
.com

محاسبه اندوکتانس خط سه فاز:



$L_a = L_b = L_c = L$

الف) خط سه فاز با فواصل مساوی (در هر فاز یک هادی):

در این حالت به دلیل مساوی بودن فواصل، رابطه مقابل را داریم.

$$I_a = |I| \angle 0^\circ \qquad I_b = |I| \angle -120^\circ \qquad I_c = |I| \angle 120^\circ$$

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

$$\varphi_a = 2\times10^{-7}\left[I_a \underbrace{Ln\frac{1}{D_{Sa}}}_{L_{aa}} + I_b \underbrace{Ln\frac{1}{D_{ab}}}_{L_{ab}} + I_c \underbrace{Ln\frac{1}{D_{ac}}}_{L_{ac}}\right]$$

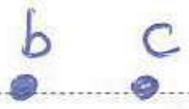
$$\xrightarrow{D_{ab}=D_{ac}=D} \varphi_a = 2\times10^{-7}\left[I_a Ln\frac{1}{D_{Sa}} + (\cancel{I_b + I_c})Ln\frac{1}{D}\right] \quad (-I_a)$$

$$\varphi_a = L_a I_a \Longrightarrow \varphi_a = 2\times10^{-7} I_a Ln\frac{D}{D_{Sa}} \Rightarrow L_a = 2\times10^{-7} Ln\frac{D}{D_{Sa}}$$

فواصل هادی‌ها ← D

شعاع هندسی متوسط ← D_{Sa}

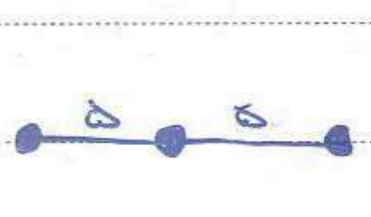
ب) خط سه فاز با فواصل متفاوت:



در این حالت دیگر $L_a = L_b = L_c$ نخواهد بود زیرا مثلاً در آرایش مقابل اندوکتانس هادی وسط از دو تای دیگر بیشتر است.

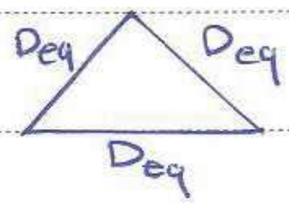
برای خطوط با طول کم اختلاف اندوکتانس‌ها را نادیده می‌گیریم و مثلث با اضلاع مختلف را با مثلثی متساوی الاضلاع جایگزین می‌کنیم.

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ac} D_{ab} D_{bc}}$$

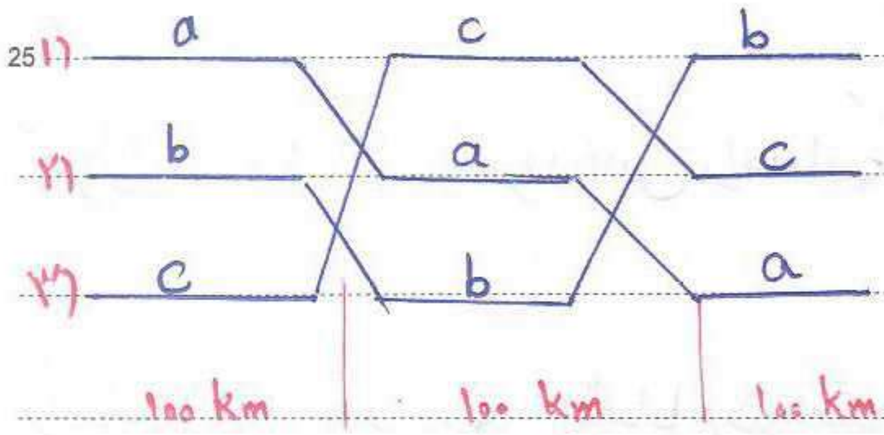


خطوط با طول

$D_{eq} = \sqrt[3]{5\times5\times10}$



اگر طول خط زیاد باشد آنگاه در طول خط عمل جابه‌جایی انجام می‌شود یعنی مثلاً هادی a که در یک خط ۳۰۰ کیلومتری، در ۱۰۰ کیلومتری اول روی ازولاتور a بوده در ۱۰۰ کیلومتر بعدی با ازولاتور b منتقل می‌شود. به عمل جابه‌جایی transposition نیز می‌گویند.

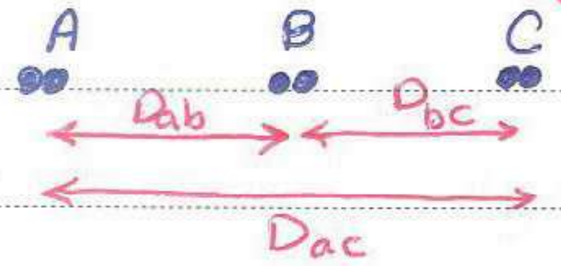


بنابراین در این حالت نیز می‌توانیم D_{eq} را در نظر گرفته مسأله را مشابه حالت قبل کرده و از فرمول آن استفاده کنیم.

Subject :

Year . Month . Date . ( )

ج) خط سه فاز با نواصل هسادی یا غیرمساوی (دو هر فاز بیش از یک هادی)



خط سه فاز با نواصل غیرمساوی و بیش از یک هادی در هر فاز :

$$L = 2\times10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s^b} \leftarrow GMD$$

$$D_s^b = (GMR)^b$$

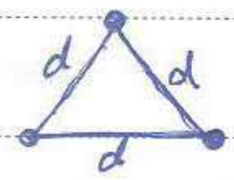
$$\equiv$$

$$L = 2\times10^{-7} \ln \frac{D}{D_s^b}$$

محاسبه D_s^b برای هادی دوتایی :

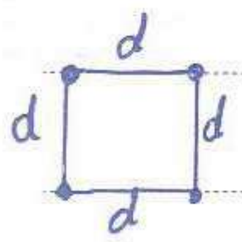
$$D_s^b = GMR = \sqrt[4]{D_s d d D_s} = \sqrt{d D_s}$$

محاسبه D_s^b برای هادی سه تایی :



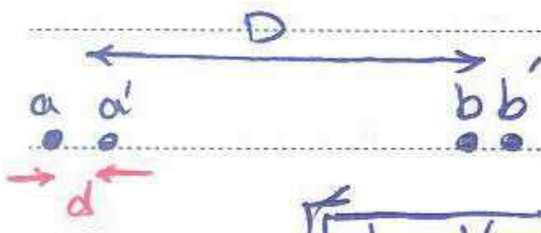
$$D_s^b = GMR = \sqrt[9]{(D_s d d)^4} = \sqrt[3]{d^2 D_s}$$

محاسبه D_s^b برای هادی چهارتایی :



$$D_s^b = \sqrt[4]{d^4 D_s}$$

* هنگام محاسبه GMD بین آرایش مقابل باید از فرمول زیر حساب کنیم.



$$GMD = \sqrt[4]{ab \times ab' \times a'b \times a'b'}$$

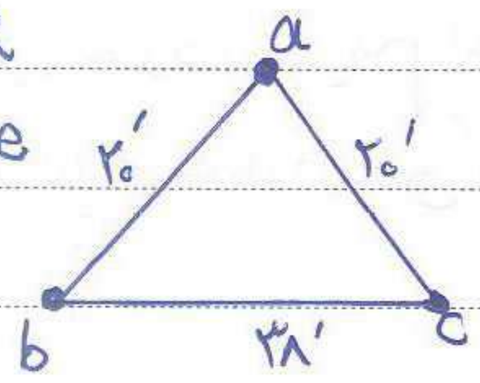
اما می توانیم با فرض $d \ll D$ فاصله‌ی فوق را با خود D تقریب بزنیم.

مثال : راکتانس القایی یک مایل و یک کیلومتر هر فاز را حساب کنید.

فرکانس 60 Hz می باشد.

در اینجا اگرچه گفته نشده که خط کوتاه بود، و یا محل جابجایی انجام شده است اما ما این فرض را می کنیم.

ACSR
Drake



جدول $\rightarrow D_s = 0.0373'$

$$GMD = \sqrt[3]{20 \times 20 \times 38} = 24.8'$$

$$L = 2\times10^{-7} \ln \frac{24.8'}{0.0373'} = 13.0 \times 10^{-7} \ H/m$$

$$X = 2\pi f L = 2\pi 60 \times 13 \times 10^{-7} \times 1000 = 0.5 \frac{\Omega}{km}$$

$$X = 2\pi 60 \times 13 \times 10^{-7} \times 1609 \ \frac{\Omega}{mile}$$

اگر طول خط 200km باشد، راکتانس را حساب کنید.

$$X = 0.5 \times 200 = 100 \ \Omega$$

راکتانس هر واحد کیلومتر یا مایل در حدود چند دهم اهم در می آید.

PAPCO

www.iran-ieee.com

Subject :

Year . Month . Date . ( )

حال راکتانس القایی را از روی جدول بدست می آوریم : $\frac{\Omega}{km}$

Drake جدول $\longrightarrow X_a = 0.399 \frac{\Omega}{mile} \div 1.609 =$

در جدول گفته شده که راکتانس فوق برای حالتی است که فاز ها در رئوس مثلثی متساوی الاضلاع به ضلع ۱' است. حال به جدول A2 مراجعه کرده و تأثیر فاصله را می گذاریم. در اینجا که ۲۴/۸' را داریم ۸/. را به اینچ تبدیل کرده و از دین افقی استفاده می کنیم.

راه حل دیگر این است که راکتانس را به ازای ۲۴' و ۲۵' بدست آورده و سپس از رابطه ی خطی استفاده کنیم.

