



Lec.: *Hojat Moayedirad*, Ph.D. of Electrical Power Engineering, 2018, **Email:** *hojatrada@yahoo.com*

Home pages:

<https://scholar.google.com/citations?user=V28m4S4AAAAJ&hl=en>

<https://orcid.org/0000-0001-9803-9306>

نکات مهم:

۱- با توجه به عدم برگزاری حضوری کلاس‌ها در سال ۹۸، دانشجویان بایستی مطالب درسی بارگذاری شده بر روی سایت را دانلود کرده و مطالعه نمایند و تمرین‌ها را انجام داده و در اولین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹ تحویل دهند.

۲- در دومین جلسه‌ی حضوری در سال ۹۹، از شش جلسه‌ی اول درس، کوئیزی در سطح **آشنایی با مفاهیم** شش جلسه‌ی اول گرفته می‌شود که نمره‌ی آن در نمره‌ی تمرین‌های تحویلی شش جلسه‌ی اول، **ضرب** می‌شود و نمره‌ی حاصل به عنوان نمره‌ی تمرین‌های تحویلی بخش اول، منظور می‌شود.

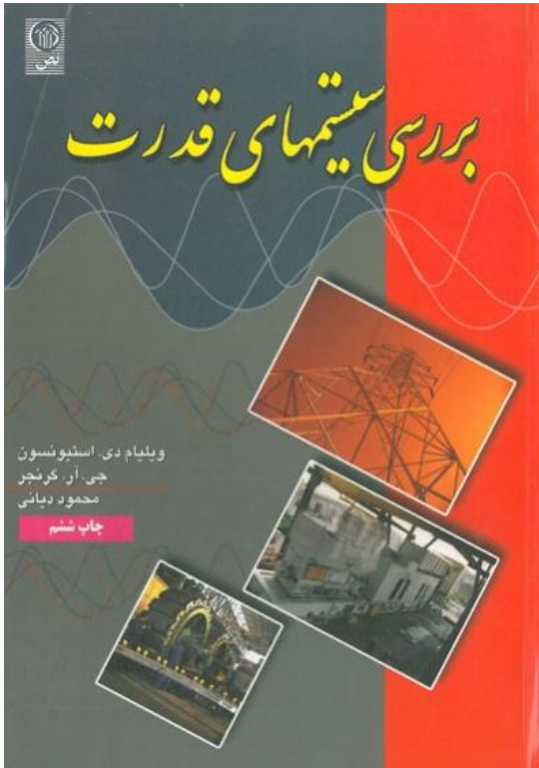
۳- یک نمره از ۵ نمره‌ی سرکلاسی اختصاص به پروژه دارد. پروژه‌ها در صفحه ۴ این فایل آماده است. موضوع پروژه بر اساس رقم آخر شماره‌ی دانشجویی است. مثلاً اگر رقم آخر شماره دانشجویی، ۳ باشد دانشجوی بایستی فقط پروژه شماره‌ی ۳ را انجام دهد. موارد استثناء به این شرح است: رقم آخر شماره دانشجویی که ۹ است پروژه شماره ۶ انجام شود و اگر صفر است پروژه شماره ۴ انجام شود.

۴- با توجه به امکانات پیام رسان **Skype** (<https://www.skype.com>) نظیر ارتباط ویدئو کنفرانسی، دانشجویان تا زمان برگزاری حضوری کلاس‌ها می‌توانند از جهت رفع ابهام و توضیح بیشتر مطالب درس، در روزهای **جمعه و دوشنبه‌ی** هر هفته از ساعت ۳ الی ۴:۳۰ بعدازظهر از طریق اسکایپ با اینجانب ارتباط برقرار کنند. در صورت سوال، دانشجویان می‌توانند از طریق ایمیل با اینجانب ارتباط برقرار کنند.

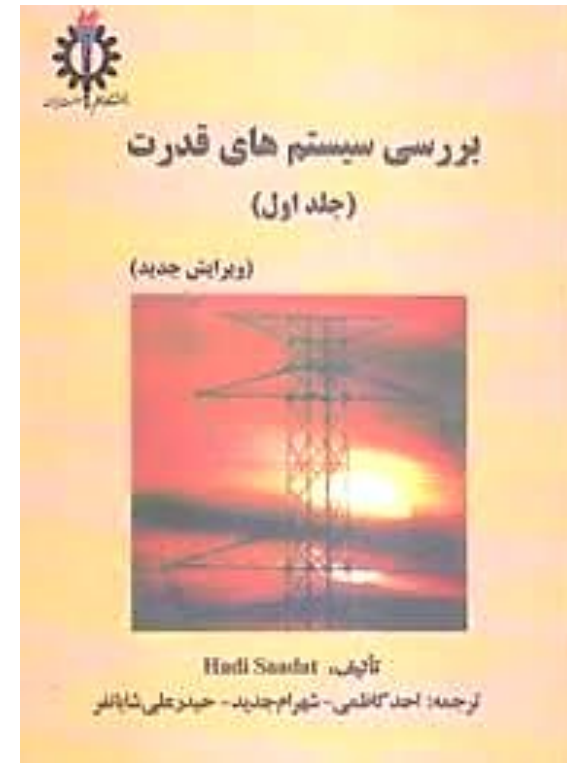
My Skype name: hojatrada



مراجع:



۲- بررسی سیستم قدرت
مؤلفان: گرنجر و استیونسون



۱- بررسی سیستم قدرت (جلد اول)
مؤلف: هادی سعادت

3- Power System Analysis and Design, By: Elgerd

4- Power System Analysis and Design, By: Glover and Sarma

بارم بندی:

بارم بندی				
جمع بارم	فعالیت های کلاسی (۵ نمره)			پایان ترم
	۲۰ نمره	پروژه	تمرین های تحویلی	
۱ نمره		۲ نمره	۲ نمره	۱۵ نمره

توجه: نمره ی کوئیز دومین جلسه ی حضوری در سال ۹۹، جزو ۲ نمره ی کوئیز که در جدول بالا آمده است، نیست و آن کوئیز صرفاً برای راستی آزمایی تمرین های پاسخ داده شده توسط دانشجویان است.

توجه: در سومین جلسه ی حضوری در سال ۹۹، **اولین** کوئیز رسمی برگزار می شود که جزو ۲ نمره ی کوئیز که در جدول بالا آمده است، می باشد.

پروژه ها:

زمان های تحویل پروژه: اوایل خرداد ۱۳۹۹

۱- بررسی خطوط HVDC

۲- بررسی و تحلیل روش های تجدید آرایش شبکه های فشار متوسط (منبع: مقالات معتبر علمی)

۳- تشریح کامل روش پخش بار جاروب رفت و برگشت (backward forward power flow)(منبع: مقالات معتبر علمی)

۴- جبران سازی توان راکتیو در سیستم قدرت (منبع: مقالات معتبر علمی)

۵- نحوه ی بررسی و تحلیل خطاهای متقارن و نامتقارن در شبکه های قدرت (منبع: فصل ۹ و ۱۰، کتاب بررسی ۲ هادی سعادت جلد دوم)

۶- بررسی و تحلیل پایداری های ماندگار و گذرا در سیستم قدرت (منبع: فصل ۱۱ کتاب بررسی ۲ هادی سعادت جلد دوم)

۷- بررسی و تحلیل کنترل سیستم قدرت (منبع: فصل ۱۲ کتاب بررسی ۲ هادی سعادت جلد دوم)

۸- پخش بار بهینه (OPF) (منبع: مقالات علمی و فصل ۷ کتاب بررسی ۱ هادی سعادت جلد اول)

توجه: ارائه ی پروژه به صورت شفاهی (پرسش و پاسخ) است و احتیاجی به آماده کردن هیچ فایل الکترونیکی یا چاپ شده نیست.

توجه: احتیاجی به حفظ کردن هیچ متنی و مداری نیست و دانشجو می تواند در هنگام ارائه ی پروژه برای بیان پاسخ سوالات از

منابع در دسترس خود استفاده کند. هدف از پروژه فهم مطالب مورد بحث است.

جلسه اول

فهرست مطالب

فصل اول: سیستم قدرت، مرور کلی

۱-۱ مقدمه

۲-۱ سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۱ تولید

۲-۲-۱ انتقال و فوق توزیع

۳-۲-۱ توزیع

۴-۲-۱ بار

۳-۱ حفاظت سیستم

فصل دوم: تئوری توان در سیستم قدرت

فصل سوم: مدل های ژنراتور و ترانسفورماتور و سیستم پریونیت

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

فصل اول

۱-۱- مقدمه

تاریخچه:

اولین شبکه برق: سال ۱۸۸۲ در ایالت متحده و در شهر نیویورک توسط توماس ادیسون تأسیس شد. این شبکه، برق را به صورت dc و توسط ژنراتور dc تولید می کرد و از طریق خطوط زیر زمینی به مصرف کننده تحویل می داد .

مشکل اولین شبه برق: تلفات اهمی زیاد (RI^2) در ولتاژهای پایین داشت

لذا در فاصله کوتاهی از نیروگاه انرژی الکتریکی تحویل داده می شد.

* در سال ۱۸۸۵ ترانسفورماتور (افزایش سطح ac رابه همراه داشت) توسط ویلیام استانلی اختراع شد.

* با اختراع موتور القایی در سال ۱۸۸۸ توسط تسلا سیستم توزیع ac گسترده تر شد.

* در ژنراتورهای dc به کموتاتور احتیاج است اما در ژنراتورهای ac به آن احتیاجی نیست لذا در سیستم های ac می توان قدرت بالاتر تولید کرد.

* شرکت ادیسون در سال ۱۸۹۳ اولین سیستم سه فاز ac را با ولتاژ 2.3kv نصب کرد

فصل اول

۱-۱- مقدمه

* در ابتدا تأسیس سیستم های قدرت فرکانس بین ۲۵Hz تا ۱۳۳ Hz متغیر بود.

* نیاز به موازی کردن شبکه های قدرت باهم فرکانس ۶۰Hz توسط ایالت متحده و کانادا و فرکانس ۵۰Hz توسط اکثر کشورهای اروپایی انتخاب شد .

* وقتی فاصله انتقال بیشتر از ۵۰۰ Km باشد خطوط dc برای انتقال انرژی الکتریکی مناسب تر است. چون خطوط dc رکتانس ندارد لذا در مقایسه با هادی هم اندازه خطوط ac توانایی قدرت بیشتری را دارد.

سوال: مشکل اصلی خطوط انتقال dc چیست؟

مزایای سیستم قدرت به هم پیوسته:

۱- در اوج بار به ژنراتور کمتری احتیاج است

۲- اقتصادی تر است

۳- افزایش قابلیت اطمینان

فصل اول

۱-۲- سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۱- تولید

عناصر اصلی سیستم های قدرت ژنراتور های سه فاز ac «انواع ژنراتور سنکرون (آلترناتور)» هستند

محور ژنراتور توسط یک محرک اولیه بعنوان منبع مکانیکی به چرخش در می آید

توربین آبی

توربین بخار

دارای سرعت کمی هستند و رتور آن از نوع قطب برجسته است و دارای چندین قطب هستند.

دارای سرعت بالا هستند و رتور آن از نوع استوانه ای است (دو قطب یا چهار قطب)

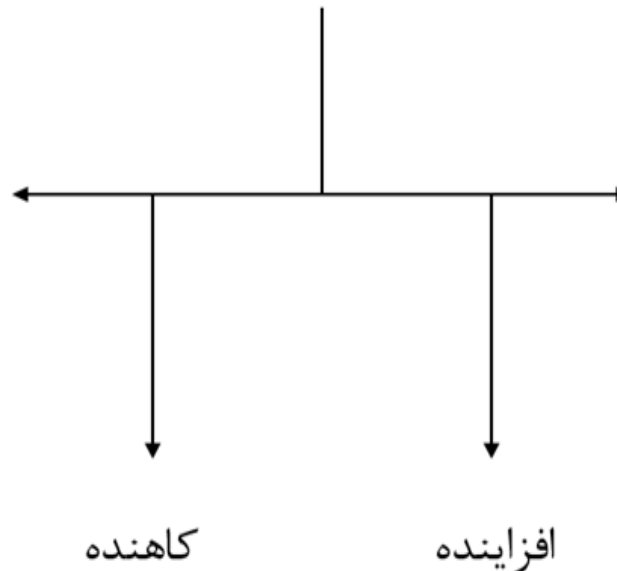
فصل اول

۱-۲- سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۱- تولید

* عنصر مهم دیگر سیستم قدرت ترانسفورماتورها هستند.

قدرت را با بازده بسیار بالا از یک سطح ولتاژ به سطح ولتاژ دیگری انتقال می دهد



برای انتقال قدرت به کار می رود و جریان ثانویه را به $\frac{1}{a}$ کاهش می دهد (کاهش تلفات)

فصل اول

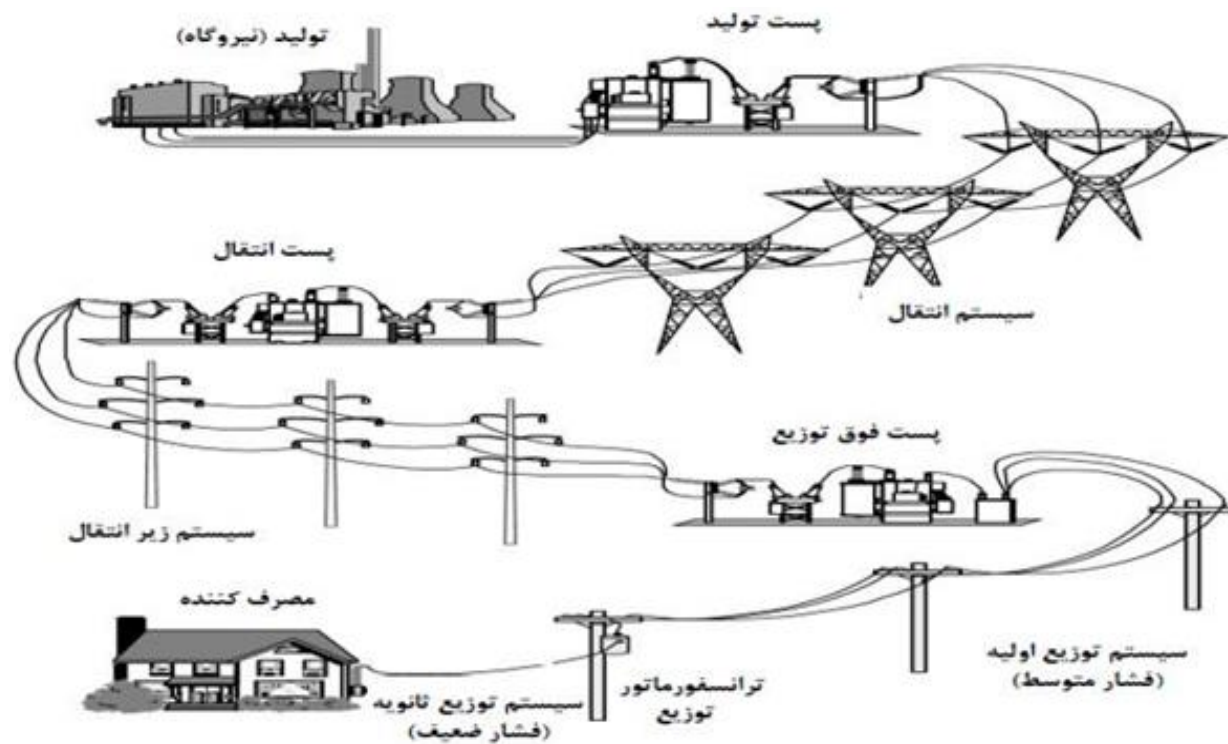
۱-۲- سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۲- انتقال و فوق توزیع:

استاندارد ولتاژهای خط به خط: (در ایالات متحده)

۶۹ ، ۱۱۵ ، ۱۳۸ ، ۱۶۱ ، ۲۳۰ ، ۳۴۵ ، ۵۰۰ ، ۷۶۵ K v

*ولتاژهای بیش از ۲۳۰K v به عنوان ولتاژ فوق فشار قوی (EHV) شناخته می شوند



شماتیکی از نحوه‌ی رسیدن برق به مصرف کننده‌ها

فصل اول

جلسه دوم

۱-۲- سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۲- انتقال و فوق توزیع:

* بخشی از سیستم انتقال که پستهای فشار قوی را از طریق ترانسفورماتورهای کاهنده به پست های توزیع وصل می کند شبکه فوق توزیع نامیده می شود.

* مرز مشخصی برای جداسازی سطوح ولتاژ انتقال و فوق توزیع وجود ندارد. برای مثال سطح ولتاژ فوق توزیع از ۶۹Kv الی ۱۳۸Kv قرار دارد.