فاصله ۲۴' $\longrightarrow X_d = 0.3856$

فاصله ۲۵' $\longrightarrow X_d = 0.3906$

۱' $\longrightarrow$ 0.1005

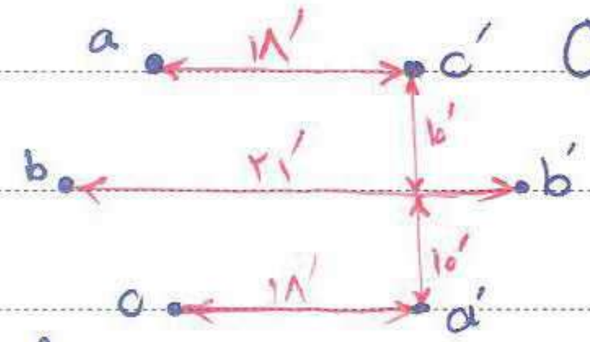
٪۸ $\longrightarrow$ 0.8 × 0.1005 = 0.1004

$X = X_a + X_d = \underbrace{0.3990}_{X_a} + \underbrace{0.3896}_{X_d} = 0.7886 \frac{\Omega}{mile}$

مستقل از جنس هادی $\longrightarrow$ جدول A2 ، جدول A1 $\longleftarrow$ وابسته به جنس هادی

علت جمع کردن :

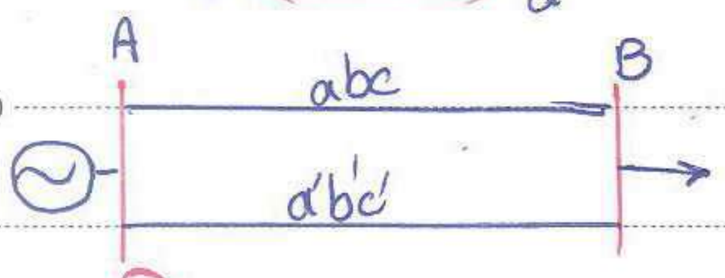
$X = 2\pi f \ln \frac{GMD}{GMR} = \underbrace{2\pi f \ln \frac{1}{GMR}}_{X_a} + \underbrace{2\pi f \ln GMD}_{X_d}$



Ostrich

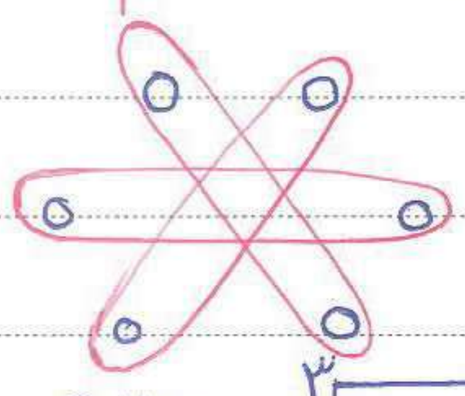
ج) محاسبه راکتانس خط سه فاز دوبل (دومداره) :

می توانیم از اثر متقابل دو مدار روی هم صرف نظر کرده و برای محاسبه L_a ، اندوکتانس یک هادی برای یک مدار حساب کرده و آن را نصف کنیم.



ب) منظور کردن اثر متقابل فرض می کنیم یک خط داریم که باندل شده است.

در اینجا باندل فرضی است زیرا فاصله دو هادی از هم بسیار بیشتر از فاصله باندل است.



در باندل D_{ab} را فاصله مرکز دو باندل با فرض $d \ll D$ در نظر می گیریم اما در اینجا این فرض را نداریم و باید D_{ab} را حساب کنیم.

$GMD = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ac}}$

$D_{ab} = \sqrt[4]{ab' . ab . a'b . a'b'}$

$D_{ac} = \sqrt[4]{ac . ac' . a'c . a'c'}$

$D_{bc} = \sqrt[4]{bc . bc' . b'c . b'c'}$

اما برای محاسبه GMR داریم:

باندل دوتایی $\Rightarrow GMR = \sqrt{dD_s}$

$(GMR)^{aa'} = \sqrt{aa' \cdot D_s}$

$(GMR)^{bb'} = \sqrt{bb' \cdot D_s}$

$(GMR)^{cc'} = \sqrt{cc' \cdot D_s}$

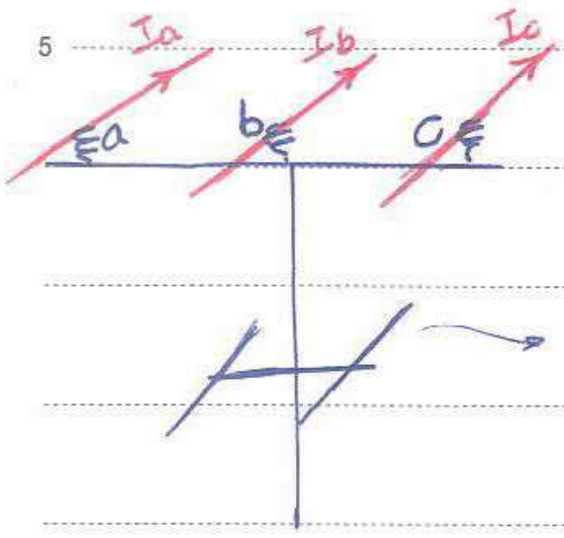
$\Rightarrow (GMR)^{Pc} = \sqrt[3]{(GMR)^{aa'}(GMR)^{bb'}(GMR)^{cc'}}$

- در شکل صفحه‌ی قبل راکتانس در هر کیلومتر را بدست آورده و خطای دورویس را بدست آورید.

P4PCO
www.iran-ieee.com

اثر القای الکترومغناطیسی:

- اثرات بیولوژیکی:
- اثرات روی خطوط مخابراتی: تداخل مخابراتی و نویز روی خطوط مخابراتی



$I_a = ۲۰۰\ A$

$V_{۱۲}$: ولتاژ القا شده روی خطوط تلفن

$$\begin{cases} I_a = |I_a| \angle 0^\circ \\ I_b = |I_b| \angle -۱۲۰^\circ \\ I_c = |I_c| \angle ۱۲۰^\circ \end{cases}$$

در یک خط n هادی می‌داریم:

۱ ۲ → از جریان خطوط تلفن صرف نظر می‌کنیم.

$$\varphi_a = ۲\times۱۰^{-۷}\left[I_a \ln\frac{۱}{D_{aa}} + I_b \ln\frac{۱}{D_{ab}} + \dots + I_n \ln\frac{۱}{D_{na}}\right] \quad \frac{wb}{m}$$

$$V_a = ۲\times۱۰^{-۷} jw\left[I_a \ln\frac{۱}{D_{aa}} + I_b \ln\frac{۱}{D_{ab}} + \dots + I_n \ln\frac{۱}{D_{na}}\right] \quad \frac{Volt}{m}$$

$$V_۱ = ۲\times۱۰^{-۷} jw\left[I_a \ln\frac{۱}{D_{a۱}} + I_b \ln\frac{۱}{D_{bi}} + I_c \ln\frac{۱}{D_{c۱}} + \cancel{I_۱ \ln\frac{۱}{D_{۱۱}}} + \cancel{I_۲ \ln\frac{۱}{D_{۲۱}}}\right]$$

$$V_۲ = ۲\times۱۰^{-۷} jw\left[I_a \ln\frac{۱}{D_{a۲}} + I_b \ln\frac{۱}{D_{b۲}} + I_c \ln\frac{۱}{D_{c۲}}\right]$$

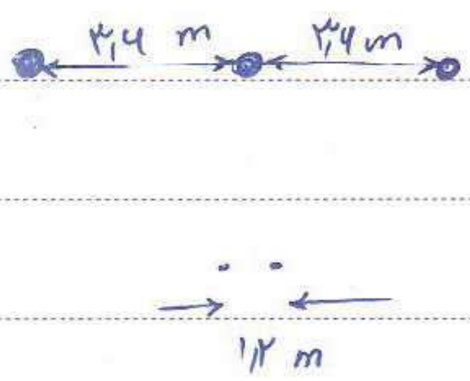
$$\Rightarrow V_{۱۲} = ۲\times۱۰^{-۷} jw\left[I_a \ln\frac{D_{a۲}}{D_{a۱}} + I_b \ln\frac{D_{b۲}}{D_{b۱}} + I_c \ln\frac{D_{c۲}}{D_{c۱}}\right]$$

a

۱ ۲

$$\Rightarrow \begin{cases} V_{۱۲} = ۲\times۱۰^{-۷} jw\, I_a \ln\frac{D_{a۲}}{D_{a۱}} \\ \varphi_{۱۲} = ۲\times۱۰^{-۷} I_a \ln\frac{D_{a۲}}{D_{a۱}} \end{cases}$$

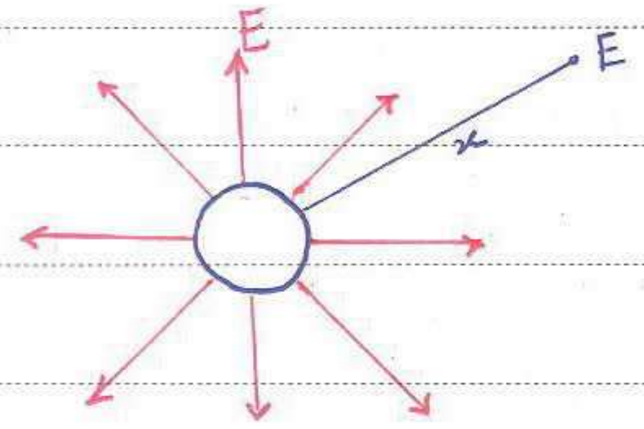
www.iran-ieee.com



$$V_{12} = 2\times10^{-7}\times 2\pi f\left[200\angle 0\ \ln\frac{5/8}{5} + 200\angle 120^\circ \ln\frac{5}{5/8}\right]\times 10^{4}\ \ V/Km$$

اگر یک فاز جریانش موقتاً قطع شود آنگاه دیگر اثر فاز تأثیری در V_{12} ندارد.

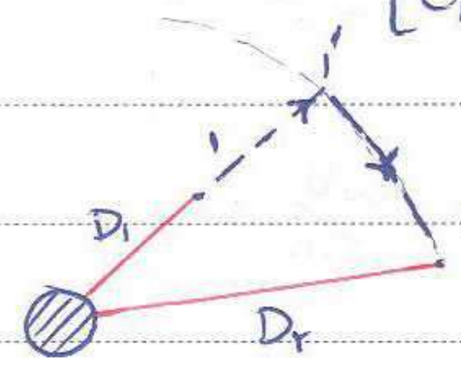
فصل چهارم: ادمیتانس هوایی خطوط:



$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon x}\ \ V/m$$

ضریب نفوذپذیری الکتریکی → $\begin{cases}\epsilon_0 = 8.85\times10^{-12}\\ \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = k\end{cases}$ ضریب نفوذپذیری نسبی

در مورد خطوط هوایی $\epsilon = \epsilon_0$



انرژی مورد نیاز برای جابجایی یک بار یک کولنی از نقطه‌ی ۱ به ۲ برابر با V_{12} است.

$$V_{12} = \int_{D_1}^{D_2}\frac{q}{2\pi\epsilon_0 x}dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\int_{D_1}^{D_2}\frac{dx}{x} \Rightarrow V_{12} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\ln\frac{D_2}{D_1}$$

با توجه به مقداری که برای q می‌گذاریم، واحد ولتاژ به دست می‌آید.

$q = CV \rightarrow V = \frac{1}{C}q$

ما دنبال این هستیم که اختلاف پتانسیل را به بار مرتبط کنیم.

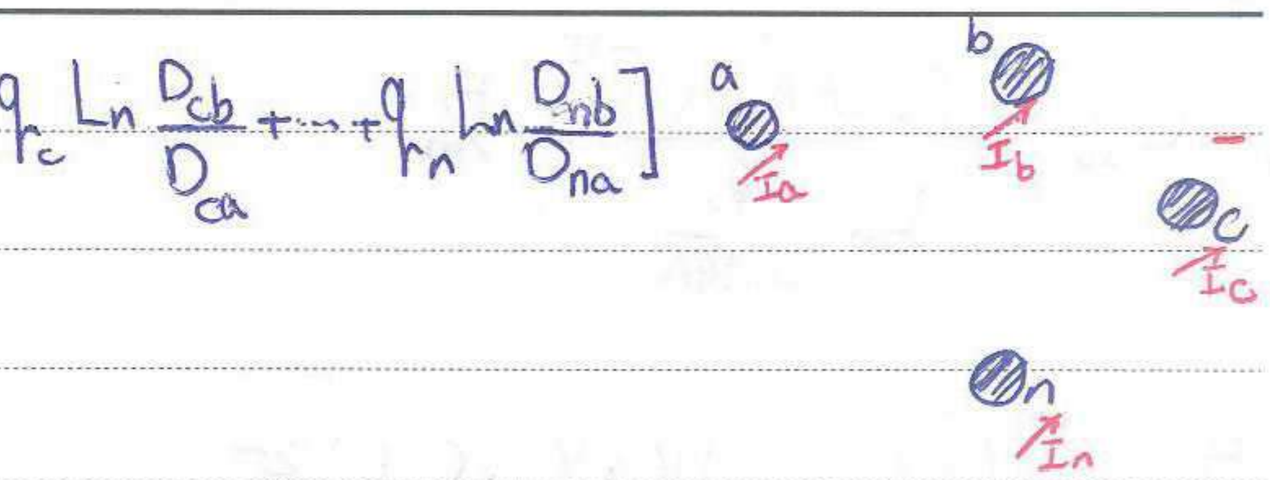
چون در خطوط معمولاً بیش از یک خط داریم، این فرمول را نیز گسترش داده و برای حالتی حساب می‌کنیم که n هادی داریم.

PAPCO
www.iran-ieee.com

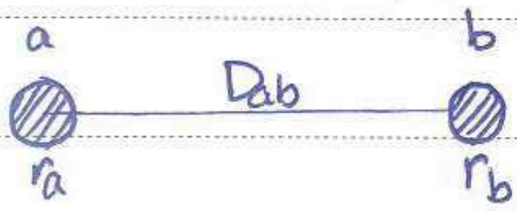
Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D_{ab}}{D_{aa}} + q_b \ln\frac{D_{bb}}{D_{ba}} + q_c \ln\frac{D_{cb}}{D_{ca}} + \dots + q_n \ln\frac{D_{nb}}{D_{na}}\right]$$



* در اینجا یا هر واره روی سطح است و شعاع متوسط هندسی دیگر تعریف نمی شود.



- خط تک فاز:

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D_{ab}}{r_a} + q_b \ln\frac{r_b}{D_{ba}}\right] \quad , \quad r_a = r_b = r \quad , \quad q_a = -q_b$$

$$\Rightarrow V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D}{r} - q_a \ln\frac{r}{D}\right] = \frac{q_a}{2\pi\epsilon_0}\ln\left(\frac{D}{r}\right)^2 \Rightarrow V_{ab} = \frac{q_a}{\pi\epsilon_0}\ln\frac{D}{r}$$

$$\Rightarrow C_{ab} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D}{r}} \ \frac{F}{m}$$

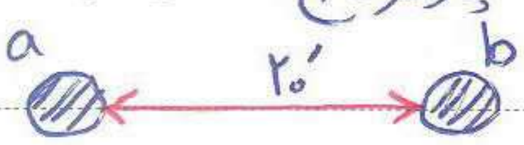
C_{ab} به نیز یک خط وابسته است و لی ما برای بدست آوردن آن بین q و V ارتباط برقرار کردیم.

$$B_{ab} = j\omega C = j2\pi f C \ \left[\frac{S}{m}\right]$$

$$X_{ab} = \frac{1}{j2\pi f C_{ab}} \ \Omega.m$$

سوسپتانس را اگر در 1000 ضرب کنیم آنگاه واحد $\frac{S}{Km}$ خواهیم داشت و می در مورد X_{ab} نمی توان اینکار کرد.

- سوسپتانس خازنی 1 km و 1 mile خط تک فاز که با هادی ACSR با ترتیب ساخته شده است را با استفاده از نرمول و جدول حساب کنید. خطا به صورت مقابل است:



نوع هادی $\xrightarrow{\text{جدول A1}}$ $r = \left(\frac{0.642}{2}\right)'' = \left(\frac{0.642}{2\times12}\right)' = 0.0268'$

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$C_{ab} = \frac{\pi \times 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{r_0}{0.0148}} \; F/m$$

$$B_{ab} = 2\pi f C_{ab} = 2\pi \times 50 \times C_{ab} \; \frac{S}{m} \longrightarrow \begin{cases} \times 1000 \rightarrow \frac{S}{km} \rightarrow X_{ab} = \frac{1}{B_{ab}} \; \Omega \cdot km \\ \times 14.9 \rightarrow \frac{S}{mile} \rightarrow X_{ab} = \frac{1}{B_{ab}} \; \Omega \cdot mile \end{cases}$$

1.58×10^{-4} → 9.3×10^{5}

10.13×10^{5}

- حال با استفاده از جدول می خواهیم مقادیر را بدست آوریم:

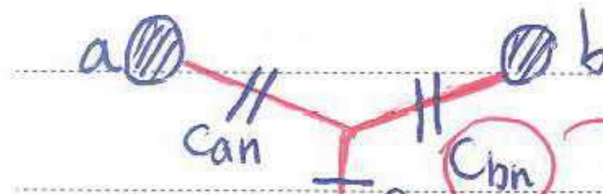
$$X_c = X'_a + X'_d$$

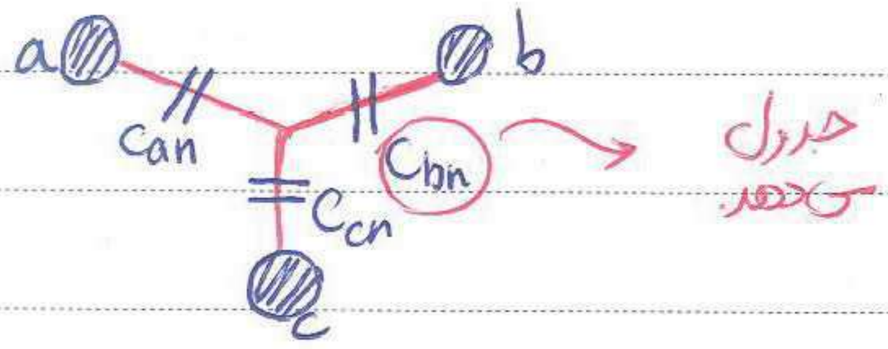
$$X'_a = 0.10674 \; M\Omega \cdot mile$$

$$X'_d = 0.08789 \; M\Omega \cdot mile$$

$$\Rightarrow X_c = 0.1946 \; M\Omega \cdot mile$$

- جدول سوسپتانس مقابل را می دهد.





- برای اینکه در خط نگارز عدد مسلح جدول بدست بیاوریم باید از فرمول مقابل استفاده کنیم.

$$C_{an} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}$$

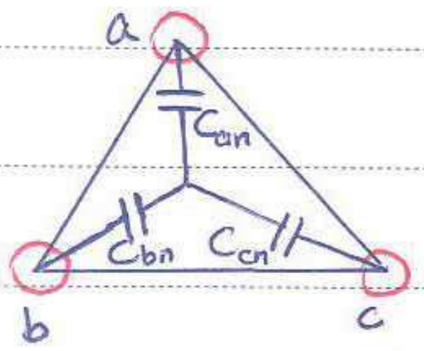
PAPCO

www.iran-ieee.com

Subject :

Year . Month . Date . ( )

خط سه فاز:

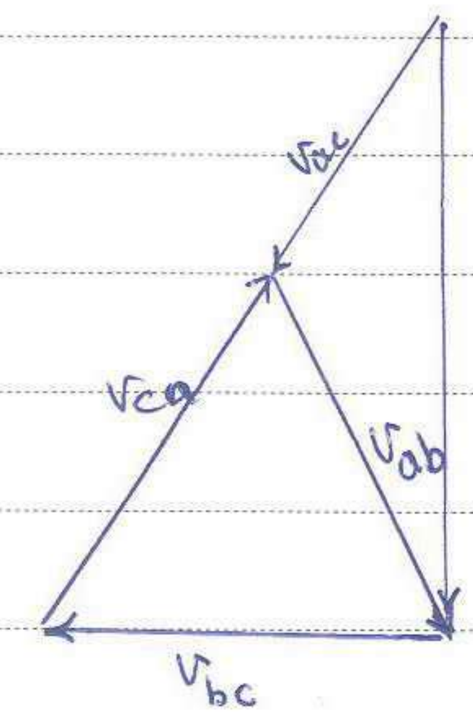


۱) هادی ها با تدل نبود. و فاصله آنها نیز برابر است.