* بار بعضی از مصرف کنندگان بزرگ از طریق سیستم فوق توزیع تأمین می گردد

* برای حفظ ولتاژ خط انتقال معمولاً از بانک خازنی و راکتوری در پست ها نصب می شود

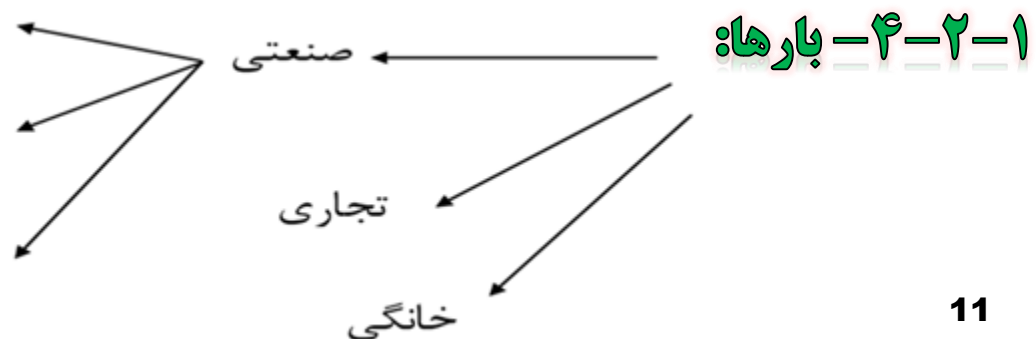
* معمولاً خطوط توزیع اولیه (فشار متوسط) در محدوده ۴Kv الی ۵/۳۴Kv می باشد

۱-۲-۳- سیستم توزیع سیستم توزیع به دو صورت هوایی و زمینی تقسیم می شود

بسیار بزرگ: از سیستم انتقال تغذیه می شود

بزرگ: از سیستم فوق توزیع تغذیه می شود

کوچک: از سیستم mv تغذیه می شود



فصل اول

۱-۲- سیستم قدرت پیشرفته

۱-۲-۴- بارها:

* بارها ماهیت متغیر دارد، در طراحی شبکه قدرت مبحث پیش بینی بار مطرح است که از روش های نظیر شبکه های مصنوعی جهت پیش بینی بار استفاده شود

$$\text{ضریب بار روزانه} = \frac{\text{متوسط بار}}{\text{اوج بار}} \qquad \text{حداکثر تقاضا} = \frac{\text{ظرفیت نصب شده}}{\text{ضریب استفاده}}$$

$$\text{ضریب بار سالانه} = \frac{\text{کل انرژی سالانه}}{۱۷۶۰ \text{ ساعت} * \text{بار اوج}}$$

تمرین تحویلی ۱: انواع روش های تخمین بار (Load Estimation) را نام برده به طور مختصر شرح

دهید. (به مقالات و منابع علمی مراجعه شود.)

فصل اول

۱-۳- حفاظت سیستم قدرت

انواع فیوزها ، انواع کلید قطع

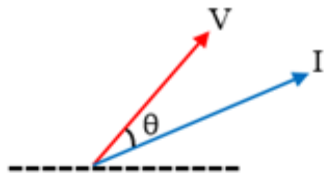
- *یک سیستم قدرت باید ایمن ، اقتصادی ، ومطمئن باشد
- *برای طراحی مناسب باید تجزیه تحلیل زیادی انجام شود و عناصر و خطوط شبکه قدرت به درستی مدل شوند.

*تجزیه تحلیل شامل:

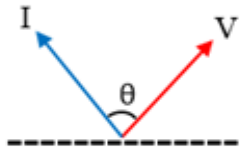
- ارزیابی پارامترهای خط انتقال و عملکرد و جبران سازی آن
- تجزیه و تحلیل پخش بار
- برنامه ریزی اقتصادی بار
- تجزیه تحلیل حالت گذرای ماشین سنکرون
- خطاهای متقارن و نامتقارن
- مطالعات پایداری
- کنترل سیستم قدرت

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

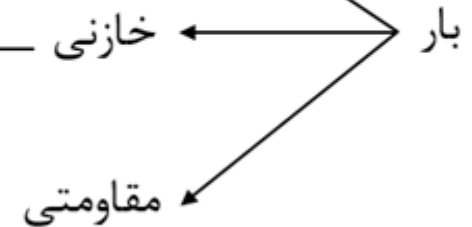
۱- انواع بار:



سلفی ← پس فاز: جریان عقب تر از ولتاژ است (θ مثبت است)



خازنی ← پیش فاز: جریان جلوتر از ولتاژ است (θ منفی است)



$$Z = R + jX \text{ بار}$$

$\theta = \theta_V - \theta_I$: زاویه بین V و I (معروف به زاویه امپدانس)

مؤلفه اهمی ← مؤلفه حقیقی: توان حقیقی (اکتیو) توسط مؤلفه اهمی بار جذب می شود

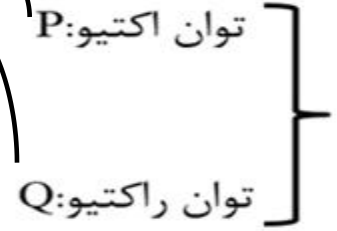
مؤلفه خازنی ← مؤلفه موهومی: باعث مطرح شدن توان موهومی توان اکتیو می شود

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲- معرفی توان ها در سیستم قدرت:

توانی است حقیقی و مفید، که توسط مولفه‌ی اهمی (مقاومتی) بار جذب می‌شود.

توان است مجازی، که توسط مولفه **موهومی** (القایی یا خازنی) بار **گرفته** و **برگشت** داده می‌شود.



ناشی از بار سلفی (القایی): علامت Q مثبت است.

ناشی از بار خازنی: علامت Q منفی است.

متوسط توان راکتیو صفر است. یعنی در بازه ای از زمان تولید و در بازه ای

دیگر مصرف می‌شود. پس Q توان مجازی است در کل کاری انجام نمی

دهد ولی در سیستم قدرت در حال گردش است.

واحد توان راکتیو و اکتیو یکی است. ولی برای تمایز، توان راکتیو بر حسب

وار (var) (ولت آمپر راکتیو) بیان می‌شود.

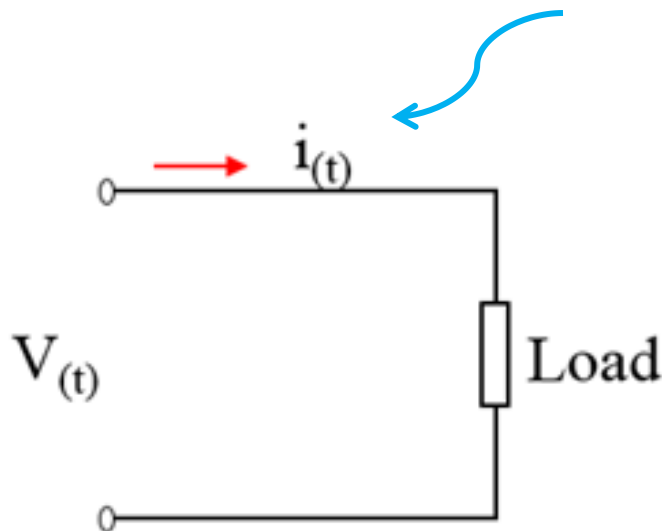
فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲- معرفی توان ها در سیستم قدرت:

*نوع بار ها و وجود خاصیت های سلفی و خازنی در خطوط انتقال به توان راکتیو معنا می دهد. پس اگر تمامی بار ها کاملاً اهمی خالص فرض شوند و از خاصیت سلفی یا خازنی صرف نظر شود توان راکتیو معنا نمی یافت. بنابراین مفهوم توان راکتیو برای نمایش کمیت توان الکتریکی حاصل از همفاز بودن نبودن جریان بار با ولتاژ شبکه تعریف می شود.

۲-۱- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

یک مدار یکفاز با ولتاژ سینوسی در حال تغذیه یک بار تکفاز



نکته مهم: اگر بار مقاومتی خالص باشد انرژی الکتریکی به انرژی حرارتی تبدیل می شود و اگر القایی خالص یا خازنی خالص باشد تبدیل انرژی الکتریکی به غیر الکتریکی انجام نمی شود و توان لحظه ای بین مدار و منبع نوسان می کند.

$$\left\{ \begin{array}{l} V(t) = V_m \cdot \cos(\omega t + \theta_v) \\ i(t) = I_m \cdot \cos(\omega t + \theta_i) \end{array} \right\} \text{جریان و ولتاژ لحظه ای}$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲- معرفی توان ها در سیستم قدرت:

۲-۱- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

توان لحظه ای تحویل داده شده به بار $p(t) = v(t) \cdot i(t) = I_m V_m \cos(\omega t + \theta_v) \cdot \cos(\omega t + \theta_i)$

$$p(t) = \underbrace{|V||I| \cos \theta [1 + \cos 2(\omega t + \theta_v)]}_{p_R(t)} + \underbrace{|V||I| \sin \theta \sin 2(\omega t + \theta_v)}_{p_X(t)} \quad (2.5)$$

Energy flow into the circuit Energy borrowed and returned by the circuit

$$p_R(t) = |V||I| \cos \theta + |V||I| \cos \theta \cos 2(\omega t + \theta_v) \quad (2.6)$$

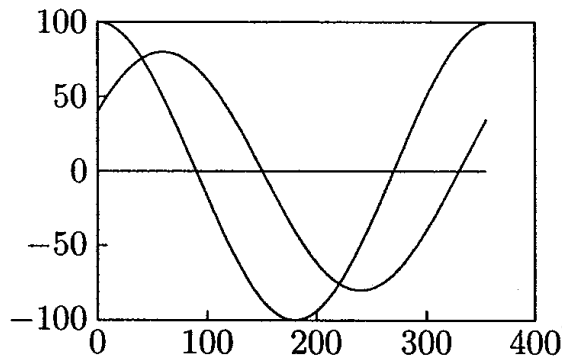
$$p_X(t) = |V||I| \sin \theta \sin 2(\omega t + \theta_v) \quad (2.8)$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

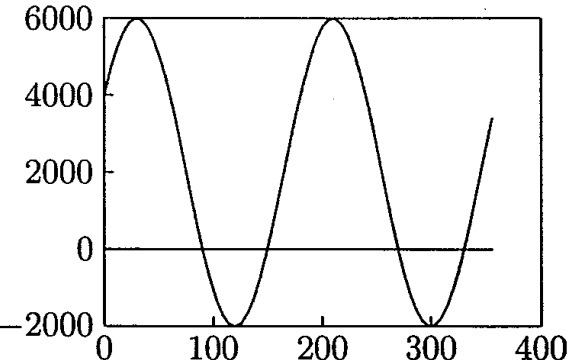
۲- معرفی توان ها در سیستم قدرت:

۲-۱- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

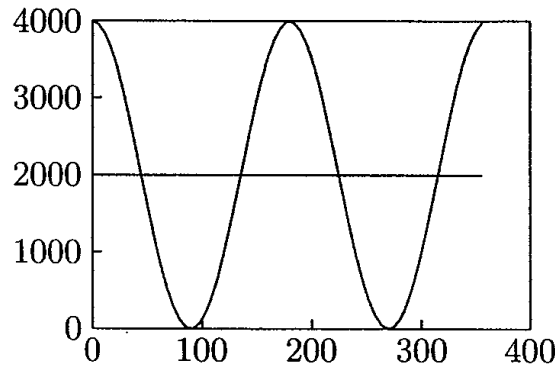
$$v(t) = V_m \cos \omega t, \quad i(t) = I_m \cos(\omega t - 60)$$

 ωt , degree

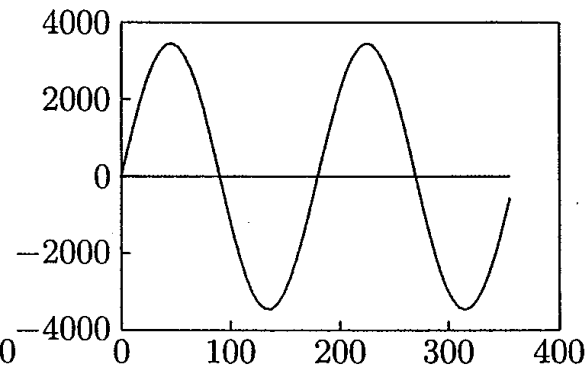
$$p(t) = v(t)i(t)$$

 ωt , degree

$$p_r(t), \text{ Eq. 2.6}$$

 ωt , degree

$$p_x(t), \text{ Eq. 2.8}$$

 ωt , degree

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۱-۲- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = I_m V_m \cos(\omega t + \theta_v) \cdot \cos(\omega t + \theta_i)$$

سه نکته مهم:

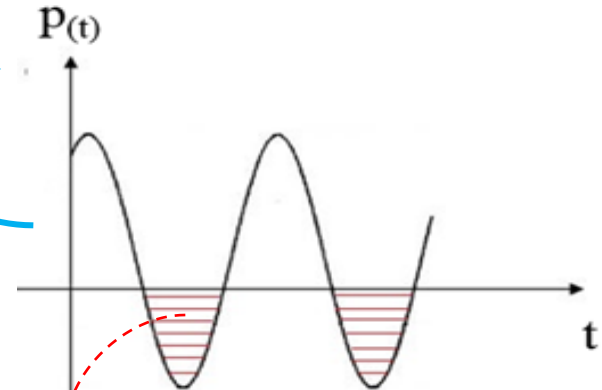
۱- توان لحظه ای در حالت تکفاز نسبت به زمان نوسان دارد

۲- فرکانس توان لحظه ای در حالت تکفاز دو برابر فرکانس منبع است

۳- توان برای قسمتی از سیکل منفی است (در یک شبکه غیر فعال

توان منفی به منزله جذب انرژی ذخیره شده در سلف ها و خازن ها

می باشد



فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲-۱- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

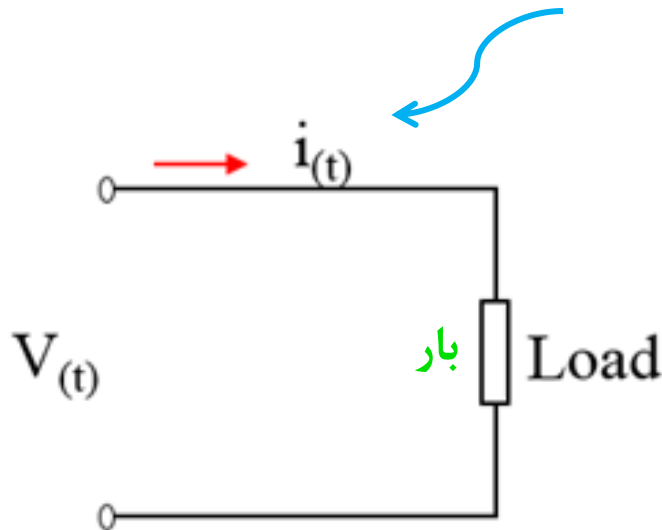
یادآوری دوباره:

نکته مهم: اگر بار القایی خالص باشد ($R=0$)

اگر $p(t) > 0$ باشد، قاعدتاً انرژی استفاده شده است، اما انرژی در بار القایی ذخیره شده و استفاده نشده است.

اگر $p(t) < 0$ باشد، قاعدتاً انرژی تولید شده است. اما در حقیقت تولید نشده است بلکه انرژی از میدان مغناطیسی بار القایی جذب شده است.

یک مدار یکفاز با ولتاژ سینوسی در حال تغذیه یک بار تکفاز



فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲-۱- توان در مدارهای متناوب تکفاز:

$$|v| = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \text{ مقدار مؤثر (rms) } V(t)$$

rms: جذرمیانگین مربعات

۲-۲- توان لحظه ای:

$$P(t) = P_{R(t)} + P_{X(t)}$$

برای عنصر راکتیو (سلفی خازنی): $Q = |V| \cdot |I| \cdot \sin\theta$

توان گرفته شده و برگشت داده شده توسط مدار

$P = |V| \cdot |I| \cdot \cos\theta$: توان اکتیو (توان متوسط) یا توان داده شده به بار

این توان توسط مؤلفه اهمی بار جذب می شود.

۲-۳- توان ظاهری: حاصل ضرب مقدار مؤثر ولتاژ و مقدار مؤثر جریان ($|V| \cdot |I|$) را گویند.

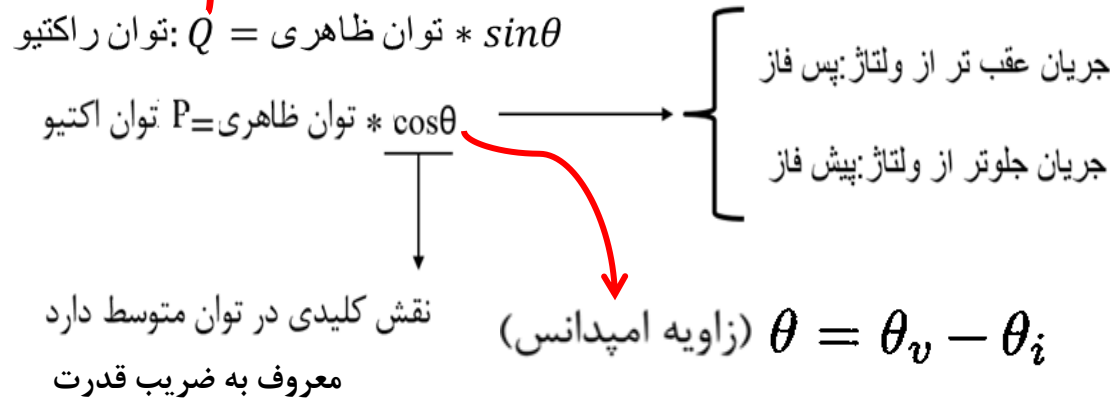
$|S| = |V| \cdot |I|$: توان ظاهری (برحسب ولت آمپر بیان می شود و نشان دهنده مستقیم گرمایش بوده و به عنوان مقدار نامی وسایل برقی بکار می رود)

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

Q مثبت، یعنی بار القایی

Q منفی، یعنی بار خازنی

۲-۳- توان ظاهری:



* بار مقاوتی خالص: $(\theta = 0)$ ← یعنی زاویه بین I و V وجود ندارد (هم فازند)

$\cos = 1$ (ضریب قدرت) پس در بار مقاومتی توان ظاهری و حقیقی با هم برابراند.

انرژی الکتریکی در باراهمی خالص به انرژی حرارتی تبدیل می شود.