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D_{ab}}{r_a} + q_b \ln\frac{r_b}{D_{ab}} + q_c \ln\frac{D_{cb}}{D_{ca}}\right]$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D}{r} + q_b \ln\frac{r}{D}\right] \Rightarrow V_{ab}+V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[2q_a \ln\frac{D}{r} + q_a \ln\frac{D}{r}\right]$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln\frac{D}{r} + q_c \ln\frac{r}{D}\right]$$



$$V_{ab}+V_{ac} = 2V_{ac}\cos 30^\circ = 2\sqrt{3}\times V_{an}\sqrt{3}/2 = 3V_{an}$$

$$3V_{an} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} 3q_a \ln\frac{D}{r} \Rightarrow C_{an} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D}{r}} \quad F/m$$

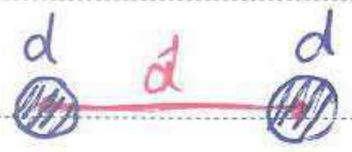
۲) سه فاز با فواصل متفاوت که با تدل نشده است:

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D_{eq}}{r}}$$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}$$

۳) سه فاز با فواصل متفاوت با تدل شده:

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D_{eq}}{r^b}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{GMD}{GMR}}$$



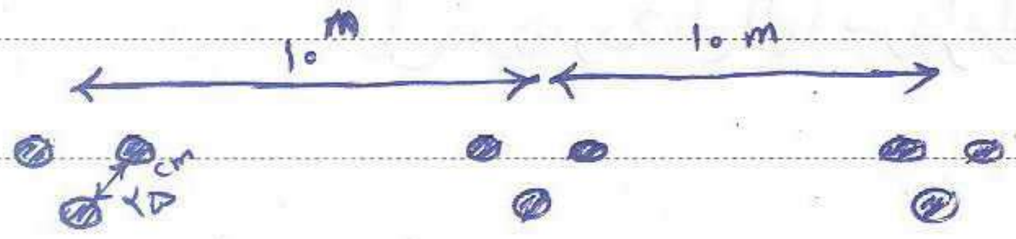
$$GMR = \sqrt{el D_s}$$

$$GMR = \sqrt{dr}$$

www.iran-ieee.com

راکتانس خازنی خط سه فاز با آرایش زیر را برحسب km و mile حساب کنید

هادی: ACSR



$$C_n = \frac{2\pi\varepsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}}$$

$C_n \rightarrow$ برحسب میکروفاراد $\rightarrow \begin{cases} \times 10^{-6} \\ \times 10^{-9} \end{cases}$

$\frac{F}{km} \rightarrow X = \frac{1}{2\pi f C}$ Ω.km

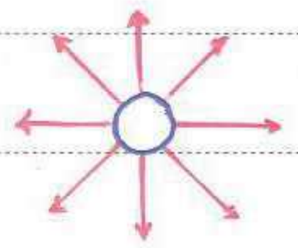
$\frac{F}{mile} \rightarrow X = \frac{1}{2\pi f C}$ Ω.mile

$$GMD = \sqrt[3]{10 \times 10 \times 20}$$

$$GMR = \sqrt[3]{d^2 r}$$

PAPCO
www.iran-ieee.com

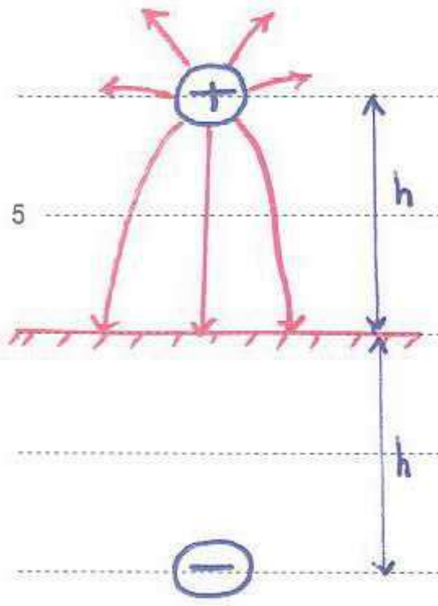
اثر زمین در کاپاسیتانس خطوط انتقال :



هادی دور از زمین

آگر هادی ها از زمین فاصله زیادی داشتند

آنگاه : $C_{ab} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}}$



هادی نزدیک زمین

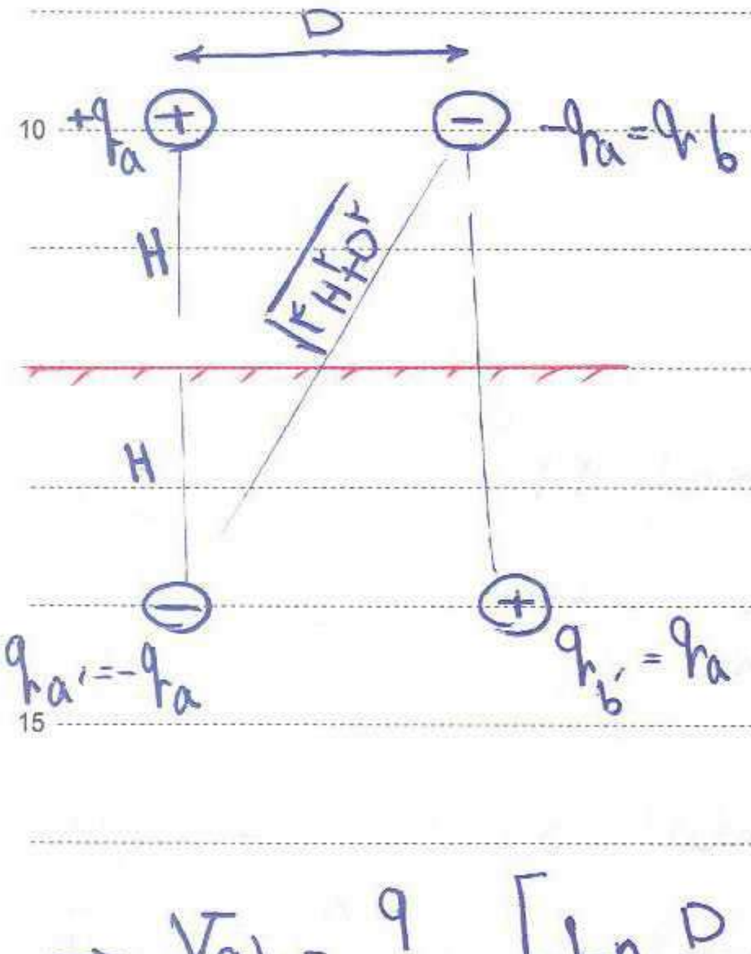
a_0

b_0

q ناصله بار تا

$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_{qb}}{D_{qa}}$

ناصله بار تا



$aa' = 2H = bb'$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0}\left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} + q_{a'} \ln \frac{D_{ba'}}{D_{aa'}} + q_{b'} \ln \frac{D_{bb'}}{D_{ba'}}\right]$$

$q_{a'} = -q_a$, $q_{b'} = q_a$

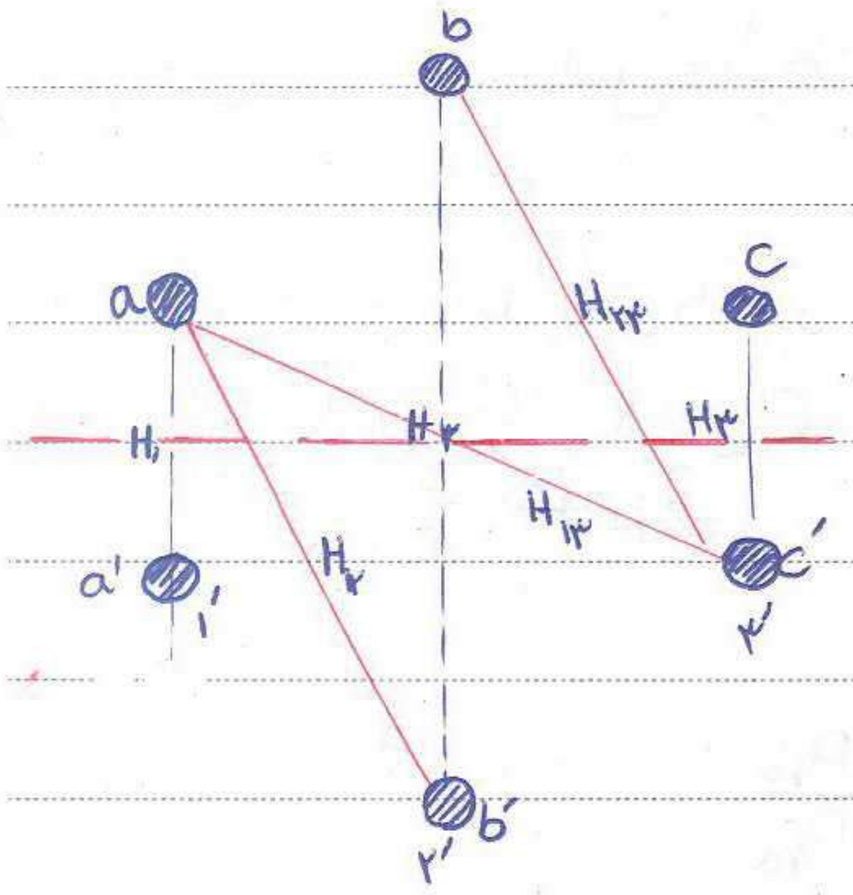
$$\Rightarrow V_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\left[\ln \frac{D}{r} - \ln \frac{r}{D} - \ln \frac{\sqrt{4H^2+D^2}}{2H} + \ln \frac{2H}{\sqrt{4H^2+D^2}}\right]$$

$$\Rightarrow V_{ab} = \frac{q}{2\pi\epsilon_0}\left[2\ln \frac{D}{r} + 2\ln \frac{2H}{\sqrt{4H^2+D^2}}\right] = \frac{q}{\pi\epsilon_0} \ln \frac{2HD}{r\sqrt{4H^2+D^2}}$$

$$\Rightarrow C_{ab} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{2HD}{\sqrt{4H^2+D^2}}} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r\sqrt{1+\frac{D^2}{4H^2}}}} \xrightarrow{K = \sqrt{1+\frac{D^2}{4H^2}}} C_{ab} = \frac{\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{rK}}$$

بنابراین ظرفیت نسبت به حالت قبل بیشتری شود

www.iran-ieee.com



V_{ab} = سشن جبلی
V_{ac} = سشن جبلی
} → دوطرف را با هم جمع می‌کنیم.

$$\rightarrow C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D_{eq}}{r} - \ln\frac{H_S}{H_m}}$$

$$H_m = \sqrt[3]{H_1 H_2 H_3}$$

$$H_S = \sqrt[3]{H_{12} H_{13} H_{23}}$$

$$C_n = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\frac{D}{r}}$$

مثال: خط سه‌فاز 132^{kV} ازهادی ACSR کد استریج تشکیل شده و دارای آرایش زیر است. کاپاسیتانس هر فاز برحسب $\frac{F}{km}$، سوسپتانس خازنی هر فاز برحسب $\frac{S}{km}$ حساب کنید.

اگر طول خط 200^{km} باشد راکتانس خازنی آن چند اهم است (فرکانس ۵۰ هرتز)
اگر توان مبنا 100^{MVA} باشد راکتانس و سوسپتانس کل خط برحسب pu را بدست آورید.
اگر اثر زمین لحاظ نشود، چه مقدار خطا ایجاد می‌شود.

$$H_1 = H_2 = H_3 = 20^{m}$$

$$H_{12} = \sqrt{25^2 + 40^2}$$

$$H_{13} = \sqrt{10^2 + 40^2}$$

$\Rightarrow C_n$ محاسبه می‌شود F/m

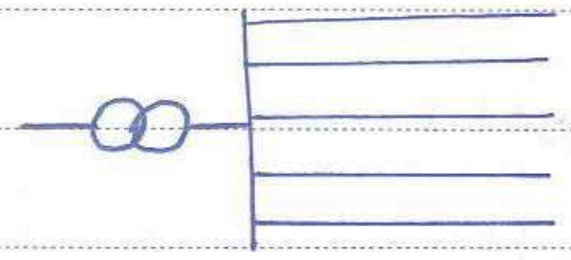
$C_n \times 10^{-3} \rightarrow F/km$

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

جریان بارگیری خط:



چون انتهای باز است نباید از منبع جریان کشیده شود اما به علت خازن های موجود در طول خط جریان کشیده می شود و چون خازن خالص است جریان با ولتاژ 90° اختلاف فاز دارد پس توان راکتیو مصرف می شود

ظرفیت کل خط

$$B = 2\pi f C$$

$$I_{ch} = 2\pi f c V$$

واحد مقابل با توجه به واحد عنصر مشخص می شود.

$$Z = R + jX$$

$$Y = G + jB$$

R, L و C خود را نشان می دهند که از خط جریان عبور کنند.

کاپاسیتانس و C ولتاژ روی خط جریان گیر خود را نشان می دهد.

خازن به صورت موازی قرار می گیرد و سلف را سری قرار می دهیم.

G می گوید که یک مقاومت را نیز باید با خازن موازی کنیم. این مقاومت ها مربوط به نشتی جریان است.

یعنی یک مقدار جریان از یک فاز نشت کند و هوای اطراف یونیزه گردد و پدیده ی کرونا رخ دهد.

این پدیده باعث انتشار انرژی در فضا و تلف آن و همچنین نویز روی خط مخابراتی می گردد اگر خط انتقال خوب طراحی شود آنگاه G را در نظر نمی گیریم. ($G=0$)

* اگر ایزولاتور مناسب نباشد (ترک داشته باشد یا کثیف باشد) آنگاه مقداری جریان نشت کرده و از طریق دکل به زمین منتقل می شود.

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

فصل ۵ - مدلسازی خطوط و ارتباط ولتاژ و جریان ابتدا و انتها:

در این فصل Z و Y از طریق روش‌های دو فصل قبل محاسبه هستند. می‌خواهیم خط انتقال را برداشته و آن را مدل کنیم. مشابه قبل یک فاز را مدل می‌کنیم.

انواع خطوط:

خط کوتاه	$l<50$ mile	STL	Z — پارامترها گسترده در نظر گرفته می‌شوند.
خط متوسط	$50\ \text{mile}<l<150\ \text{mile}$	MTL	Y, Z
خط طویل	$l>150$ mile	LTL	Y, Z — پارامترها گسترده در نظر گرفته می‌شوند.

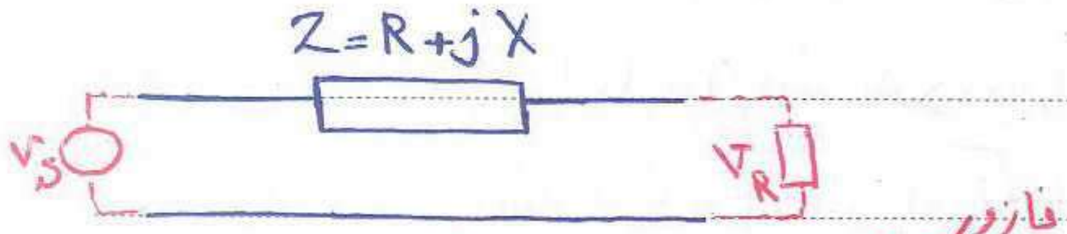
برای خطوط کوتاه از کاپاسیتانس صرف نظر می‌شود و ادمیتانس موازی خط را صرف نظر می‌کنیم.

$$c = f\lambda \Rightarrow \lambda\Big|_{f=50\,Hz} = 6000\ km$$

خط اگر 1000^{km} شود آنگاه به طول موج نزدیک شده‌ایم و تقریب نشود. خطای زیادی خواهد داشت.

مدلسازی خط کوتاه:

معمولاً ولتاژ و جریان بار را داریم و از طریق ماتریس مقابل ولتاژ و جریان ابتدای خط را بدست می‌آوریم.



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

فازور — فازور

$$V_S = V_R + Z I_R \Rightarrow \begin{cases} A = 1 \\ B = Z \\ C = 0 \\ D = 1 \end{cases}$$
$$I_S = I_R$$

برای حل در سیستم پریونیت I_R ، V_R و Z را پریونیت کرده و مقادیر V_S و I_S را برحسب پریونیت بدست می‌آوریم.

* پایه‌ها هم در طرف فرستنده و هم گیرنده یکسان هستند.

P4PCO

www.iran-ieee.com

Subject :

Year . Month . Date . ( )

رگولاسیون : معمولاً درصد گیرنده حساب می‌شود.

$$Reg\% = \frac{|V_{NL}| - |V_{FL}|}{|V_{FL}|} \times 100\ \%$$

علت رگولاسیون نامناسب ولتاژ در طول خط به دلیل امپدانس سری خط است.

$$Reg\ \% = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_R|} \times 100\ \%$$

رگولاسیون نباید از یک درصدی زیاد شود و برای اصلاح آن می‌توان هادی‌های خط را ضخیم‌تر کرد یا با سری کردن یک خازن با خط قسمت موهومی امپدانس سری خط را کوچکتر کرد.

A، B، C و D را ثابت‌های خط می‌گویند. این ثابت‌ها از Z و Y به دست می‌آیند.

$$\left.\begin{array}{l} V_S = AV_R + BI_R \\ I_R = 0 \end{array}\right\} \Rightarrow V_S = AV_R \Rightarrow (|V_R|)_{NL} = \frac{|V_S|}{A}$$

$$Reg\ \% = \frac{\frac{|V_S|}{A} - |V_R|^{FL}}{|V_R|^{FL}} \times 100\ \%$$

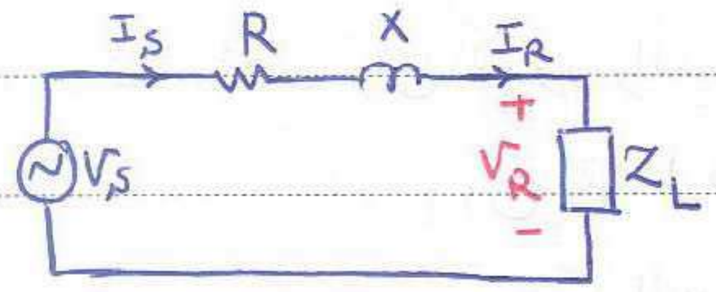
فرمول کلی برحسب ثابت‌های خط :

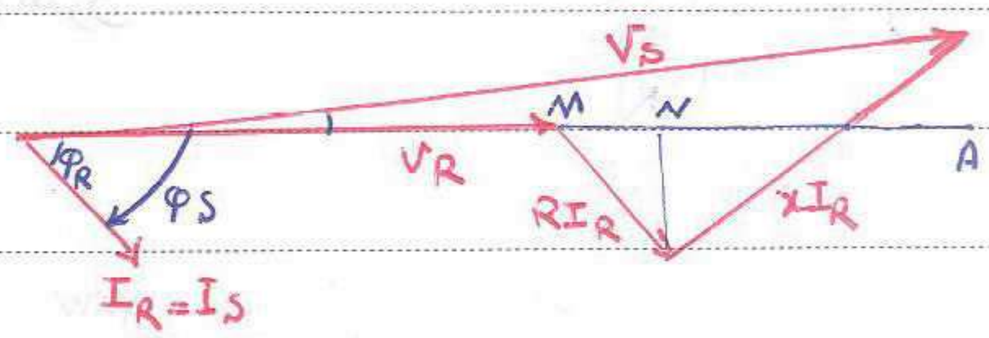
www.iran-ieee.com

Subject: جلسه یازدهم

Year. Month. ۸ Date. ۱۶ ( )

مدل خط کوتاه (ادامه) :





$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \qquad A = D = 1$$

$$B = Z \quad C = 0$$

$\varphi_R = (V_R, I_R)$ $\cos\varphi_R =$ ضریب قدرت انتهای خط (بار)

$\varphi_S = (V_S, I_S)$ $\cos\varphi_S =$ ضریب قدرت ابتدای خط (مولد)

$$S_S = V_S I_S^* = P_S + jQ_S \longrightarrow \begin{cases} P_S = |V_S||I_S|\cos\varphi_S \\ Q_S = |V_S||I_S|\sin\varphi_S \end{cases} \quad , \varphi_S = \tan^{-1}\frac{Q_S}{P_S}$$

$$S_R = V_R I_R^* = P_R + jQ_R \qquad \varphi_R = \tan^{-1}\frac{Q_R}{P_R}$$

$$\left.\begin{aligned} P_S &= P_R + P_{loss} \\ P_{loss} &= R|I_R|^2 \end{aligned}\right\} \longrightarrow \eta\% = \frac{P_R}{P_S} \times 100\%$$

$R|I_R|^2 \rightarrow$ توان اکتیو مصرفی خط

$$Q_S = Q_R + Q_L$$

$Q_S = Q_R \times X(I_R)^2 \leftarrow$ توان راکتیو مصرفی خط

$$AM = AN + MN = RI_R\cos\varphi_R + XI_R\sin\varphi_R \longrightarrow \%Reg = \frac{RI_R\cos\varphi_R + XI_R\sin\varphi_R}{V_R} \times 100$$

$\xrightarrow[\text{توان مصرف کننده}]{\text{رگولاسیون برحسب}}$ $\%Reg = \frac{RP_R + XQ_R}{V_R^2} \times 100$

بنابراین افت ولتاژ اولاً با دلیل امپدانس خط ایجاد می شوند. یعنی اگر امپدانس خط صفر باشد آنگاه افتی نخواهیم داشت. ولی اگر امپدانس صفر نباشد آنگاه، Q_R و P_R یعنی توانی که از خط می کشیم نیز در افت

www.iran-ieee.com

مؤثرند. چون توان اکتیو راکتیو باهم از خط عبور داده می‌شوند هر دو افت ایجاد می‌کنند. می‌توانیم P_R را از نیروگاه بگیریم ولی Q_R را در محل بگیریم یعنی نیروگاه فقط مقدار توان راکتیو مصرفی خط را تأمین می‌کند و بدین ترتیب رگولاسیون بهبود داده می‌شود.