* بار القایی خالص: جریان 90° از ولتاژ عقب است (پس فاز) $\cos 90^\circ$ (توان متوسط صفر است. انرژی الکتریکی به

غیر الکتریکی تبدیل نمی شود)

توان لحظه ای در پایانه های مدار القایی خالص بین مدار و منبع نوسان می نماید. وقتی $P(t)$ مثبت است

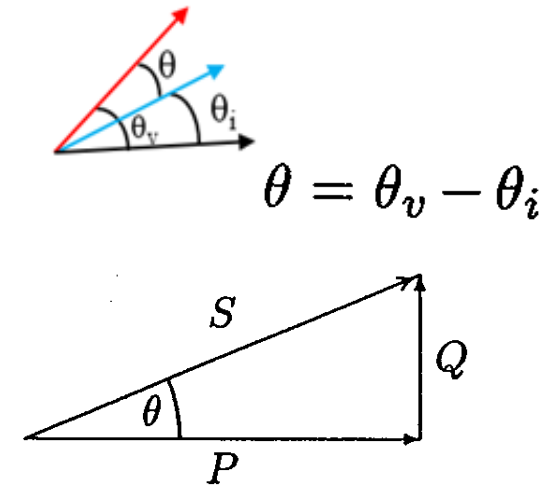
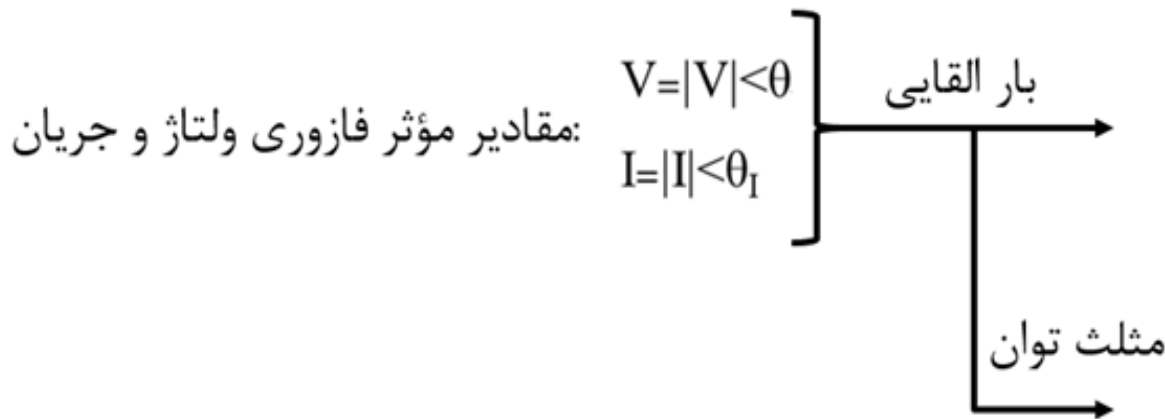
انرژی در میدان مغناطیسی عناصر القایی ذخیره شده و وقتی $P(t)$ منفی است انرژی از میدان مغناطیسی

عناصر القایی جذب می شود

* بار خازنی خالص: جریان 90° از ولتاژ جلو تر است (پیش فاز) و بقیه مطالب مشابه بار القایی می باشد

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۲-۴- توان مختلط:



$$S = V \cdot I^* = |V| \cdot |I| \angle \theta = |V| \cdot |I| \cdot \cos \theta + j |V| \cdot |I| \cdot \sin \theta = P + jQ$$

ظاهری توان: $|S|$ امپدانس بار: Z $V = Z \cdot I$ $S = V \cdot I^* = ZI \cdot I^* = R|I|^2 + jX|I|^2$

$$S = V \cdot I^* = \frac{|V|^2}{Z^*} \longrightarrow Z = \frac{|V|^2}{S^*}$$

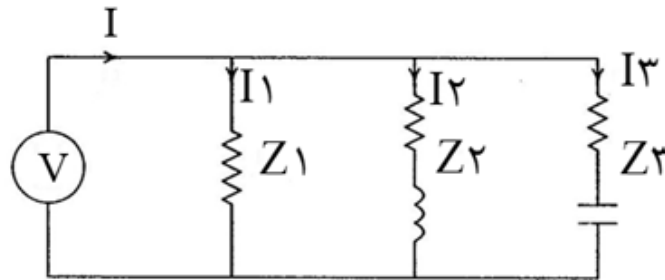
نتیجه گیری: توان مختلط S و امپدانس Z دارای زاویه یکسان می باشند. (زاویه امپدانس گاهی زاویه توان نامیده می شود)

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

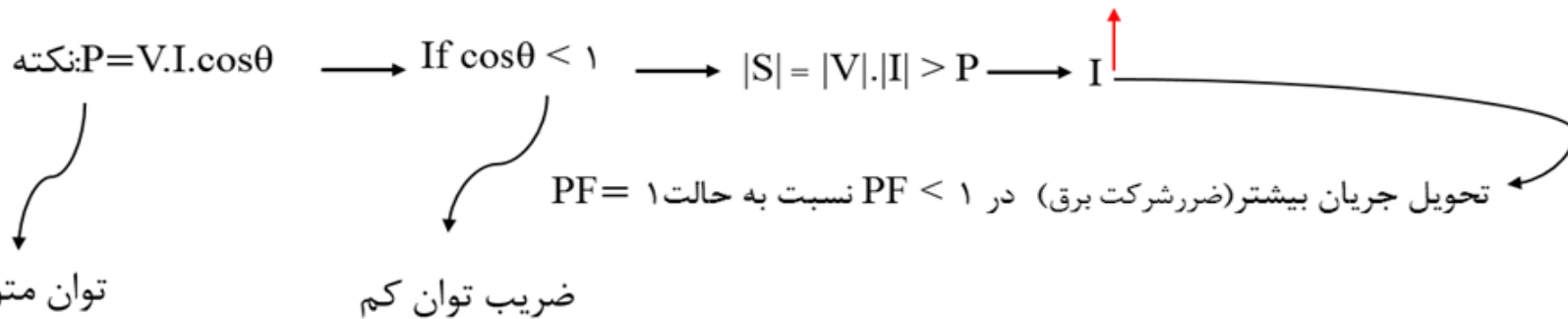
۲-۴- توان مختلط:

۲-۴-۱- توازن توان مختلط:

کل توان مختلط داده شده به بارهای موازی بنابر مجموع توان های مختلط داده شده به هر یک از آنها می باشد.



نکته: ضریب قدرت کمتر از یک به نفع یا ضرر شرکت توزیع برق است؟



پس شرکت برق نمی تواند بدون دریافت هزینه اضافی ، جریان بیشتری تحويل دهد

راه حل: اصلاح ضریب قدرت

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

بارهای صنعتی القایی می باشند و دارای ضریب قدرت پایین پس فاز می باشند پس برای جبران PF $(\cos \theta)$ باید از بانک خازنی استفاده شود

یادآوری: تبدیل دکارتی به قطبی و بالعکس

$$\text{یادآوری: } Z = x + jy = r(\cos\theta + j \sin\theta) = |r| \angle \theta = (\sqrt{x^2 + y^2}) \angle \tan^{-1} \frac{y}{x} ; \begin{cases} r = \sqrt{x^2 + y^2} \\ \theta = \tan^{-1} \frac{y}{x} \end{cases}$$

یادآوری: نوشتن اعداد مختلط کسری به فرم استاندارد، به عنوان مثال:

$$\frac{200}{10 + j20} = \frac{200 \cdot \angle 0}{10 + j20} * \frac{10 - j20}{10 - j20} = \frac{200 \cdot (10 - j20)}{10^2 - j^2 20^2} = \frac{200 \cdot (10 - j20)}{100 + 400}$$

$$= \frac{200}{500} (10 - j20) = \frac{2}{5} (10 - j20) = \frac{2}{5} * 10 + \frac{2}{5} (-j20) = 4 - j8$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس

۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

الف) محاسبه‌ی توان های اکتیو و راکتیو کل و ضریب قدرت منبع و جریان کل.

ب) جهت اصلاح ضریب قدرت به ۰/۸، خازنی به دو سر

بارها متصل می شود ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

حل مثال:

سر راست ترین راهی که به ذهن می رسد این است که با توجه به معلوم بودن V در

هر دو بار، توان مختلط بار شماره ۱ و ۲ را طبق رابطه‌ی $S=V.I^*$ بدست آوریم؛ واضح

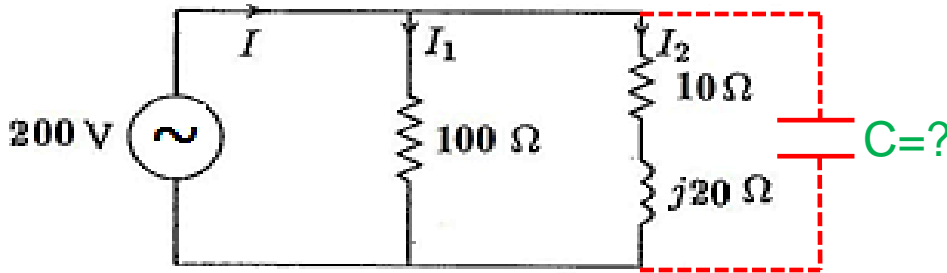
است که جریان هر یک از بارها طبق قانون اهم بدست می آیند. در ادامه، بر اساس

قضیه توازن توان مختلط می توانیم S کل را بدست آوریم. S کل ماهیتی مختلط دارد

که طبق رابطه‌ی $S=P+jQ$ قسمت حقیقی آن برابر P کل و قسمت موهومی آن برابر

Q کل است. در ضمن با مشخص شدن S کل و معلوم بودن V می توان طبق رابطه‌ی

$S=V.I^*$ ، جریان کل را نیز بدست آورد.



نکته‌ی کلی: به طور کلی در حل یک مساله

ابتدا باید بر اساس مجهولات خواسته شده، فرمول

های موجود نوشته شوند و بر اساس آن نقشه‌ی

راه مشخص شود.



مجهولات قسمت الف مساله P ، Q ،
PF و I کل هستند. روابط زیر را
برای حل مساله داریم:

$$\left\{ \begin{array}{l} P = V.I.\cos\theta \\ Q = V.I.\sin\theta \\ S=V.I^*=P+jQ \end{array} \right.$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس

۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

الف) محاسبه‌ی توان های اکتیو و راکتیو کل و ضریب قدرت

منبع و جریان کل.

ب) جهت اصلاح ضریب قدرت به ۰/۸، خازنی به دو سر

بارها متصل می شود ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

حل الف:

خودمان به دلخواه صفر انتخاب می کنیم. چرا؟

$$\text{قانون اهم: } I_1 = \frac{200 \angle 0}{100} = 2 \angle 0 \text{ A}, \quad I_2 = \frac{200 \angle 0}{10 + j20} = \dots = 4 - j8 \text{ A}$$

$$\begin{cases} S_1 = V_1 I_1^* = 200 \angle 0 (2 - j0) = 400 \text{ وات} + j0 \text{ وار} \\ S_2 = V_2 I_2^* = 200 \angle 0 (4 + j8) = 800 \text{ W} + j1600 \text{ Var} \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} S_1 = 400 \text{ W} + j0 \text{ Var} \\ S_2 = 800 \text{ W} + j1600 \text{ Var} \end{cases}$$

S_1

$$P_{\text{منبع}} = 1200 \text{ W}, \quad Q_{\text{منبع}} = 1600 \text{ W}$$

$$S_{\text{منبع}} = P + jQ = \sqrt{1200^2 + 1600^2} \angle \tan^{-1} \frac{1200}{1600} = 2000 \angle 53.13^\circ$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس

۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

(الف) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو کل و ضریب قدرت

منبع و جریان کل.

(ب) جهت اصلاح ضریب قدرت به ۰/۸، خازنی به دو سر

بارها متصل می شود ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

حل الف:

توجه: زاویه ۵۳/۱۳ درجه، اختلاف زاویه بین ولتاژ و جریان است. با توجه به اینکه زاویه ولتاژ به دلخواه صفر انتخاب شد؛ لذا

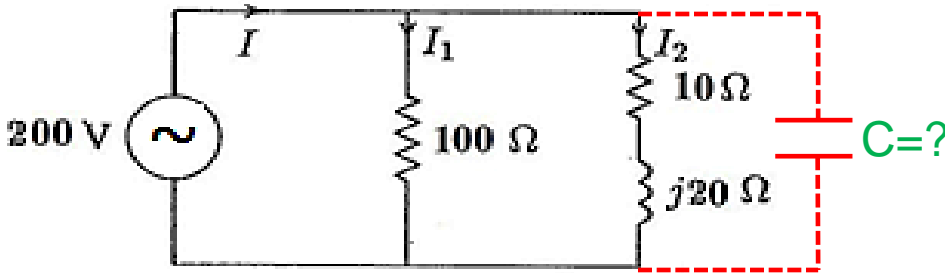
مقدار ۵۳/۱۳ تا است.

$$PF = \cos\theta = \cos 53.13^\circ = 0.6 \text{ Lag}$$

- در ادامه جریان کل را محاسبه می کنیم:

$$S_{\text{منبع}} = V_{\text{منبع}} I_{\text{منبع}}^* \rightarrow I_{\text{منبع}}^* = \frac{S_{\text{منبع}}}{V_{\text{منبع}}} = \frac{2000 \angle 53.13^\circ}{200 \angle 0} = 10 \angle 53.13^\circ \rightarrow I_{\text{منبع}}^* = 10 \angle 53.13^\circ$$

$$I_{\text{منبع}} = (10 \angle 53.13^\circ)^* = 10 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$



$$\theta = \theta_v - \theta_i$$

$$S_{\text{منبع}} = 2000 \angle 53.13^\circ \text{ V.A}$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس ۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

(الف) محاسبه توان های اکتیو و راکتیو کل و ضریب قدرت منبع و جریان کل.

(ب) جهت اصلاح ضریب قدرت به ۰/۸، خازنی به دو سر بارها متصل می شود ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

حل ب:

$$PF_{new} = 0.8 = \cos\theta_{new} \rightarrow \theta_{new} = \cos^{-1} 0.8 = 36.87^\circ$$

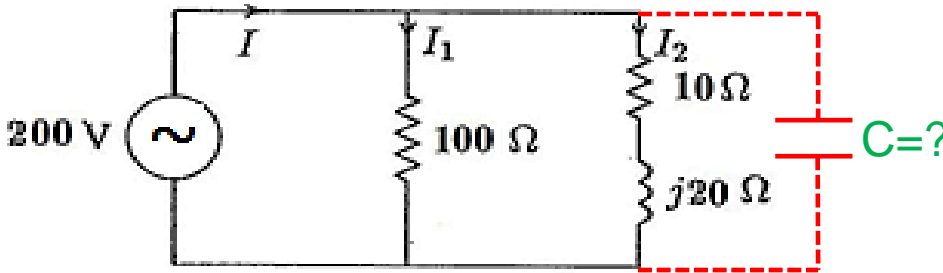
توجه: اضافه کردن یک خازن به عنوان یک عنصر موهومی فقط بر روی توان راکتیو تاثیر می گذارد و توان اکتیو ثابت خواهد بود.

$$Q_{new} = 900 \text{ VAR}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} P = VI\cos\theta \\ Q = VI\sin\theta \end{array} \right. \rightarrow \frac{Q}{P} = \frac{VI\sin\theta}{VI\cos\theta} = \frac{\sin\theta}{\cos\theta} = \tan\theta \rightarrow \frac{Q_{new}}{1200} = \tan 36.87^\circ \rightarrow Q_{new} = 1200 \times \tan(36.87^\circ) = 900 \text{ VAR}$$

$$Q_c = 1600 - 900 = 700 \text{ VAR}$$

توان راکتیوی که باید توسط خازن تأمین شود:



فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس

۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

الف) محاسبه‌ی توان های اکتیو و راکتیو کل و ضریب قدرت

منبع و جریان کل.

ب) جهت **اصلاح** ضریب قدرت به ۰/۸، خازنی به دو سر

بارها متصل می شود ظرفیت خازن را محاسبه کنید.

حل ب: در ادامه ظرفیت خازن معادل توان ۷۰۰ وار محاسبه می شود:

$$Z_c = \frac{|V|^2}{S_c^*} = \frac{200^2}{(-j700)^*} = -j57.14 \Omega = 0 - jX_c \rightarrow X_c = 57.14 \Omega$$

$$X_c = \frac{1}{j\omega c} \rightarrow c = \frac{1}{j\omega X_c} = \frac{1}{2\pi f (57.14)} = \frac{1}{2\pi 60 (57.14)} \text{ فاراد} \rightarrow c = \underline{46.42 \mu F}$$

توجه: خازن با ظرفیت ۴۶/۴۲ میکروفاراد، ۷۰۰ VAR توان راکتیو مورد نیاز را تامین می کند. در مجموع بارهای مدار ۱۶۰۰ VAR

احتیاج داشتند که مجبور بودن از منبع (شبکه) دریافت کنند. با توجه به ضریب قدرت ۰/۶ که ضریب توان پایینی بود جریان

۱۰ A از منبع کشیده می شد. حال با وجود خازنی که توان راکتیو ۷۰۰ AVR را تامین می کند، بارها از منبع AVR ۹۰۰ توان

راکتیو خواهند کشید. در ادامه، جریان کشیده شده از منبع را با حضور خازن محاسبه می کنیم:

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۳- اصلاح ضریب قدرت:

مثال عددی: دو بار به منبعی با ولتاژ ولت ۲۰۰ و فرکانس

۶۰ هرتز مطابق شکل زیر متصل شده اند. مطلوبست:

الف) محاسبه‌ی توان های اکتیو و راکتیو **کل** و ضریب قدرت

منبع و جریان کل.

ب) جهت **اصلاح** ضریب قدرت به ۰/۸، **خازنی** به دو سر

بارها متصل می شود **ظرفیت** خازن را محاسبه کنید.