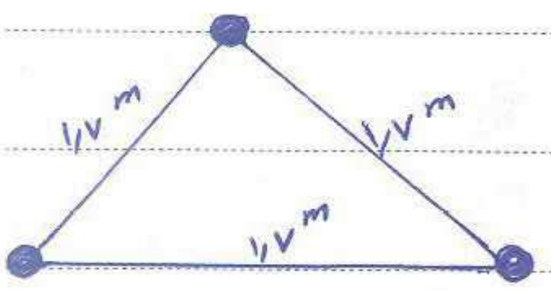
$$\% Reg = \frac{R P_R}{V_R^2}$$

5

مثال: یک خط سه‌فاز 11^{kV} با طول 15^{km} توان 3^{MW} را تحویل مصرف کننده می‌دهد. تلفات خط ۱۰٪ توان مصرفی است. ضریب قدرت با ۰٫۸ پس‌فاز خط انتقال دارای آرایش مثلث و فاصله هادی‌ها از همدیگر ۱٫۷ متر است. ولتاژ ابتدای خط و رگولاسیون را بدست آورید. شعاع هادی ۵ میلی متر و فرکانس ۵۰ هرتز است.

$l = 15^{km}$ ⟶ خط کوتاه است. $V_R = 11^{kV}$

10



$$X = 2\pi f L = 2\pi \cdot 50 \times 2\times10^{-7} \ln\frac{1.7}{0.7788\times10^{-3}\times0.5} \frac{\Omega}{m} \times 15000\ m = 5.72\ \Omega$$

$P_{loss} = 10\%\ (\text{توان مصرفی}) = 3\times10^5 = \underbrace{3}_{\text{توان در سه فاز}} R I^2$

$P_R = \sqrt{3}\, V_R I_R \cos\varphi_R \Rightarrow 3\times10^6 = \sqrt{3} \times 11\times10^4 \times |I_R| \times 0.8 \Rightarrow |I_R| = 197^A \longrightarrow I_R = 197\angle -36.9^\circ$

$3\times10^5 = 3 R I^2 \Rightarrow R = 2.58\ \Omega$

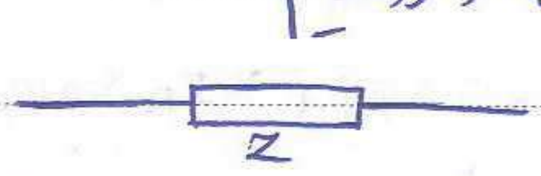
$Z = 2.58 + j\,5.72\ \Omega$

حال باید رگولاسیون خط را بدست آوریم، پس باید V_S را حساب کنیم.

$V_S = A V_R + B I_R \longrightarrow V_S = V_R + Z I_R \Rightarrow V_S = \frac{11000}{\sqrt{3}} + (2.58 + j\,5.72)(197\angle -36.9^\circ)$

$\Longrightarrow V_S = 7432 + j\,5954 = 7456\angle 38.58^\circ$

V_S فازی است زیرا $V_R = \frac{11000}{\sqrt{3}}$ را قرار دادیم.



خطی $V_S = \sqrt{3} \times 7456 \times 10^{-3} = 12.91^{kV}$

$I_S = I_R = 197\angle -36.9^\circ$

25

$$\begin{cases} V_R = \frac{11000}{\sqrt{3}} = 6350^V \\ I_R = 197\angle -36.9^\circ \end{cases} \qquad \begin{cases} V_S = 7456\angle 38.58^\circ \\ I_S = 197\angle -36.9^\circ \end{cases}$$

$$\%Reg = \frac{7456 - 6350}{6350} \times 100 = 17\%$$

www.iran-ieee.com

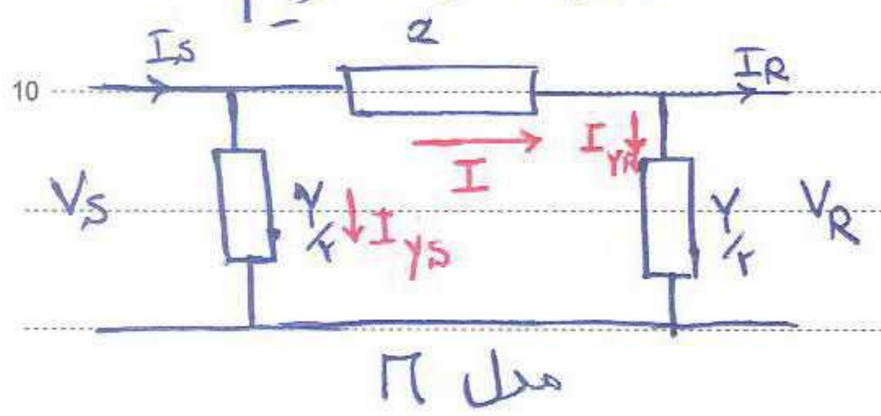
بهترین راه برای محاسبه ضریب تندرت ابتدای خط اینست که توان آن را ابتدا حساب کنیم.

$$S_S = V_S I_S^* = (۷۴۵۶ \angle ۴,۵۸)(۱۹۷ \angle ۳۶,۹) = \underbrace{۷۴۵۶ \times ۱۹۷}_{\text{توان هرماز}} \angle ۴۱,۴۸^\circ = P_S + jQ_S$$

راندمان خط را بیزی توانیم حساب کنیم.

خط متوسط:

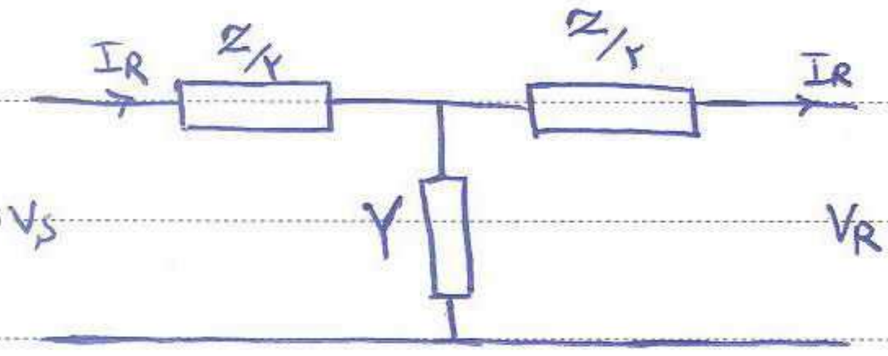
درخط کوتاه از خاصیت خازنی خط صرف نظر کردیم اما اینجا این خاصیت را نیز در نظر می گیریم.



مدل Π

معمولاً V_R , I_R معلومند و ما می خواهیم V_S و I_S را بدست آوریم.

$$\left.\begin{aligned} V_S &= V_R + ZI \\ I &= I_R + I_{YR} = I_R + \tfrac{Y}{2} V_R \end{aligned}\right\} \longrightarrow$$



T مدل

$$V_S = V_R + \left(I_R + \tfrac{Y}{2} V_R\right) Z \Rightarrow V_S = \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_{A} V_R + \underbrace{Z}_{B} I_R$$

$$I_S = I + I_{YS} = I_R + \tfrac{Y}{2} V_R + \tfrac{Y}{2} V_S = I_R + \tfrac{Y}{2} V_R + \tfrac{Y}{2}\left(\left(1 + \tfrac{ZY}{2}\right) V_R + ZI_R\right)$$

$$\Rightarrow I_S = \underbrace{Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)}_{C} V_R + \underbrace{\left(1 + \frac{ZY}{2}\right)}_{D} I_R$$

$$\begin{cases} A = D = 1 + \dfrac{ZY}{2} \\ B = Z \\ C = Y\left(1 + \dfrac{ZY}{4}\right) \end{cases}$$

اگر در روابط فوق به جای Z صفر قرار دهیم، پارامترهای خط کوتاه بدست می آیند.

ضریب تندرت ابتدای خط را می توان با محاسبه توان مختلط در ابتدای خط بدست آورید.

شاخه های خازنی توان راکتیو تولید می کنند در حالی که خط توان راکتیو مصرف می کند.

$$\%Reg = \frac{\frac{|V_S|}{|A|} - |V_R|}{|V_R|} \times 100$$

$$A = 1 + \frac{ZY}{2}$$

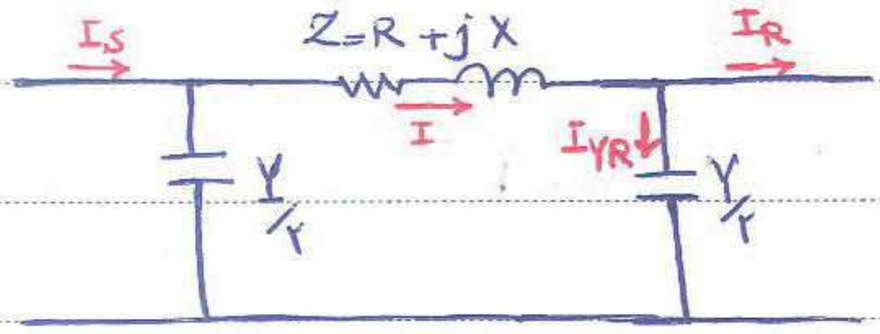
www.iran-ieee.com

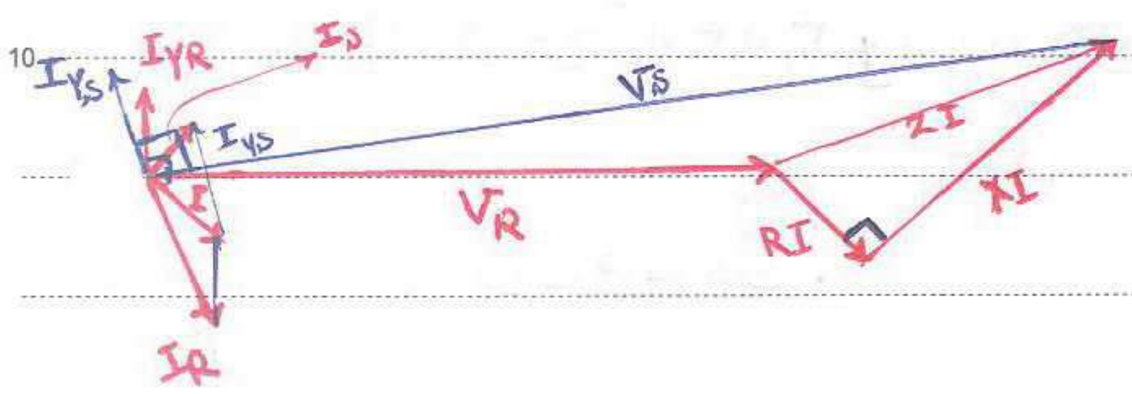
مدلسازی خط متوسط:

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

$$\begin{cases} A = D = 1 + \frac{ZY}{2} \\ B = Z \\ C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) \end{cases}$$

برای پریوسیت کردن چون A, D واحد ندارند پس تغییری نمی‌کنند، لی B باید با Z_b و C با Y_b باید تقسیم شود تا پریوسیت شوند.





$$S_S = V_S I_S^* = P_S + jQ_S$$

$$\tan\varphi_S = \frac{Q_S}{P_S}$$

ضریب قدرت ابتدای خط $= \cos\varphi_S$

برای محاسبای ضریب قدرت ابتدای خط بهتر است، ابتدا I_S را حساب کرده و از روی آن φ_S و $\cos\varphi_S$ را بدست آوریم.

یک خط انتقال سه‌فاز 230^{kV} و طول 150^{km} از هادی ها ACSR با کد باتریچ تشکیل شده است خط انتقال دارای آرایش افقی و فاصله هر هادی متوالی 5^m است مقاومت هر فاز $0.2\frac{\Omega}{km}$ است اگر در ابتدای خط ولتاژ 230^{kV} و توان مصرفی 200^{MW} با ضریب قدرت ۰.۸۵ پس فاز با سل، محاسبه کنید

الف) ولتاژ ابتدای خط

ب) رگولاسیون خط

ج) ضریب توان ابتدای خط

د) راندمان خط

و) بررسی تعادل توان اکتیو و راکتیو در خط

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

مرحله اول: محاسبه امپدانس خط:

$Z = R + j2\pi fL$

$R = 0.2 \frac{\Omega}{km} \times 150^{km} = 30\ \Omega$

* در شبکه‌های انتقال $X > R$
در شبکه‌های توزیع $R > X$

$X = 2\pi f L = 2\pi \times 50 \times 2\times10^{-7} \ln \frac{4.2}{0.00044} \frac{\Omega}{m} \times 150000^{m} = 47.95\ \Omega$

$D_{eq} = \sqrt[3]{5\times5\times10} = 4.2\ m$

$D_S = 0.721' \times 0.13048 = 0.00044\ m$

$Z = 30 + 47.95j \quad \Omega = 71.27\angle 45.1^\circ$

مرحله دوم: محاسبه Y خط:

$r = \frac{0.642''}{2\times12} \times 0.3048 = 0.000815^{m}$

تبدیل به فوت ← تبدیل به شعاع

$Y = j2\pi fc = j2\pi 50 \frac{2\pi \times 8.85\times10^{-12}}{\ln \frac{4.2}{0.000815}} \frac{S}{m} \times 150000 = j\,3.94\times10^{-4} S = 3.94\times10^{-4}\angle 90^\circ$

مرحله سوم: محاسبه ABCD خط:

$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases}$

$A = D = 1 + \frac{ZY}{2} = 1 + \frac{(71.27\angle 45.1^\circ)(3.94\times10^{-4}\angle 90^\circ)}{2} = 0.9872 + j\,0.00059 = 0.9872\angle 0.34^\circ$

معمولاً زاویه‌ی A خیلی کوچک است.

$B = Z = 71.27\angle 45.1^\circ$

$C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) = (3.94\times10^{-4}\angle 90^\circ)\left(1 + \frac{(71.27\angle 45.1)(3.94\times10^{-4}\angle 90^\circ)}{4}\right) = 3.91\times10^{-4}\angle 90.17^\circ$

مرحله چهارم: تعیین V_R ، I_R:
(اگر خواستیم ریپوینت حل کنیم $V_b = 230^{kV}$)

$V_R = \frac{230\times10^{3}}{\sqrt{3}} = 132800\angle 0^\circ$

$P_R = \sqrt{3}\,|V_R||I_R|\cos\varphi_R$

$\Rightarrow 200\times10^{6} = \sqrt{3} \times 230\times10^{3} |I_R| \times 0.85 \Rightarrow |I_R| = 590.64 \Rightarrow I_R = 590.64\angle -31.8^\circ$

مرحله پنجم: محاسبه V_S ، I_S:

$V_S = (0.9872\angle 0.34^\circ)(132800\angle 0^\circ) + (71.27\angle 45.1^\circ)(590.64\angle -31.8^\circ)$

$\Rightarrow V_S = 147960\angle 1.17^\circ$ ولتاژ $\Rightarrow (V_S)_L = 290.93\ kV$

$I_S = CV_R + DI_R = (3.91\times10^{-4}\angle 90.17)(132800\angle 0^\circ) + (0.9872\angle 0.34^\circ)(590.64\angle -31.8^\circ)$

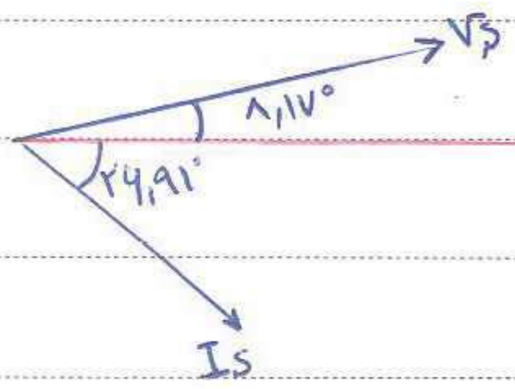
$\Rightarrow I_S = 557.4\angle -24.91^\circ\ A$

www.iran-ieee.com

Subject:

Year. Month. Date. ( )

$$\%Reg = \frac{\frac{۲۹.۱۹^{k}}{.۱۹۸۷۲} - ۲۳۰}{۲۳۰} \times ۱۰۰ \ \% = ۲۸.۱ \ \%$$



$$\Rightarrow \cos\varphi_S = \cos(۸.۱۷^{\circ} + ۲۴.۹۱^{\circ})$$

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_R}{P_S} \times ۱۰۰$$

$P_S = \sqrt{۳}\ \underbrace{V_S}_{\text{خطی}}\ I_S \cos\varphi \rightarrow$ چون V_S خطی را گذاشتیم پس توان سه فاز است.

$$S_S = V_S I_S^{*} = (۱۹۷۹۷۰ \angle ۸.۱۷)(۵۵۷.۴ \angle ۲۴.۹۱^{\circ}) = ۱۹۷۹۷۰ \times ۵۵۷.۴ \angle (۸.۱۷ + ۲۴.۹۱)^{\circ}$$

$$S_S = ۱۹۷۹۷۰ \times ۵۵۷.۴ \cos(۸.۱۷ + ۲۴.۹۱) + j\, ۱۹۷۹۷۰ \times ۵۵۷.۴ \sin(۸.۱۷ + ۲۴.۹۱)$$

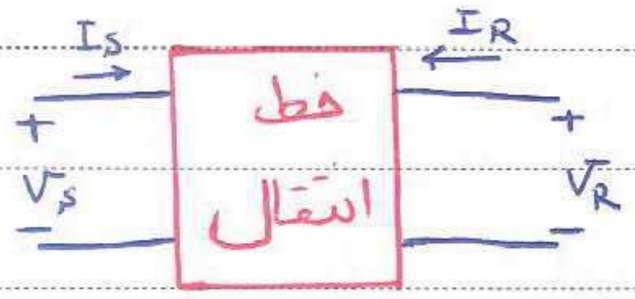
تعادل توان:

الف) اکتیو: توان P_S و P_R باید به اندازه‌ای باشد که روی R مصرف می‌شود.

ب) راکتیو: توان Q_S و Q_R باید در خازن‌ها و سلف باشد.

مثال فوق را در حالتی که هادی ACSR کد دریک بوده و آرایش افقی با فاصله ۴^{m} داشته باشیم، و فاصله هادی‌ها تا زمین نیز ۸ متر باشد راحسابکنید.

www.iran-ieee.com



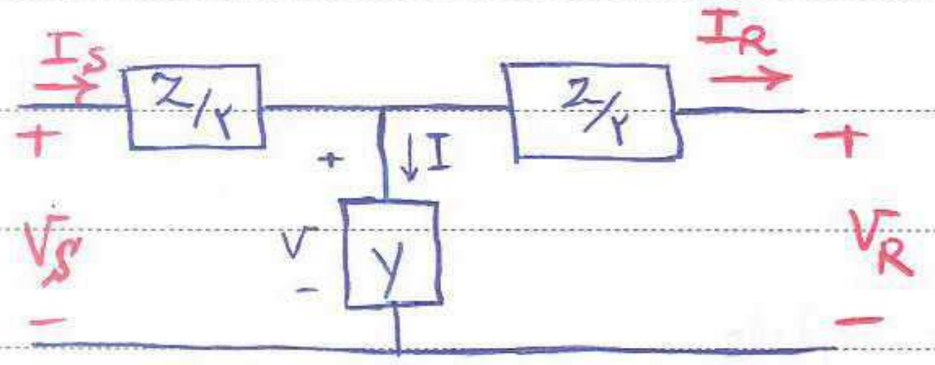
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

خطوط زیر ۲۴۰^{km} ۱۵۰^{mile} را می‌توان با مدارهای الکتریکی نشده مدل کرد.