حل ب:

محاسبه جریان کشیده شده از منبع **با حضور** خازن:

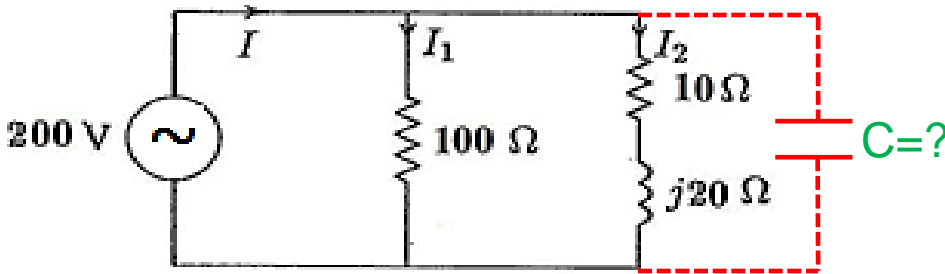
$$S_{new} = P + jSQ_{new} = 1200 + j900 = 1500 \angle 36.87^\circ \text{ V.A}$$

$$I_{new}^* = \frac{S_{new}}{V} = \frac{1500 \angle 36.87^\circ}{200 \angle 0^\circ} = 7.5 \angle 36.87^\circ \rightarrow I_{new} = 7.5 \angle -36.87^\circ$$

جریان کشیده شده از منبع **با حضور خازن** از ۱۰ آمپر به ۷/۵ آمپر **کاهش** یافت. این مهم

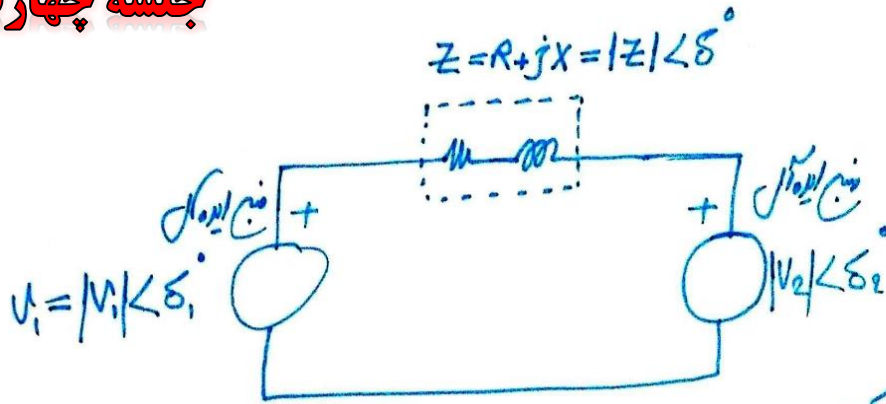
به لطف تصحیح زاویه تتا بود که بهبود ضریب قدرت منبع را به دنبال داشت. توان راکتیو

اضافه، باعث اضافه جریانی شد که آن اضافه جریان، توان مفیدی را باعث نمی شد.



جلسه چهارم

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت
۴- پخش توان مختلط:



$$\delta = \delta_1 - \delta_2$$

$$R \ll X \rightarrow \begin{cases} P_{12} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X} \cdot \sin(\delta_1 - \delta_2) & (1) \\ Q_{12} = \frac{|V_1|}{X} \cdot (|V_2| - |V_1| \cos(\delta_1 - \delta_2)) & (2) \end{cases}$$

نکته: مقاومت خطوط انتقال در سری با راکتانس آنها کوچک است زیرا نسبت $\frac{R}{X}$ کم است.

۱) نشان دهد تغییرات کوچک δ_1 و δ_2 اثر قابل توجهی در پخش توان حسیتی (P) دارد. در حالتیکه تغییرات کوچک در دامنه ولتاژها اثر محسوس در پخش توان حسیتی ندارد. \rightarrow در یک خط انتقال بوسیله اختلاف فاز ولتاژ و پایداریها بدین $(\delta_1 - \delta_2)$ کنترل می شود.

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۴- پخش توان مختلط:

$$P \propto (\delta_1 - \delta_2) \text{ or } \delta$$

$$Q \propto (|V_1| - |V_2|) \text{ or } (|V| - |E|)$$

چونکه توان مختلط است
 اگر ما جابجوارها را با بار داریم یعنی $\delta_1 > \delta_2$ پس P مثبت است و جهت P از منبع ۱ به منبع ۲ (۲) می باشد.
 اگر $\delta_2 > \delta_1$ پس P منفی است و جهت P از منبع ۲ به منبع ۱ (۱) می باشد.

if $R=0 \xrightarrow{P_{max} \rightarrow \delta=90^\circ} P_{max} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X}$

- رابطه (۲) نشان دهنده پخش Q بر سبب اختلاف اندازه ولتاژها تعیین می گردد یعنی $Q \propto |V_1| - |V_2|$

سوال ۱) روابط ① و ② را با توجه به رابطه توان مختلط بدست آورید.

سوال ۲) با توجه به رابطه (۲) بیان کنید که در سیستم قدرت چه اقدامی باید صورت گیرد؟

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

تمرین تحویلی ۲: چه رابطه‌ای بین توان راکتیو و توان مختلط برقرار است؟

تمرین تحویلی ۳: توان راکتیو در سیستم قدرت وجود دارد و مقدار متوسط آن صفر است. حضور توان راکتیو در یک سیستم قدرت چه معایب و فوایدی دارد؟ (موارد را با ذکر دلیل بیان کنید).

تمرین تحویلی ۴: فرق توان اکتیو و راکتیو چیست؟

تمرین تحویلی ۵: منظور از اصلاح ضریب قدرت چیست؟ و نتیجه‌ی این اصلاح را بیان کنید؟

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵- مدارهای سه فاز متعادل:

تولید، انتقال و توزیع توان الکتریکی بوسیله ی مدارهای سه فاز انجام می شود.

در نیروگاه ها سه ولتاژ سینوسی با دامنه یکسان اما با اختلاف زاویه ۱۲۰ درجه تولید می شوند که منابع متعادل نامیده می شوند.

$$\begin{cases} V_{an} = |V_p| \angle 0^\circ \\ V_{bn} = |V_p| \angle -120^\circ \\ V_{cn} = |V_p| \angle -240^\circ \end{cases}$$

توالی ABC را توالی فاز مثبت می گویند.

توالی ACB را توالی فاز منفی می گویند.

۵-۱- مقایسه ی سیستم قدرت سه فاز با تکفاز:

همانطور که قبلا اشاره شد توان لحظه ای تحویل داده شده به بارها در مدارهای تکفاز ضربانی است. اما در سیستم قدرت سه فاز

ثابت است. هم چنین، موتورهای سه فاز دارای گشتاور ثابت هستند و راه اندازی و کار کردن آنها بهتر از موتور های یکفاز است.

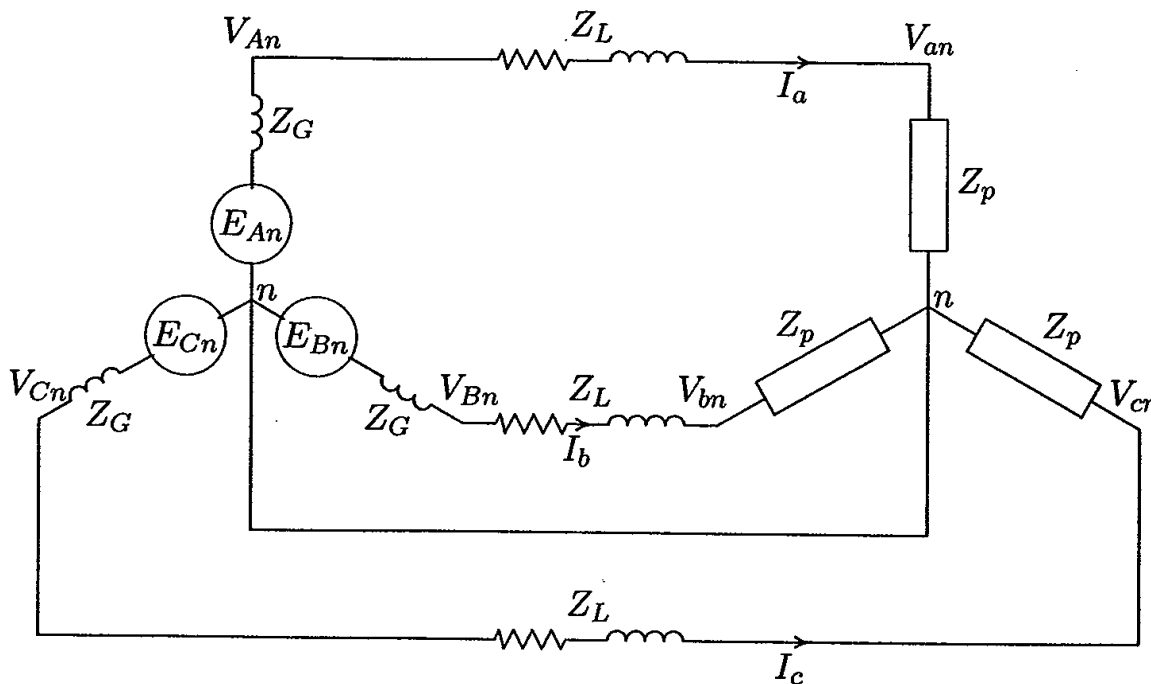
این ویژگی توان سه فاز همراه با بازدهی ذاتی بهتر انتقال آنها، در مقایسه با مدارهای یکفاز (کابل کمتر در توان تحویلی یکسان)

دلیل عمومی کاربرد آن است.

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۲- ساختار سیستم سه فاز :

در یک سیستم قدرت سه فاز آرایش ژنراتور ها و بارها بصورت دو آرایش و مثلث هستند. اتصال ژنراتور ها بصورت ستاره است و به ندرت دارای اتصال مثلث هستند. زیرا اگر ولتاژها کاملاً متعادل نباشند جمع برداری ولتاژها صفر نخواهد بود و جریان گردش در داخل مثلث بوجود خواهد آمد. همچنین ولتاژ در حالت ستاره کمتر از مثلث است. پس در حالت ستاره عایق بندی کمتر مورد نیاز است.



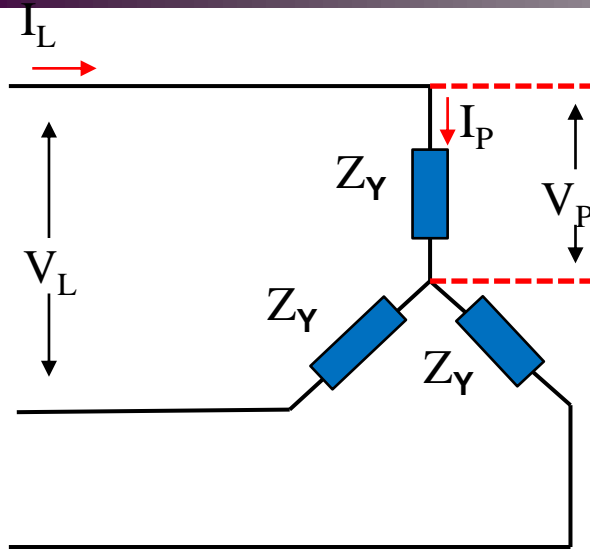
نمایش یک ژنراتور با اتصال ستاره که یک بار ستاره را تغذیه می کند:

$$|V_p| = |V_L|/\sqrt{3}$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۲- ساختار سیستم سه فاز :

۵-۲-۱- اتصال ستاره:



$$\begin{cases} V_{an} = |V_p| \angle 0^\circ \\ V_{bn} = |V_p| \angle -120^\circ \\ V_{cn} = |V_p| \angle -240^\circ \end{cases}$$

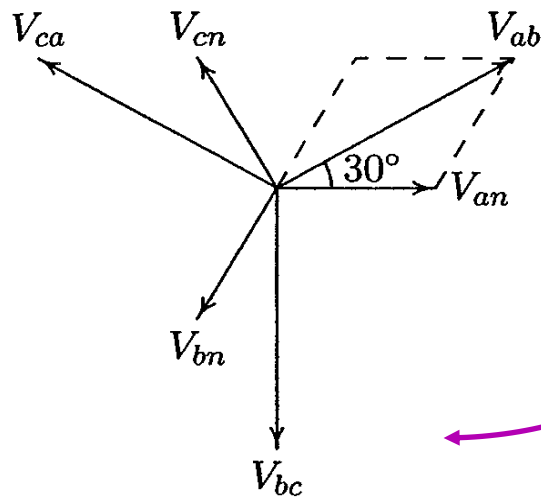
$$I_L = I_p$$

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = |V_p|(1 \angle 0^\circ - 1 \angle -120^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle 30^\circ$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = |V_p|(1 \angle -120^\circ - 1 \angle -240^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle -90^\circ$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = |V_p|(1 \angle -240^\circ - 1 \angle 0^\circ) = \sqrt{3}|V_p| \angle 150^\circ$$

$$V_L = \sqrt{3} |V_p| \angle 30^\circ$$



ولتاژ خط ← ولتاژ خط به خط (V_L) ، V_{ab} ، V_{bc} و V_{ca}

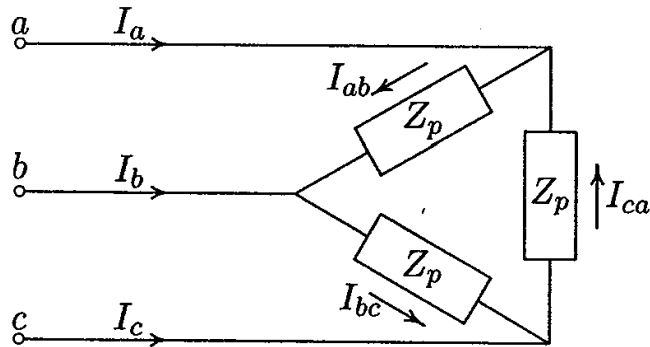
ولتاژ فاز ← ولتاژ خط به خنثی (V_p) ، V_{an} ، V_{bn} و V_{cn}

دیاگرام برداری ولتاژ خط و فاز در آرایش ستاره

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۲- ساختار سیستم سه فاز :

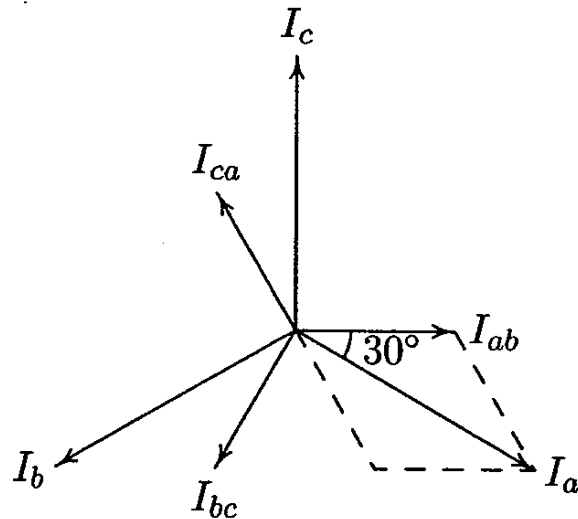
۵-۲-۱- اتصال مثلث:

جریان فاز I_{ca} و I_{bc} , I_{ab} , I_p ←جریان خط I_c و I_b , I_a , I_L ←

$$I_a = I_{ab} - I_{ca} = |I_p|(1\angle 0^\circ - 1\angle -240^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle -30^\circ$$

$$I_b = I_{bc} - I_{ab} = |I_p|(1\angle -120^\circ - 1\angle 0^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle -150^\circ$$

$$I_c = I_{ca} - I_{bc} = |I_p|(1\angle -240^\circ - 1\angle -120^\circ) = \sqrt{3}|I_p|\angle 90^\circ$$



$$I_{ab} = |I_p|\angle 0^\circ$$

$$I_{bc} = |I_p|\angle -120^\circ$$

$$I_{ca} = |I_p|\angle -240^\circ$$

$$I_L = \sqrt{3}|I_p|\angle -30^\circ$$

$$V_L = V_p$$

دیاگرام برداری جریان خط و فاز در آرایش مثلث

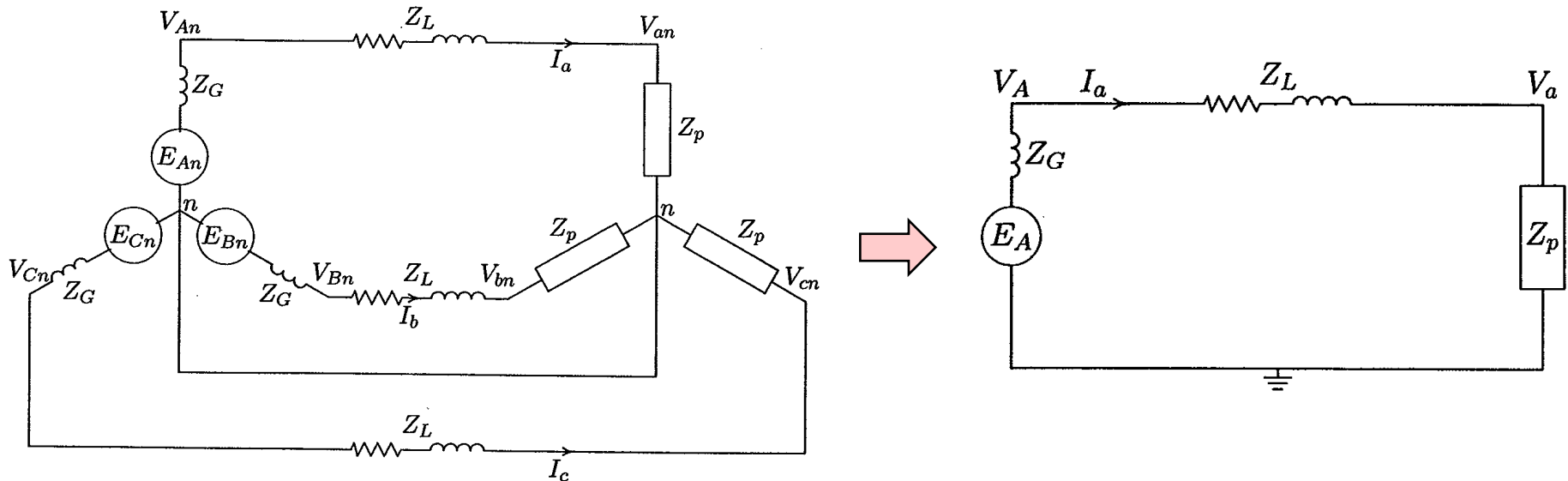
فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۲- ساختار سیستم سه فاز:

$$Z_Y = \frac{Z_{\Delta}}{3} \quad \text{— رابطه بین امپدانس اتصال ستاره و مثلث در حالت متعادل:}$$