اگر خط کمتر از ۵۰^{mile} باشد می‌توان از خاصیت خازنی صرف نظر کرد.

اگر خط دارای طول بیشتر از ۵۰^{mile} و کمتر از ۱۵۰^{mile} باشد آنگاه، باید خاصیت خازنی را نیز تأثیر داد.

مدل T برای خطوط متوسط:



$$\left.\begin{aligned} I &= YV = Y(V_R + \tfrac{Z}{۲} I_R) \\ I_S &= I + I_R \end{aligned}\right\} \Rightarrow I_S = Y V_R + \frac{ZY}{۲} I_R + I_R \Rightarrow \underbrace{I_S}_{C} = \underbrace{Y}_{C} V_R + \underbrace{\left(۱ + \frac{ZY}{۲}\right)}_{D} I_R$$

$$V_S = V + \tfrac{Z}{۲} I_S = V_R + \tfrac{Z}{۲} I_R + \tfrac{Z}{۲}\left(Y V_R + \left(۱ + \frac{ZY}{۲}\right) I_R\right) \Rightarrow V_S = \left(۱ + \frac{ZY}{۲}\right) V_R + Z\left(۱ + \frac{ZY}{۴}\right) I_R$$

$$\Rightarrow T_۲ = \begin{bmatrix} ۱ + \frac{ZY}{۲} & Z\left(۱ + \frac{ZY}{۴}\right) \\ Y & ۱ + \frac{ZY}{۲} \end{bmatrix}$$

برای حل مدار دوروش کروشن را داریم. گره‌ها همان باس‌های خط انتقال هستند و ممکن است با راحتی قابل به دست آوردن نیستند. در مدل Π باس‌ها یا گره‌های خط انتقال تغییری نمی‌کند اما در مدل T به ازای هر خط یک گره یا گره‌های مدار اضافه می‌شود و حل مدار را دشوارتر می‌کند.

www.iran-ieee.com

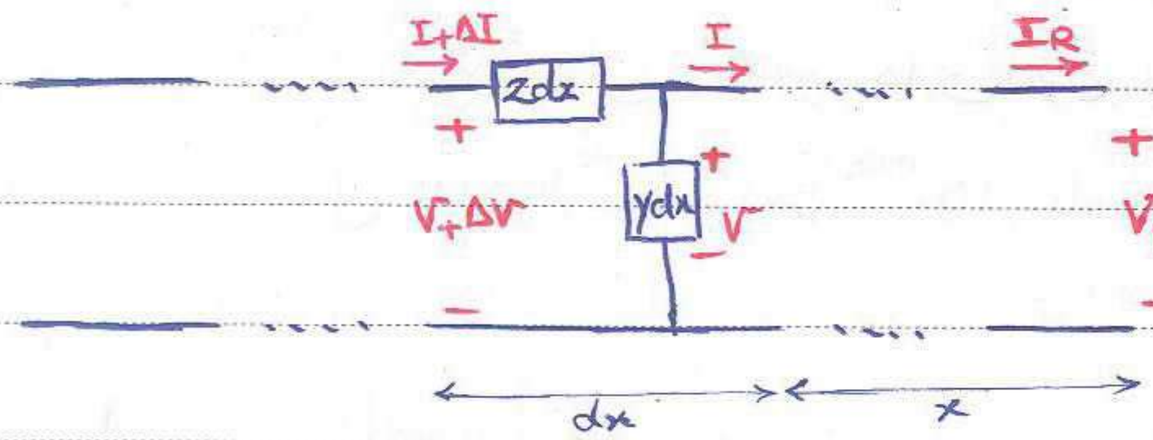
Subject:

Year. Month. Date. ( )

خط طویل:

این خطوط دارای طولی بیشتر از 240^{km} هستند و نمی‌توان آنها را با مدار فشرده تقریب زد. برای مدل کردن این خطوط یک dx از خط را در نظر می‌گیریم. آن را امپدانس و ادمیتانس واحد طول خط به ترتیب z و y باشند امپدانس و ادمیتانس dx برابر با zdx و ydx خواهد بود.

* مرجع مکان را انتهای خط در نظر می‌گیریم.



$$I + \Delta I = I + ydx\,V \Rightarrow dI = yV dx$$

$$dV = zdx(I + dI) = zIdx + z\,dI\,dx \Rightarrow dV = zI dx \quad (dI\,dx \simeq 0)$$

$$\frac{dV}{dx} = zI \xrightarrow{\text{گیری}} \frac{d^2V}{dx^2} = z\frac{dI}{dx} = zyV \Rightarrow \frac{d^2V}{dx^2} - zyV = 0$$

معادله مشخصه: $S^2 - zy = 0 \Rightarrow S_{1,2} = \pm\sqrt{zy}$

$$V(x) = A_1 e^{\sqrt{zy}\,x} + A_2 e^{-\sqrt{zy}\,x}$$

$$I(x) = \frac{1}{z}\frac{dV}{dx} = \frac{1}{z}\left[\sqrt{zy}\,A_1 e^{\sqrt{zy}\,x} - \sqrt{zy}\,A_2 e^{-\sqrt{zy}\,x}\right]$$

$$\begin{cases} \gamma \triangleq \sqrt{zy} & \text{ضریب انتشار} \\ Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} & \text{امپدانس مشخصه} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \\ I(x) = \frac{A_1}{Z_c} e^{\gamma x} - \frac{A_2}{Z_c} e^{-\gamma x} \end{cases}$$

برای بدست آوردن A_1 و A_2 از شرایط مرزی موجود در انتهای خط بدست می‌آوریم.

$$V_R = V(x)\Big|_{x=0} \Rightarrow A_1 + A_2 = V_R$$

$$I_R = I(x)\Big|_{x=0} \Rightarrow \frac{A_1}{Z_c} - \frac{A_2}{Z_c} = I_R$$

از دو معادله‌ی فوق، دو مجهول A_1 و A_2 را بدست می‌آوریم.

$$\Rightarrow \begin{cases} A_1 = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} \\ A_2 = \frac{V_R - Z_c I_R}{2} \end{cases}$$

www.iran-ieee.com

پس خواهیم داشت :

$$\bar{V}(x) = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_c I_R}{2} e^{-\gamma x}$$

$$I(x) = \frac{V_R + Z_c I_R}{2Z_c} e^{\gamma x} - \frac{V_R - Z_c I_R}{2Z_c} e^{-\gamma x}$$

با روابط فوق می‌توانیم ولتاژ و جریان هر نقطه از خط را بدست آوریم . پس در مورد ابتدای خط داریم :

$$V_S = V(x)\Big|_{x=l\,:\,\text{طول خط}} = \frac{V_R + Z_c I_R}{2} e^{\gamma l} + \frac{V_R - Z_c I_R}{2} e^{-\gamma l}$$

$$I_S = I(x)\Big|_{x=l} = \frac{V_R + Z_c I_R}{2Z_c} e^{\gamma l} - \frac{V_R - Z_c I_R}{2Z_c} e^{-\gamma l}$$

حال برای تمیز، پارامترهای مدار روابط را به صورت زیر می‌نویسیم :

$$V(s) = \underbrace{\left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2}\right)}_{\cosh \gamma l} V_R + Z_c \underbrace{\left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2}\right)}_{\sinh \gamma l} I_R$$

$$I(s) = \frac{1}{Z_c}\left(\frac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2}\right) V_R + \left(\frac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2}\right) I_R$$

$$\Rightarrow \begin{cases} V_S = \cosh(\gamma l)\, V_R + Z_c \sinh(\gamma l) I_R \\ I_S = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) V_R + \cosh(\gamma l) I_R \end{cases}$$

$$\Rightarrow T = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix}$$

Z و Y باید واحد طولی باشند که ما آن را برحسب l می‌نویسیم.

برای محاسبه γ و Z_c باید اعداد مختلط را به صورت زیر بدون بیاوریم

ضریب تضعیف دامنی در واحد طول — ضریب تأخیر فاز در واحد طول

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta$$

$$\cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l$$

$$\sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh \alpha l \cos \beta l + j \cosh \alpha l \sin \beta l$$

www.iran-ieee.com

طول موج وسرعت انتشار:

β : میزان اختلاف فاز به ازای واحد طول خط

واحد λ برحسب همان واحدی است که β برحسب آن است.

$\lambda \quad 2\pi$
$1 \quad \beta \Rightarrow$

$e^{\gamma l} = e^{\alpha l} e^{j\beta l}$ ← اختلاف فاز

5

اگر β اختلاف فاز در یک مایل باشد آنگاه واحد λ نیز مایل خواهد بود.

$$\text{سرعت انتشار امواج} = v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

10 رابطه تقریبی سرعت انتشار: فرض می‌کنیم خط بدون تلفات باشد.

$$Z = jX = jL\omega$$
$$Y = jC\omega$$
$$\Rightarrow \gamma = \sqrt{jL\omega \, jC\omega} = j\omega\sqrt{LC} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = 0 \\ \beta = \omega\sqrt{LC} \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{2\pi}{\beta} = \frac{2\pi}{2\pi f\sqrt{LC}} = \frac{1}{f\sqrt{LC}}$$

15

$$\Rightarrow V = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

حال کابردر روابط متقابل که GMR_L متفاوت با GMR_C است

ابید و را برابر فرض کنیم خواهیم داشت:

$$\begin{cases} L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD}{GMR_L} = D_S \\ C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR_C}} = r \end{cases}$$

20

$$V = \frac{1}{\sqrt{\frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD}{GMR} \times \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}}}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} = 3\times10^8$$

در عمل سرعت انتشار امواج الکترومغناطیس از سرعت نور کمتر است.

25

www.iran-ieee.com