نکته: در تجزیه و تحلیل سه فاز، منبع و بار را به ستاره تبدیل می کنیم و تجزیه تحلیل را براساس هر فاز انجام می دهیم که به

صورت زیر است:



فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۳- توان در مدارهای سه فاز متعادل:

- وقتی توان ها بر حسب خط بیان می شوند دیگر فرقی بین Δ و Y نیست.

$$\begin{cases} P_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \cos \theta \\ Q_{3\phi} = 3|V_p||I_p| \sin \theta \end{cases} \quad \begin{cases} P_{3\phi} = \sqrt{3}|V_L||I_L| \cos \theta \\ Q_{3\phi} = \sqrt{3}|V_L||I_L| \sin \theta \end{cases}$$

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

$$S_{3\phi} = 3V_p I_p^*$$

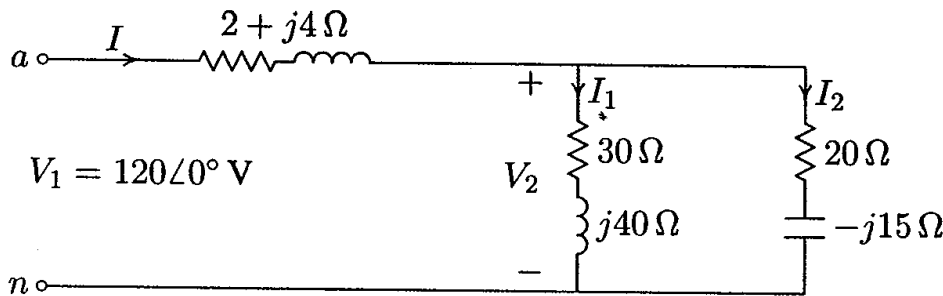
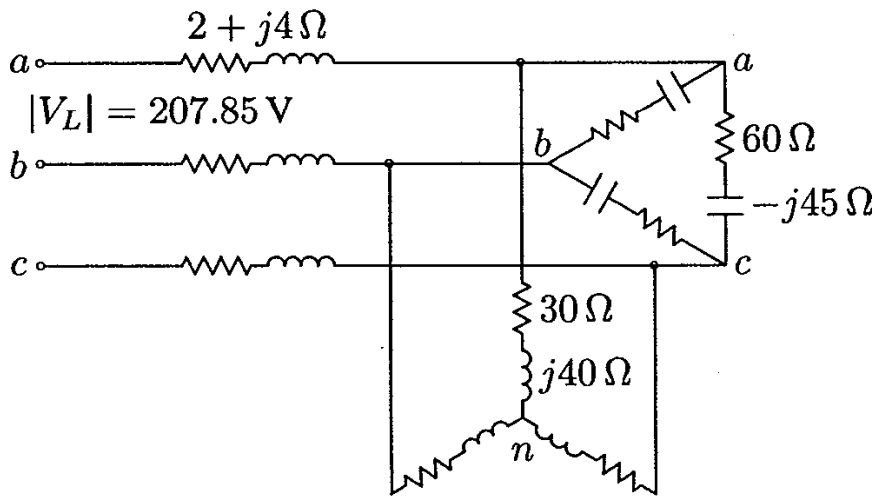
نکته: با وجود ضربانی بودن هر فاز، توان لحظه ای سه فاز ثابت بوده و با سه برابر توان حقیقی هر فاز برابر است. در حقیقت،

این توان ثابت مزیت اصلی سیستم سه فاز بر سیستم تکفاز است.

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۳- توان در مدارهای سه فاز متعادل:

مثال: مدار معدل یکفاز سیستم سه فاز زیر را رسم نمایید.



حل:

$$Z_2 = \frac{60 - j45}{3} = 20 - j15 \Omega$$

$$V_1 = \frac{207.85}{\sqrt{3}} = 120 \text{ V}$$

The total impedance is

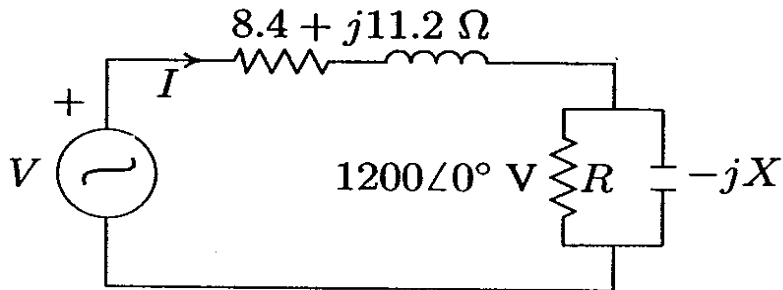
$$\begin{aligned} Z &= 2 + j4 + \frac{(30 + j40)(20 - j15)}{(30 + j40) + (20 - j15)} \\ &= 2 + j4 + 22 - j4 = 24 \Omega \end{aligned}$$

$$I = \frac{V_1}{Z} = \frac{120 \angle 0^\circ}{24} = 5 \text{ A}$$

تمرین تحویلی ۶: توان سه فاز داده شده به بارها را در مثال فوق را محاسبه کنید.

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۳- توان در مدارهای سه فاز متعادل:



تمرین حل شده: بار نشان داده شده در شکل مقابل شامل مقاومت R است که با خازنی با راکتانس X موازی است. این بار توسط یک منبع تکفاز از طریق خطی با امپدانس $8.4 + j11.2$ اهم تغذیه می شود. ولتاژ مؤثر در پایانه بار $1200 \angle 0^\circ$ است. توان بار 30KVA در ضریب قدرت 0.8 پیشفاز است. مطلوب است محاسبه ی R, X و ولتاژ تغذیه (V).

$$\text{داریم: } \begin{cases} P = |V| \cdot |I| \cdot \cos \theta = |S| \cdot \cos \theta \\ Q = |V| \cdot |I| \cdot \sin \theta = |S| \cdot \sin \theta \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} P = |S| \cdot \cos \theta \rightarrow P = (30)(0.8) = 24 \text{ kW} \\ Q = |S| \cdot \sin \theta \rightarrow Q = (30)(0.6) = 18 \text{ kVAR} \end{cases}$$

$$\rightarrow \begin{cases} P = \frac{V^2}{R} \rightarrow R = \frac{V^2}{P} = \frac{1200^2}{24} = 60 \Omega \checkmark \\ Q = \frac{V^2}{X} \rightarrow X = \frac{V^2}{Q} = \frac{1200^2}{18} = 80 \Omega \checkmark \end{cases}$$

حل:

$$30 \text{ kVA توان} \rightarrow S = 30 \angle -\cos^{-1} 0.8 = 30 \angle -36.87^\circ$$

$$PF = \cos \theta = 0.8 \rightarrow \theta = \cos^{-1} 0.8$$

$$S = V I^* \rightarrow I^* = \frac{S \text{ (VA)}}{V \text{ (V)}} = \frac{30000 \angle -36.87^\circ}{1200 \angle 0^\circ} = 25 \angle -36.87^\circ \rightarrow I = 25 \angle 36.87^\circ \text{ A}$$

$$\text{KVL) } V = (8.4 + j11.2) I + 1200 \angle 0^\circ = (8.4 + j11.2)(25 \angle 36.87^\circ) + 1200 \angle 0^\circ = 1200 + j350$$

$$= 1250 \angle 16.26^\circ \text{ V} \checkmark$$

فصل دوم: تئوری توان در سیستم های قدرت

۵-۳- توان در مدارهای سه فاز متعادل:

تمرین تحویلی ۷: برتری های سیستم سه فاز بر تکفاز را بیان کنید؟

تمرین حل شده: سه بار به صورت شکل زیر باهم موازی شده اند. ولتاژ منبع تغذیه تکفاز ۱۴۰۰ ولت با فرکانس ۶۰ هرتز است.

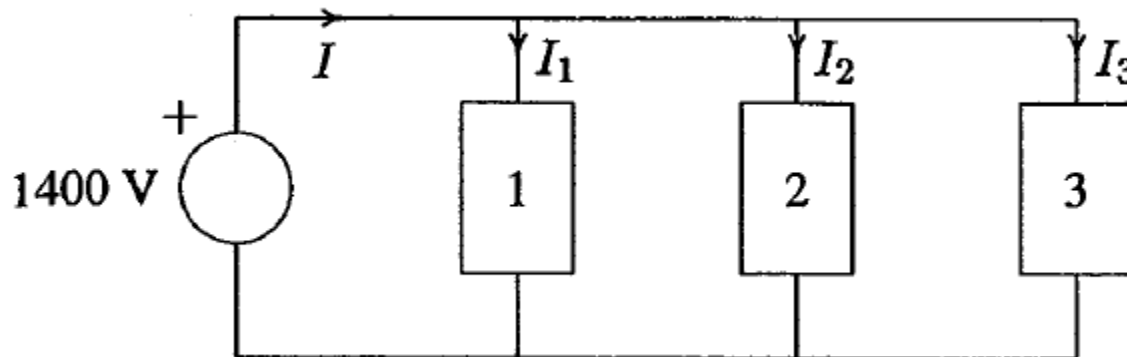
مشخصات بارها عبارتند از:

بار ۱: بار سلفی با توان 125KVA در ضریب قدرت 0.28

بار ۲: بار خازنی با توانهای 10 Kw و 40 kVar

بار ۳: بار مقاومتی با توان 15kw

مطلوب است محاسبه الف) KW کل ب) Kvar کل و ج) ضریب قدرت منبع.



حل تمرین:

حل تمرین ۱:

$$\theta_1 = \cos^{-1}(0.28) = 73.74^\circ \text{ lagging}$$

$$S_1 = 125 \angle 73.74 \text{ kVA} = 35 \text{ kW} + j120 \text{ kvar}$$

$$S_2 = 10 \text{ kW} - j40 \text{ kvar}$$

$$S_3 = 15 \text{ kW} + j0 \text{ kvar}$$

توان مختلط هر یک از بارها:

$$S = P + jQ = S_1 + S_2 + S_3$$

$$= (35 + j120) + (10 - j40) + (15 + j0)$$

$$= 60 \text{ kW} + j80 \text{ kvar} = 100 \angle 53.13 \text{ kVA}$$

توان کل:

$$I = \frac{S^*}{V^*} = \frac{100,000 \angle -53.13^\circ}{1400 \angle 0^\circ} = 71.43 \angle -53.13^\circ \text{ A}$$

جریان کل:

$$PF = \cos(53.13) = 0.6 \text{ lagging}$$

ضریب قدرت منبع:

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

مقدمه:

- ✓ قبل از اینکه بتوان شبکه سیستم های قدرت را حل کرد باید آن را مدل سازی کرد.
 - ✓ سیستم سه فاز متقارن بر اساس یک فاز نمایش و تحلیل می شود.
 - ✓ سیستم سه فاز نامتقارن به وسیله ی مؤلفه های متقارن تحلیل می شود.
- توجه:** این فصل، مدل‌های ساده ژنراتورها و ترانسفورماتور را برای عملکرد حالت ماندگار متقارن ارائه می‌نماید.

ژنراتورهای سنکرون:

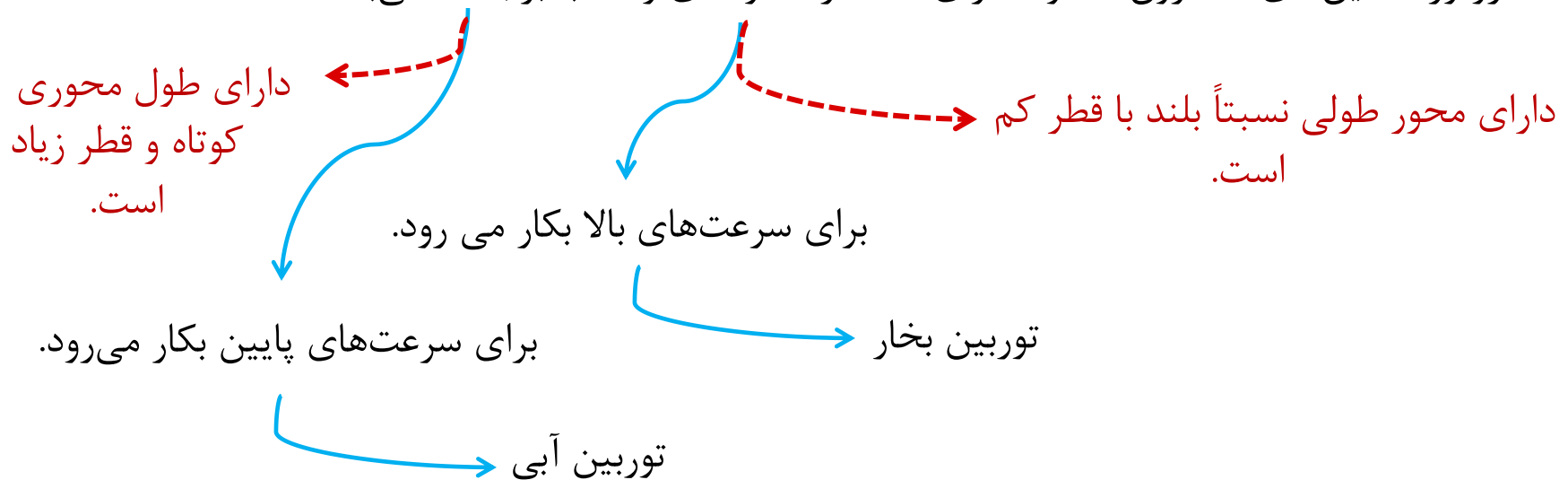
- ✓ در مقیاس‌های بالا، قدرت توسط ژنراتورهای سنکرون سه فاز تولید می‌گردد.
- ✓ سیم پیچ‌های آرمیچر آن روی استاتور و سیم پیچ تحریک آن روی روتور قرار دارد.
- ✓ سیم پیچ تحریک آن توسط یک منبع جریان مستقیم تغذیه می‌شود. سیستم تحریک ژنراتور، ولتاژ ژنراتور را در حد معینی نگهداشته و توان راکتیو آن را کنترل می‌نماید.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ژنراتورهای سنکرون:

✓ در سیستم‌های پیشرفته، معمولاً تحریک از ژنراتورهای ac با یکسوکننده‌های گردان (که سیستم‌های تحریک بدون جاروبک نامیده می‌شوند) فراهم می‌شود.

✓ روتور ماشین‌های سنکرون معمولاً دارای ساختار استوانه‌ای و قطب برجسته می‌باشند.



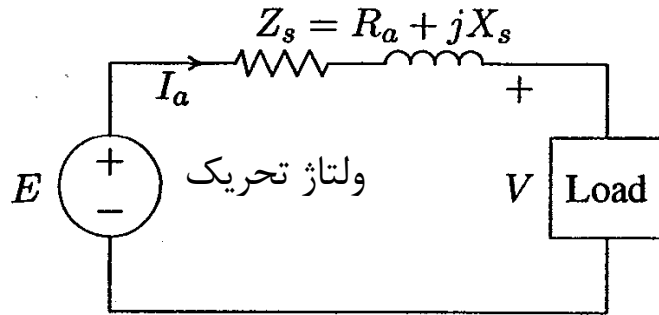
تمرین تحویلی ۸: چرا در سیستم قدرت برای تولید برق از ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود و از ژنراتور القایی استفاده

نمی‌شود؟ آیا کاربردی برای ژنراتور آسنکرون (القایی) می‌شناسید؟

تمرین تحویلی ۹: چرا در نیروگاه‌های آبی از ژنراتور سنکرون قطب برجسته استفاده می‌شود؟

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ژنراتورهای سنکرون:



– مدار معادل ژنراتور سنکرون (مدار یکفاز):

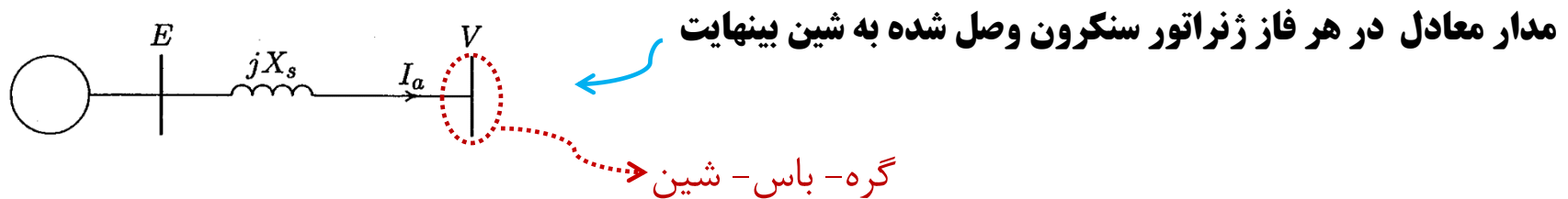
$$E = V + jX_s I_a$$

راکتانس پراکندگی

راکتانس سنکرون: $X_s = (X_\ell + X_{ar})$

راکتانس عکس العمل
آرمیچر سنکرون

تعریف شین بینهایت: بیشتر ماشین‌های سنکرون به شبکه‌های بزرگ بهم پیوسته الکتریکی وصل شده‌اند. این شبکه‌ها دارای این مشخصه مهم هستند که ولتاژ سیستم در نقطه اتصال از نظر اندازه، زاویه فاز و فرکانس ثابت می‌باشد. چنین نقطه‌ای در سیستم قدرت شین بینهایت نامیده می‌شود. یعنی ولتاژ در شین ژنراتور با تغییرات شرایط کار ژنراتور تغییر نخواهد کرد.



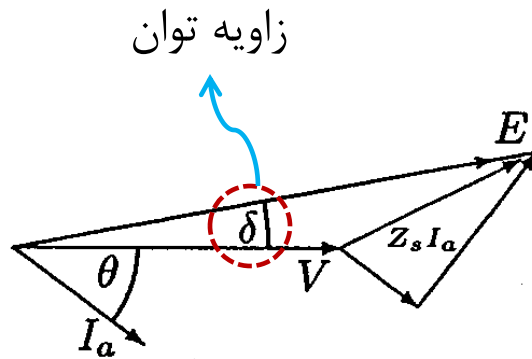
مدار معادل در هر فاز ژنراتور سنکرون وصل شده به شین بینهایت

گره - باس - شین

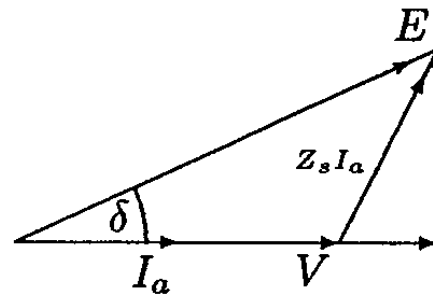
فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ژنراتورهای سنکرون:

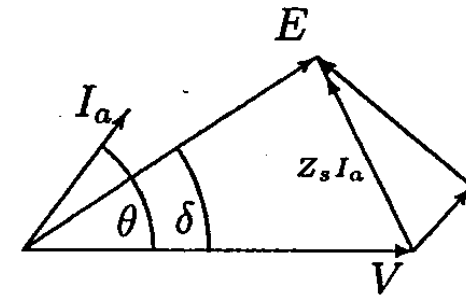
– نمایش فازوری ژنراتور سنکرون با در نظر گرفتن ولتاژ پایانه آن بعنوان مرجع:



(a) Lagging pf load



(b) Upf load



(c) Leading pf load

✓ توانایی تغییر تحریک روتور یک ویژگی مهم ماشین سنکرون می باشد.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ژنراتورهای سنکرون:

- درصد تنظیم ولتاژ:

ولتاژ بار نامی ولتاژ بی باری

$$VR = \frac{|V_{nl}| - |V_{rated}|}{|V_{rated}|} \times 100 = \frac{|E| - |V_{rated}|}{|V_{rated}|} \times 100$$

✓ تنظیم ولتاژ ژنراتور معیار مناسبی برای مقایسه ماشین‌ها است و بر حسب درصد تغییر ولتاژ پایانه از حالت بی باری تا بار نامی تعریف می‌شود.

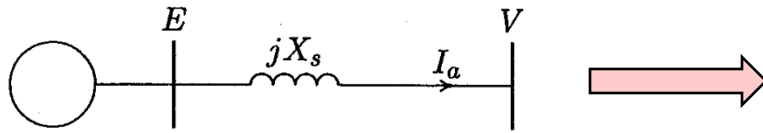
✓ تنظیم ولتاژ نشان دهنده‌ی تغییر جریان تحریک مورد نیاز برای حفظ ولتاژ سیستم از حالت بی باری تا بار نامی در یک ضریب قدرت مشخص می‌باشد.

تمرین تحویلی ۱۰: رابطه‌ی روبرو را به فرم قطبی بنویسید. $x = \frac{100}{20-10j} = |\angle| ?$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ژنراتورهای سنکرون:

– مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار – روتور استوانه‌ای



$$P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta$$

$$Q_{3\phi} = 3 \frac{|V|}{X_s} (|E| \cos \delta - |V|)$$

ظرفیت انتقال استاتیک

the theoretical maximum power occurs when $\delta = 90^\circ$ $\Rightarrow P_{max(3\phi)} = 3 \frac{|E||V|}{X_s}$

نکته مهم: افزایش زاویه بیش از ۹۰ درجه (از طریق افزایش گشتاور ورودی ژنراتور)، توان الکتریکی خروجی را از مقدار Pmax کاهش خواهد

داد. این افزایش گشتاور و روی باعث شتاب گیری ماشین می شود و ماشین همگامی یا سنکرونیزاسیون خود را از دست می دهد. لذا، Pmax

حد پایداری ماندگار یا حد پایداری استاتیک (ایستا) نامیده می شود.

for small δ , $\cos \delta$ is nearly unity $\Rightarrow Q_{3\phi} \simeq 3 \frac{|V|}{X_s} (|E| - |V|)$ فوق تحریک

when $|E| > |V|$ the generator delivers reactive power to the bus \Rightarrow generator is said to be overexcited.

If $|E| < |V|$, the reactive power delivered to the bus is negative \Rightarrow یعنی ژنراتور توان راکتیو از شین می کشد.

سوال: ژنراتورها معمولاً در حالت فوق تحریک کار می کنند. چرا؟

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

تمرین تحویلی ۱۱: در نیروگاه‌ها توان اکتیو ژنراتور سنکرون (آلترناتور) چگونه و بر اساس چه پارامتری کنترل می‌شود؟

– ژنراتور سنکرون (مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار – روتور استوانه‌ای)

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون ۹Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

(الف) ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

(ب) با ثابت نگهداشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آن قدر کاهش یافته است که ژنراتور توان ۲۵ MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را محاسبه نمایید.

(پ) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار که ماشین می‌تواند قبل از خروج از همگامی تحویل دهد، چقدر است؟ همچنین، جریان آرمیچر این توان حداکثر را پیدا کنید.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

– ژنراتور سنکرون (مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار – روتور استوانه‌ای)

A 50-MVA, 30-kV, three-phase, 60-Hz synchronous generator has a synchronous reactance of 9Ω per phase and a negligible resistance. The generator is delivering rated power at a 0.8 power factor lagging at the rated terminal voltage to an infinite bus.

(a) Determine the excitation voltage per phase E and the power angle δ .

(b) With the excitation held constant at the value found in (a), the driving torque is reduced until the generator is delivering 25 MW. Determine the armature current and the power factor.

(c) If the generator is operating at the excitation voltage of part (a), what is the steady-state maximum power the machine can deliver before losing synchronism? Also, find the armature current corresponding to this maximum power.

(a) The three-phase apparent power is

$$\begin{aligned} S_{3\phi} &= 50 \angle \cos^{-1} 0.8 = 50 \angle 36.87^\circ \text{ MVA} \\ &= 40 \text{ MW} + j30 \text{ Mvar} \end{aligned}$$

The rated voltage per phase is

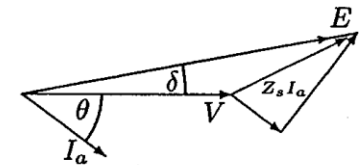
$$V = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

The rated current is

$$I_a = \frac{S_{3\phi}^*}{3V^*} = \frac{(50 \angle -36.87^\circ) 10^3}{3(17.32 \angle 0^\circ)} = 962.25 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

The excitation voltage per phase \longrightarrow is $E = V + jX_s I_a$

$$E = 17320.5 + (j9)(962.25 \angle -36.87^\circ) = 23558 \angle 17.1^\circ \text{ V}$$



(a) Lagging pf load

The excitation voltage per phase (line to neutral) is 23.56 kV and the power angle is 17.1° .

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

– ژنراتور سنکرون (مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار – روتور استوانه‌ای)

A 50-MVA, 30-kV, three-phase, 60-Hz synchronous generator has a synchronous reactance of 9Ω per phase and a negligible resistance. The generator is delivering rated power at a 0.8 power factor lagging at the rated terminal voltage to an infinite bus.

(a) Determine the excitation voltage per phase E and the power angle δ .

(b) With the excitation held constant at the value found in (a), the driving torque is reduced until the generator is delivering 25 MW. Determine the armature current and the power factor.

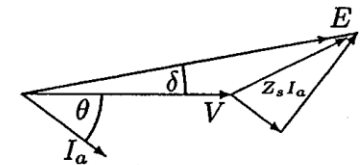
(c) If the generator is operating at the excitation voltage of part (a), what is the steady-state maximum power the machine can deliver before losing synchronism? Also, find the armature current corresponding to this maximum power.

(b) When the generator is delivering 25 MW from $P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta$

the power angle is $\delta = \sin^{-1} \left[\frac{(25)(9)}{(3)(23.56)(17.32)} \right] = 10.591^\circ$

The armature current is $\Rightarrow E = V + jX_s I_a$

$$I_a = \frac{(23,558 \angle 10.591^\circ - 17,320 \angle 0^\circ)}{j9} = 807.485 \angle -53.43^\circ \text{ A}$$



(a) Lagging pf load

The power factor is given by $\cos(53.43) = 0.596$ lagging.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

- ژنراتور سنکرون (مشخصات زاویه توان در حالت ماندگار - روتور استوانه‌ای)

A 50-MVA, 30-kV, three-phase, 60-Hz synchronous generator has a synchronous reactance of 9Ω per phase and a negligible resistance. The generator is delivering rated power at a 0.8 power factor lagging at the rated terminal voltage to an infinite bus.

- (a) Determine the excitation voltage per phase E and the power angle δ .
 (b) With the excitation held constant at the value found in (a), the driving torque is reduced until the generator is delivering 25 MW. Determine the armature current and the power factor.
 (c) If the generator is operating at the excitation voltage of part (a), what is the steady-state maximum power the machine can deliver before losing synchronism? Also, find the armature current corresponding to this maximum power.

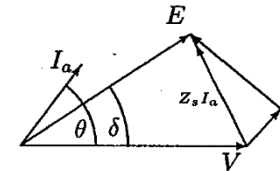
(c) The maximum power occurs at $\delta = 90^\circ$

$$P_{max(3\phi)} = 3 \frac{|E||V|}{X_s} = 3 \frac{(23.56)(17.32)}{9} = 136 \text{ MW}$$

The armature current is

$$E = V + jX_s I_a \Rightarrow I_a = \frac{(23,558 \angle 90^\circ - 17,320 \angle 0^\circ)}{j9} = 3248.85 \angle 36.32^\circ \text{ A}$$

The power factor is given by $\cos(36.32) = 0.8057$ leading.



(c) Leading pf load

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA ، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون ۹Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

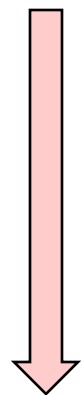
(الف) ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

(ب) با ثابت نگهداشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آن قدر کاهش یافته است که ژنراتور توان ۲۵ MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را محاسبه نمایید.

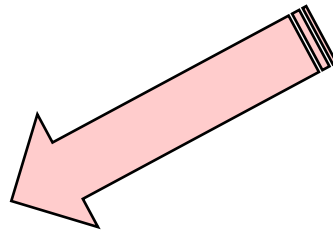
(پ) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار که ماشین می‌تواند قبل از خروج از همگامی تحویل دهد، چقدر است؟ همچنین، جریان آرمیچر این توان حداکثر را پیدا کنید.

حل مجدد مساله با بیان جزئیات محاسبات ریاضی:

$$S_{3\Phi} = |S| \angle \theta = 50 \angle \cos^{-1} 0.8 = 50 \angle 36.87^\circ \text{ MVA}$$



توان ظاهری



یادآوری: تبدیل قطبی به دکارتی

$$|r| \angle \theta = r \cdot \cos \theta + j(r \sin \theta)$$

فرم قطبی

اندازه r

زاویه θ

موهومی

MW

Mvar

$$S_{3\Phi} = 50 \cos 36.87^\circ + (50 \sin 36.87^\circ)j = 50(0.8) + 50(0.6)j = 40 + 30j \quad 55$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example :

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون 9Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

(الف) ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

(ب) با ثابت نگهداشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آن قدر کاهش یافته است که ژنراتور توان ۲۵ MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را محاسبه نمایید.

(پ) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار که ماشین می‌تواند قبل از خروج از همگامی تحویل دهد، چقدر است؟ همچنین، جریان آرمیچر این توان حداکثر را پیدا کنید.

حل:

ولتاژ خط

$$V = \frac{30}{\sqrt{3}} = 17.32 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

ولتاژ فاز

$$I_a = \frac{S_{3\phi}^*}{3V^*} = \frac{(50 \angle -36.87) 10^3}{3(17.32 \angle 0^\circ)} = \frac{(50(\cos(-36.87^\circ)) + (50(\sin(-36.87^\circ))).j) \times 10^3}{3 \times 17.32} = \frac{50(0.8) + 50(-0.6)j}{51.96} \times 10^3$$

قسمت موهومی را منفی می‌کند.

$$= \frac{40 - 30j}{51.96} \times 10^3 = \left(\frac{40}{51.96} - \frac{30}{51.96} \right) 10^3 j = 769.823 - 577.267 j$$

KVA

KV

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example.

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون 9Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

(الف) ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

(ب) با ثابت نگهداشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آن قدر کاهش یافته است که ژنراتور توان ۲۵ MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را محاسبه نمایید.

(پ) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار که ماشین می‌تواند قبل از خروج از همگامی تحویل دهد، چقدر است؟ همچنین، جریان آرمیچر این توان حداکثر را پیدا کنید.

حل: یادآوری: تبدیل دکارتی به قطبی

$$x + y.j = \sqrt{x^2 + y^2} \angle \tan^{-1} \frac{y}{x}$$



$$= 769.823 - 577.267 j = \sqrt{769.823^2 + (-577.267)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{-577.267}{769.823} \right)$$

$$= \sqrt{592627.451 + 333237.189} \angle \tan^{-1} \left(\frac{-577.267}{769.823} \right) = \sqrt{925864.334} \angle \tan^{-1} (-0.7498) = 962.25 \angle -36.87^\circ \text{ A}$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

Example •

ژنراتور سنکرون سه فاز، ۵۰ MVA، ۳۰ kV و ۶۰ Hz دارای راکتانس سنکرون 9Ω در هر فاز می‌باشد. مقاومت اهمی قابل چشم‌پوشی است. این ژنراتور قدرت نامی را در ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز در ولتاژ نامی پایانه خود به شبکه بی‌نهایت تحویل می‌دهد.

(الف) ولتاژ تحریک در هر فاز (E) و زاویه توان (δ) را تعیین کنید.

(ب) با ثابت نگهداشتن تحریک در مقدار تعیین شده در قسمت (الف)، گشتاور ورودی آن قدر کاهش یافته است که ژنراتور توان ۲۵ MW را تحویل دهد. جریان آرمیچر و ضریب قدرت را محاسبه نمایید.

(پ) اگر ژنراتور در ولتاژ تحریک قسمت (الف) کار کند، حداکثر توان حالت ماندگار که ماشین می‌تواند قبل از خروج از همگامی تحویل دهد، چقدر است؟ همچنین، جریان آرمیچر این توان حداکثر را پیدا کنید.

حل:

$$E = V + jX_s I_a$$

$$E = 17320.5 + (j9)(962.25 \angle -36.87^\circ) = 17320.5 + (0.8 \times 8660.25 - 0.6 \times 8660.25 j) j$$

$$= 17320.5 + 0.8 \times 8660.25 j - j^2 0.6 \times 8660.25 = (17320.5 - j^2 0.6 \times 8660.25) + 0.8 \times 8660.25 j =$$

$$= (17320.5 - (-1) \times 0.6 \times 8660.25) + 0.8 \times 8660.25 j = 22516.65 + 6928.2 j$$

$$= \sqrt{22516.65^2 + (6928.2)^2} \angle \tan^{-1} \left(\frac{6928.2}{22516.65} \right) = 23558 \angle 17.1^\circ V$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

- ژنراتور سنکرون قطب برجسته

✓ در ژنراتور روتور استوانه‌ای فاصله هوایی یکنواخت است. اما در حالت روتور قطب برجسته فاصله هوایی یکنواخت نیست. لذا، عدم یکنواختی رلوکتانس مغناطیسی فاصله هوایی را خواهیم داشت. رلوکتانس در محور d به میزان محسوسی کمتر از مقدار آن در محور q است.

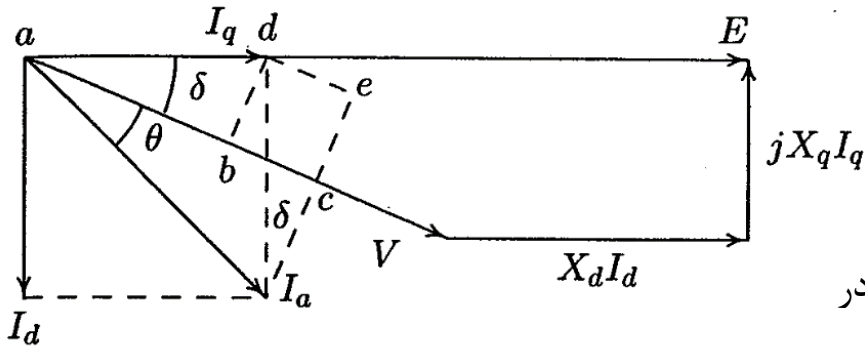
راکتانس در امتداد محور قطب (محور مستقیم) (X_d)

راکتانس در امتداد محور عمودی (X_q)

$$|E| = |V| \cos \delta + X_d I_d$$

اندازه ولتاژ تحریک

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد



- ژنراتور سنکرون قطب برجسته

- نمایش فازوری ژنراتور قطب برجسته:

✓ رلوکتانس در محور d به میزان محسوسی کمتر از مقدار آن در محور q است و می دانیم که شار مغناطیسی، همیشه مسیری را برای عبور انتخاب می کند که رلوکتانس پایینی داشته باشد؛ لذا، بیشتر توان ژنراتور قطب برجسته مربوط به محور d است.

$$P = 3|V||I_a| \cos \theta$$

$$|I_a| \cos \theta = ab + de$$

$$= I_q \cos \delta + I_d \sin \delta$$

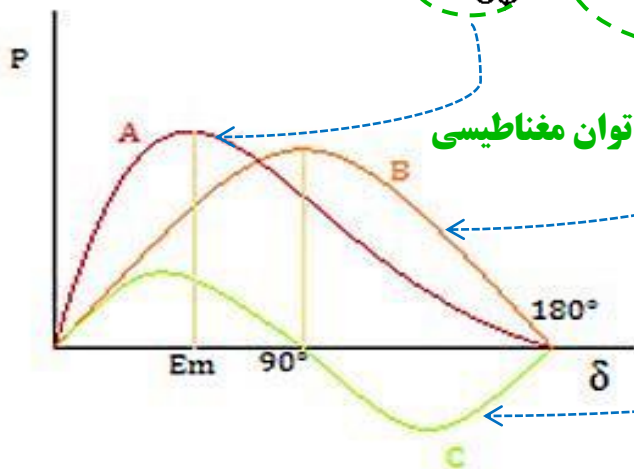
$$P = 3|V|(I_q \cos \delta + I_d \sin \delta)$$

$$|V| \sin \delta = X_q I_q$$

$$I_q = \frac{|V| \sin \delta}{X_q}$$

$$I_d = \frac{|E| - |V| \cos \delta}{X_d}$$

$$P_{3\phi} = 3 \frac{|E||V|}{X_d} \sin \delta + 3|V|^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\delta$$



توان مغناطیسی

توان رلوکتانسی

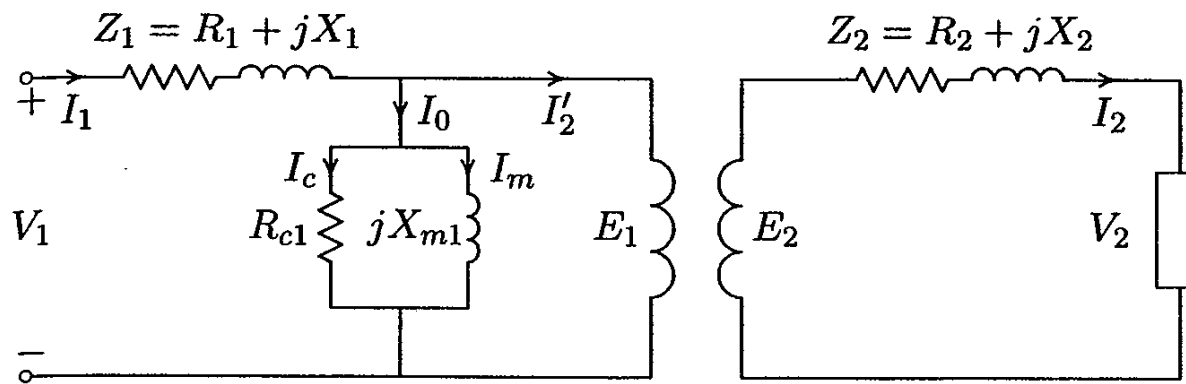
فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ترانسفورماتور قدرت

✓ ترانسفورماتورها از عناصر ضروری در هر سیستم قدرت می باشند.

✓ ترانسفورماتورها ولتاژهای نسبتاً پایین ژنراتورها را به سطح ولتاژ بسیار بالا برای انتقال کارآمد توان میسر می کنند. در سمت مصرف نیز ولتاژ را برای مصرف مشترکین کاهش می دهد.

مدار معادل ترانسفورماتور



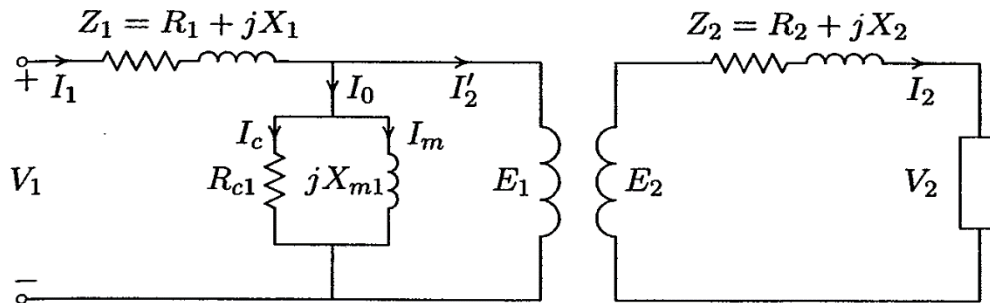
فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ترانسفورماتور قدرت

✓ ترانسفورماتورها از عناصر ضروری در هر سیستم قدرت می باشند.

✓ ترانسفورماتورها ولتاژهای نسبتاً پایین ژنراتورها را به سطح ولتاژ بسیار بالا برای انتقال کارآمد توان میسر می کنند. در سمت مصرف نیز ولتاژ را برای مصرف مشترکین کاهش می دهد.

مدار معادل ترانسفورماتور:



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{ولت آمپرنامی} : S = 3|V_2||I_2| \\ \text{تلفات مسی} : P_{cu} = 3R_{e2}|I_2|^2 \\ \text{ضریبی از توان بار کامل} : n = \sqrt{\frac{P_c}{P_{cu}}} \end{array} \right.$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I'_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\eta = \frac{\text{output power}}{\text{input power}} \quad \text{بازده}$$

$$\eta = \frac{n \times S \times PF}{(n \times S \times PF) + n^2 \times P_{cu} + P_c}$$

ضریب قدرت ←

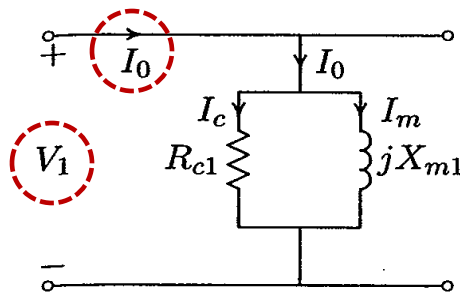
فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ترانسفورماتور قدرت

تعیین پارامترهای مدار معادل ترانسفورماتور

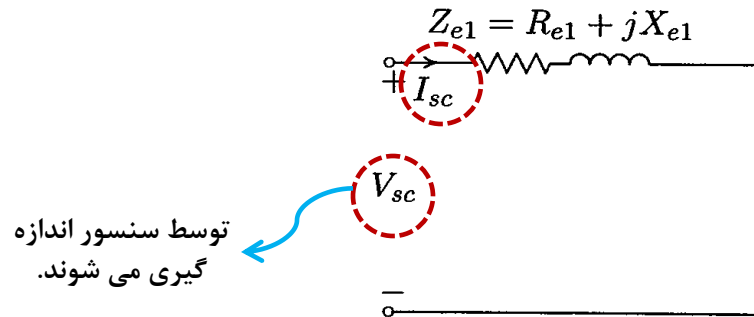
۱- آزمایش اتصال باز ← ولتاژ نامی به ورودی اعمال می شود ← تلفات هسته محاسبه می شود.
(دو سر ثانویه باز است.)

۲- آزمایش اتصال کوتاه ← جریان نامی به یکی از سم پیچ ها ← تلفات مسی محاسبه می شود.
اتصال کوتاه می شود. ورودی اعمال می شود (دو سر ثانویه بسته است.)



Equivalent circuit for the open-circuit test.

$$\begin{cases} R_{c1} = \frac{V_1^2}{P_0} & I_m = \sqrt{I_0^2 - I_c^2} \\ I_c = \frac{V_1}{R_{c1}} & X_{m1} = \frac{V_1}{I_m} \end{cases}$$



توسط سنسور اندازه گیری می شوند.

Equivalent circuit for the short-circuit test.

$$\begin{cases} Z_{e1} = \frac{V_{sc}}{I_{sc}} & R_{e1} = \frac{P_{sc}}{(I_{sc})^2} \\ X_{e1} = \sqrt{Z_{e1}^2 - R_{e1}^2} & \text{راکتانس پراکنده} \end{cases}$$

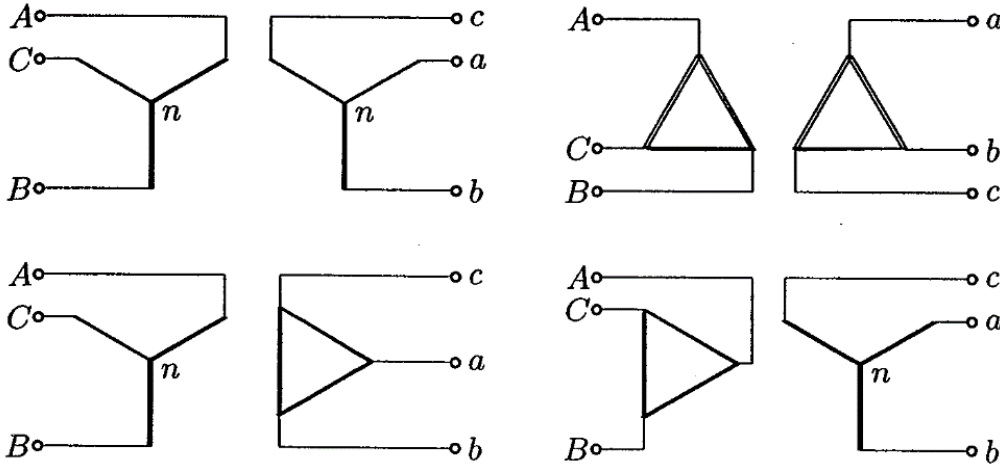
فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد ترانسفورماتور قدرت

اتصال های ترانسفورماتورهای سه فاز

✓ در واحدهای بزرگ فوق فشار قوی (EHV) برای رفع موانع عایق‌بندی و محدودیت‌های حمل و نقل ممکن است به مجموعه‌ای از سه ترانسفورماتور یکفاز نیاز باشد.

نکته مهم:

In Y–Y and Δ – Δ connections, the ratio of the line voltages on HV and LV sides are the same as the ratio of the phase voltages on the HV and LV sides. Furthermore, there is no phase shift between the corresponding line voltages on the HV and LV sides. However, the Y– Δ and the Δ –Y connections will result in a phase shift of 30° between the primary and secondary line-to-line voltages. The windings are arranged in accordance to the ASA (American Standards Association) such that the line voltage on the HV side leads the corresponding line voltage on the LV side by 30° regardless of which side is Y or Δ .



فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد ترانسفورماتور قدرت

- ترانسفورماتورهای با سه سیم پیچ:

✓ ترانسفورماتورهای سه سیم پیچ اغلب برای اتصال سه مدار که ممکن است دارای ولتاژهای مختلفی باشند به کار می‌روند. سیم پیچ سوم آن ثالثیه نامیده می‌شود.

۱- تغذیه دو بار مستقل در ولتاژهای متفاوت از یک منبع

۲- اتصال دو سیستم انتقال با ولتاژهای مختلف

۳- ایجاد ولتاژ برای تامین قدرت کمکی در پستها یا تغذیه سیستم توزیع محلی

۴- راکتورها یا خازنهای قابل قطع و وصل به منظور جبران توان راکتیو به شین ثالثیه متصل می‌شوند.

۵- گاهی اوقات ترانسفورماتورهای سه فاز ستاره-ستاره و اتوترانسفورماتور با اتصال ستاره برای حذف هارمونیکها دارای سیم پیچ ثالثیه با اتصال مثلث می‌باشند.

کاربرد ترانسفورماتورهای با سه سیم پیچ

کنترل اندازهی ولتاژ و زاویهی فاز ولتاژ توسط ترانسفورماتورها:

✓ کنترل اندازه ولتاژ در ترانسفورماتورها برای جبران افت ولتاژهای متغیر در سیستم و کنترل عبور توان راکتیو در خطوط انتقال ضروری است. ترانسفورماتورها را می‌توان برای کنترل زاویه فاز (کنترل توان اکتیو) نیز به کار برد.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ترانسفورماتور قدرت

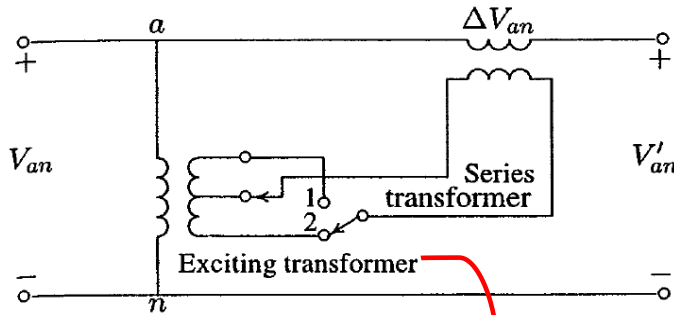
کنترل اندازهی ولتاژ و زاویهی فاز ولتاژ توسط ترانسفورماتورها:

ترانسفورماتورهای تغییر دهندهی تپ بدون بار

ترانسفورماتورهای تغییر دهندهی تپ جهت کنترل

ترانسفورماتورهای تغییر دهندهی تپ زیر بار (TCUL)

اندازه ولتاژ



جهت کنترل اندازه ولتاژ

تقویت کننده ها یا

ترانسفورماتورهای تنظیم کننده

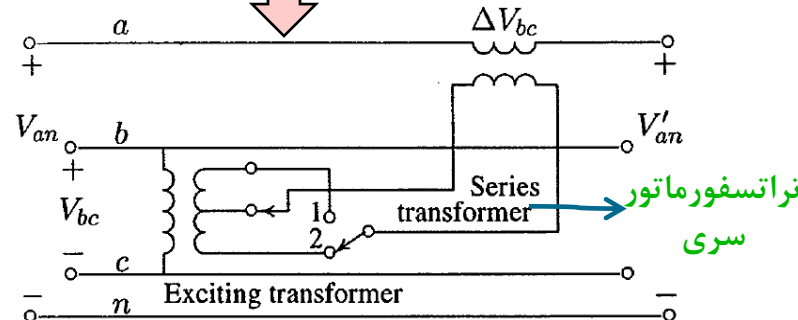
جهت کنترل زاویه فاز ولتاژ

مزایا

۱- ترانسفورماتورهای تنظیم کننده و تجهیزات تغییر دهنده تپ را می توان بدون اینکه اثری در سیستم داشته باند، برای تعمیر از مدار خارج نمود.

۲- ترانسفورماتورهای اصلی نیازی به تغییر تپ ندارند.

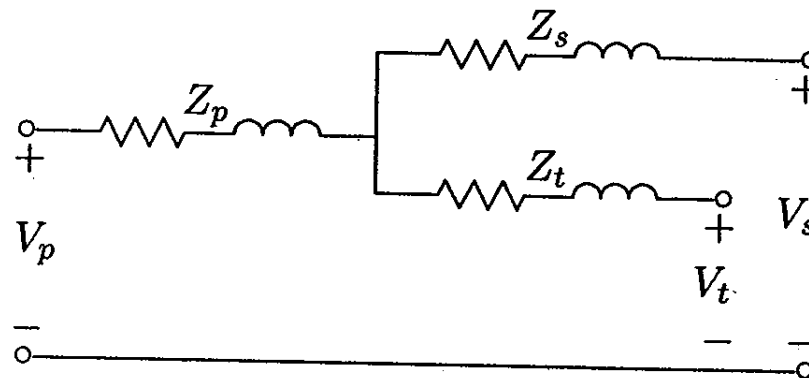
تپ ترانسفورماتور **تحریک** قابل تغییر بوده و ولتاژ بدست آمده از آن به اولیه ترانسفورماتور **سری** اعمال می شود و ولتاژ به دست آمده در ثانویه ترانسفورماتور سری، به ولتاژ ورودی اضافه می شود (تقویت کننده همفاز). با تغییر کلید از حالت ۱ به ۲ ولتاژ خروجی کمتر از ورودی می شود.



فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

ترانسفورماتور قدرت

- مدار معادل ترانسفورماتور با سه سیم پیچ:



- کنترل ولتاژ در ترانسفورماتورها:

- ✓ کنترل ولتاژ در ترانسفورماتورها برای جبران افت ولتاژهای متغیر در سیستم و کنترل عبور توان راکتیو ثر خطوط انتقال ضروری می باشد.
- ✓ دو روش مرسوم برای کنترل ولتاژ در ترانسفورماتورها استفاده از ترانسفورماتورهای تغییر دهنده تپ و ترانسفورماتورهای تنظیم کننده می باشد.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

سیستم نسبت به واحد (THE PER-UNIT SYSTEM)

- ✓ حل سیستم قدرت بهم پیوسته با چندین سطوح ولتاژ مختلف کار مشکلی است. برای رفع این مشکل سیستم نسبت به واحد ارائه شده است.
- ✓ در این سیستم، **سطوح ولتاژ مختلف** از بین رفته و شبکه های قدرت شامل ژنراتورها، **ترانسفورماتورها** و خطوط با سطوح ولتاژ مختلف، به سیستمی از **امپدانس های ساده** تبدیل می شوند.
- ✓ در سیستم نسبت به واحد کمیت‌های فیزیکی مانند توان، ولتاژ، جریان و امپدانس به صورت ضریبی از کمیت‌های مبنا بیان می شوند.

$$\text{کمیت بر حسب نسبت به واحد} = \frac{\text{مقدار واقعی کمیت}}{\text{مقدار مبنای کمیت}}$$

$$S_{pu} = \frac{S}{S_B} \quad V_{pu} = \frac{V}{V_B} \quad I_{pu} = \frac{I}{I_B} \quad \text{and} \quad Z_{pu} = \frac{Z}{Z_B}$$

به عنوان مثال

نکته: معمولاً ولت - آمپر سه فاز S_B یا MVA_B و ولتاژ مبنای خط به خط V_B or kV_B به عنوان مبنا انتخاب می شوند.

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} V_B} \quad Z_B = \frac{V_B / \sqrt{3}}{I_B} \quad Z_B = \frac{(V_B)^2}{S_B} \quad Z_B = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B} \quad S_{pu} = V_{pu} I_{pu}^* \quad Z_{pu} = \frac{|V_{pu}|^2}{S_{L(pu)}^*}$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \left(\frac{V_B^{old}}{V_B^{new}} \right)^2 \quad \xrightarrow{\text{اگر ولتاژهای مبنا برابر باشند}} \quad Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}}$$

مزایای سیستم نسبت به واحد برای تجزیه و تحلیل:

۱- مقادیر پریونیت امپدانس، ولتاژ و جریان ترانسفورماتورها بدون رعایت تبدیل به اولیه یا ثانویه، مساوی هستند.

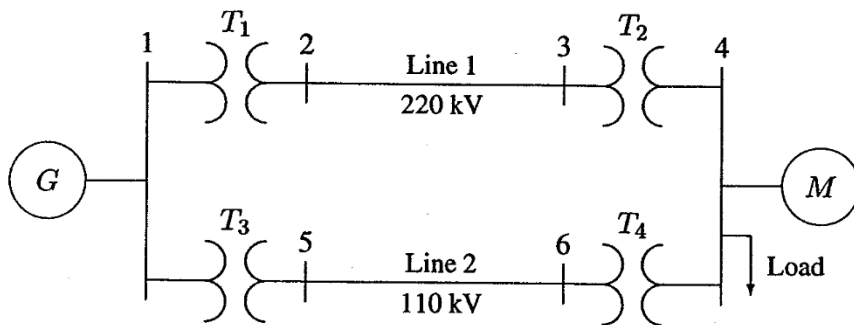
۲- شبیه سازی و تحلیل کامپیوتری مسائل پیچیده قدرت آسان می شود.

۳- قوانین مدار در سیستم پریونیت صادق است. ضرایب 3 و $\sqrt{3}$ در سیستم پریونیت حذف می شوند.

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را ۱۰۰ مگا ولت آمپر و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۴ مگا وولت آمپر در ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.

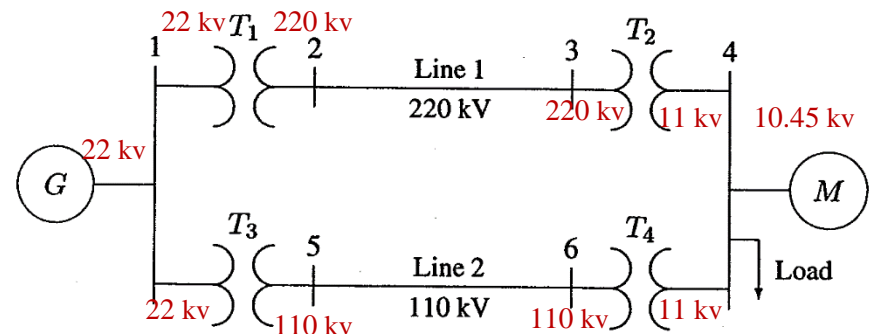


مقادیر ثبت شده بر روی پلاک تجهیزات:

G :	90 MVA	22 kV	$X = 18 \%$
T_1 :	50 MVA	22/220 kV	$X = 10 \%$
T_2 :	40 MVA	220/11 kV	$X = 6.0 \%$
T_3 :	40 MVA	22/110 kV	$X = 6.4 \%$
T_4 :	40 MVA	110/11 kV	$X = 8.0 \%$
M :	66.5 MVA	10.45 kV	$X = 18.5 \%$

حل: ابتدا ولتاژهای مبنا باید برای تمام قسمت‌های شبکه تعیین شوند.

صورت سوال ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت پیشنهاد داده است.

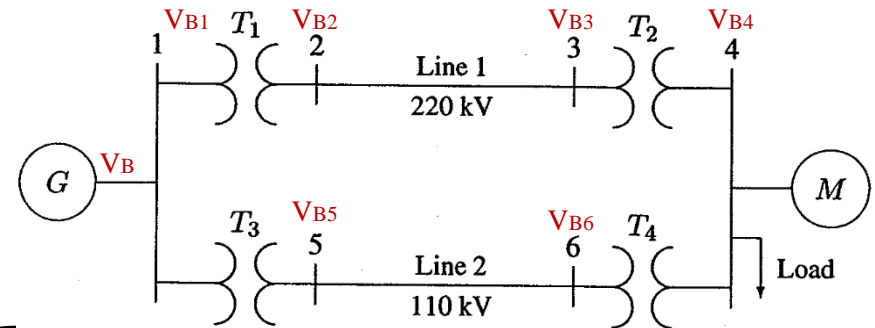
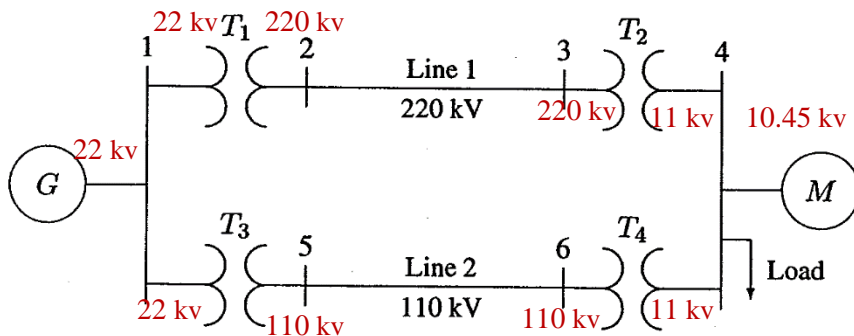


فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را ۱۰۰ مگا ولت آمپر و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را **۲۲ کیلو ولت** انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمایید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۴ مگا و در شین ۶ قدرت ۰/۶ مگا پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.

حل: در شکل زیر ولتاژهای مبنا مشخص شده اند.



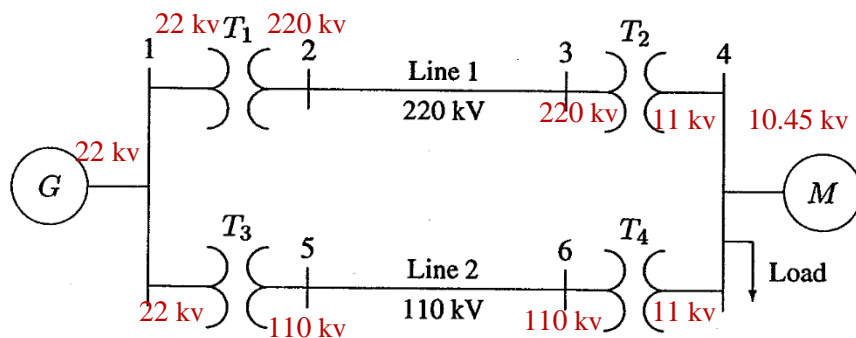
G:	90 MVA	22 kV	X = 18 %
T ₁ :	50 MVA	22/220 kV	X = 10 %
T ₂ :	40 MVA	220/11 kV	X = 6.0 %
T ₃ :	40 MVA	22/110 kV	X = 6.4 %
T ₄ :	40 MVA	110/11 kV	X = 8.0 %
M:	66.5 MVA	10.45 kV	X = 18.5 %

$$\begin{cases}
 V_{B1} = 22 \text{ kV} \\
 V_{B2} = 22 \left(\frac{220}{22} \right) = 220 \text{ kV} \\
 V_{B3} = 220 \text{ kV} \\
 V_{B4} = 220 \left(\frac{11}{220} \right) = 11 \text{ kV} \\
 V_{B5} = V_{B6} = 22 \left(\frac{110}{22} \right) = 110 \text{ kV}
 \end{cases}$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبناى مشترک را **۱۰۰ مگا ولت آمپر** و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانسى را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۵۷ MVA در ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.



G:	90 MVA	22 kV	$X = 18 \%$
T ₁ :	50 MVA	22/220 kV	$X = 10 \%$
T ₂ :	40 MVA	220/11 kV	$X = 6.0 \%$
T ₃ :	40 MVA	22/110 kV	$X = 6.4 \%$
T ₄ :	40 MVA	110/11 kV	$X = 8.0 \%$
M:	66.5 MVA	10.45 kV	$X = 18.5 \%$

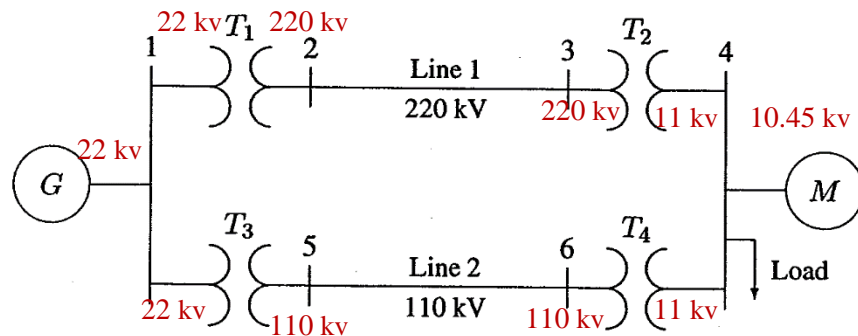
حل: ولتاژهای بدست آمده ی مبناى ژنراتور و ترانسفورماتورها برای مقادیر نامی آنها شده است لذا بر اساس رابطه زیر راکتانس ها را بر حسب پریونیت خواهیم داشت:

$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \left\{ \begin{array}{l} G: X = 0.18 \left(\frac{100}{90} \right) = 0.20 \text{ pu} \\ T_1: X = 0.10 \left(\frac{100}{50} \right) = 0.20 \text{ pu} \\ T_2: X = 0.06 \left(\frac{100}{40} \right) = 0.15 \text{ pu} \\ T_3: X = 0.064 \left(\frac{100}{40} \right) = 0.16 \text{ pu} \\ T_4: X = 0.08 \left(\frac{100}{40} \right) = 0.2 \text{ pu} \end{array} \right.$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را ۱۰۰ مگا ولت آمپر و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۵۷ MVA در ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.



G:	90 MVA	22 kV	X = 18 %
T ₁ :	50 MVA	22/220 kV	X = 10 %
T ₂ :	40 MVA	220/11 kV	X = 6.0 %
T ₃ :	40 MVA	22/110 kV	X = 6.4 %
T ₄ :	40 MVA	110/11 kV	X = 8.0 %
M:	66.5 MVA	10.45 kV	X = 18.5 %

حل: اما طبق داده های سوال بر روی پلاک موتور مقادیر زیر ثبت شده است:

$$M: 66.5 \text{ MVA} \quad 10.45 \text{ kV} \quad X = 18.5 \%$$

موتور به شین ۴ که ولتاژ مبنای آن ۱۱ کیلو ولت است نصب شده است. لذا برای موتور از رابطه زیر خواهیم داشت:

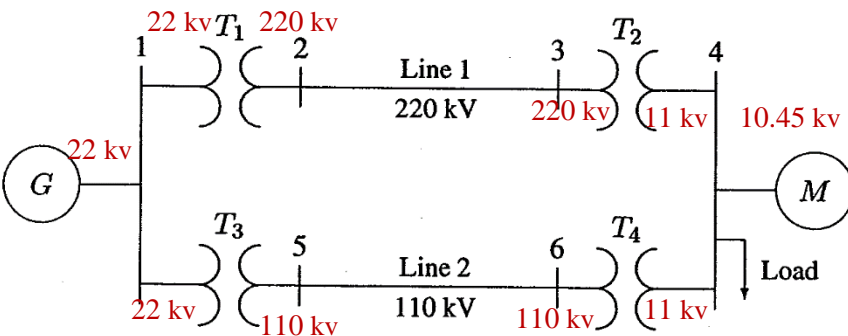
$$Z_{pu}^{new} = Z_{pu}^{old} \frac{S_B^{new}}{S_B^{old}} \left(\frac{V_B^{old}}{V_B^{new}} \right)^2$$

$$M: X = 0.185 \left(\frac{100}{66.5} \right) \left(\frac{10.45}{11} \right)^2 = 0.25 \text{ pu}$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را **۱۰۰ مگا ولت آمپر** و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۵۷ MVA در ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های $۴۸/۴$ و $۶۵/۴۳$ اهم می باشند.



G:	90 MVA	22 kV	X = 18 %
T ₁ :	50 MVA	22/220 kV	X = 10 %
T ₂ :	40 MVA	220/11 kV	X = 6.0 %
T ₃ :	40 MVA	22/110 kV	X = 6.4 %
T ₄ :	40 MVA	110/11 kV	X = 8.0 %
M:	66.5 MVA	10.45 kV	X = 18.5 %

حل:

$$\begin{cases} Z_B = \frac{(V_B)^2}{S_B} \\ Z_B = \frac{(kV_B)^2}{MVA_B} \end{cases}$$

Impedance bases for lines 1 and 2,

$$Z_{B2} = \frac{(220)^2}{100} = 484 \Omega$$

$$Z_{B5} = \frac{(110)^2}{100} = 121 \Omega$$

Line 1 and 2 per-unit reactances are

$$\text{Line 1: } X = \left(\frac{48.4}{484} \right) = 0.10 \text{ pu}$$

$$\text{Line 2: } X = \left(\frac{65.43}{121} \right) = 0.54 \text{ pu}$$

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را **۱۰۰ مگا ولت آمپر** و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت **57 MVA** ر ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ **10.45 kV** دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.

حل:

The load apparent power at 0.6 power factor lagging is given by

$$S_{L(3\phi)} = 57 \angle 53.13^\circ \text{ MVA}$$

Hence, the load impedance in ohms is

$$Z_L = \frac{(V_{L-L})^2}{S_{L(3\phi)}^*} = \frac{(10.45)^2}{57 \angle -53.13^\circ} = 1.1495 + j1.53267 \ \Omega$$

The base impedance for the load is

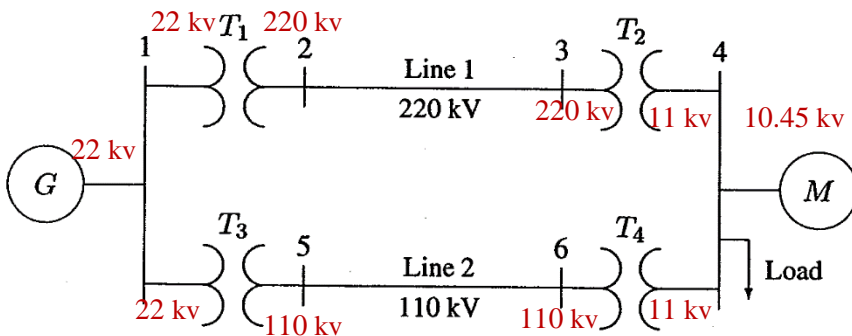
$$Z_{B4} = \frac{(11)^2}{100} = 1.21 \ \Omega$$

Therefore, the load impedance in per-unit is

$$Z_{L(pu)} = \frac{1.1495 + j1.53267}{1.21} = 0.95 + j1.2667 \text{ pu}$$

← مقدار مبنا

مقدار واقعی



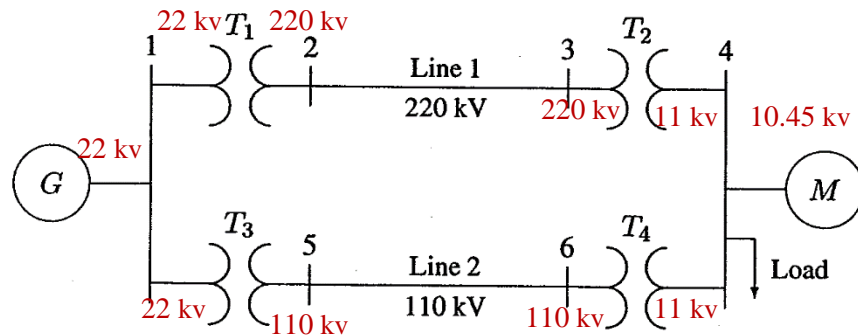
G:	90 MVA	22 kV	X = 18 %
T ₁ :	50 MVA	22/220 kV	X = 10 %
T ₂ :	40 MVA	220/11 kV	X = 6.0 %
T ₃ :	40 MVA	22/110 kV	X = 6.4 %
T ₄ :	40 MVA	110/11 kV	X = 8.0 %
M:	66.5 MVA	10.45 kV	X = 18.5 %

فصل سوم: مدل‌های ژنراتور و ترانسفورماتور، سیستم نسبت به واحد

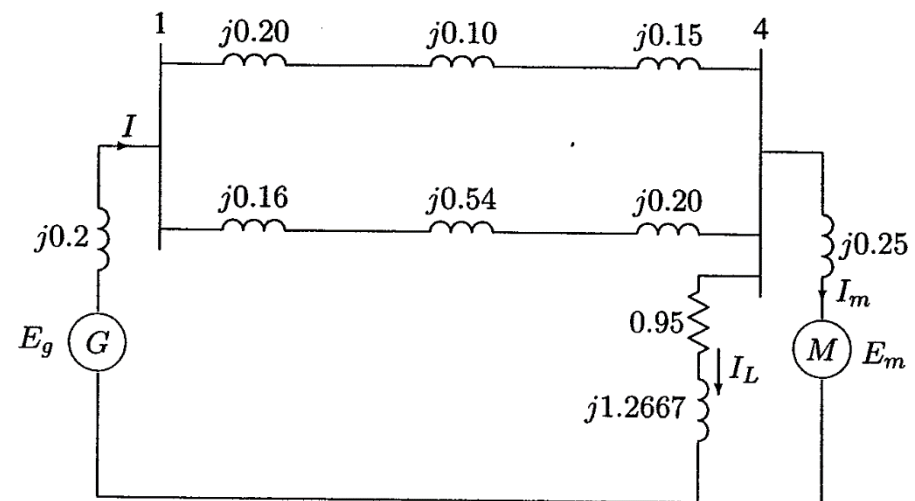
تغییر مبنا

مثال: نمایش تک خطی یک سیستم سه فاز در شکل زیر نشان داده شده است. قدرت مبنای مشترک را **۱۰۰ مگا ولت آمپر** و ولتاژ مبنا در سمت ژنراتور را ۲۲ کیلو ولت انتخاب کنید. نمایش امپدانس را با تمامی امپدانسها شامل امپدانس بار بر حسب پریونیت رسم نمائید. در ضمن بار سه فاز در شین ۴ قدرت ۵۷ MVA در ضریب قدرت ۰/۶ پس فاز و با ولتاژ ۱۰.۴۵ kV دریافت می کند. خطوط ۱ و ۲ به ترتیب دارای راکتانس های ۴۸/۸ و ۶۵/۴۳ اهم می باشند.

حل: در نهایت مدار معادل بر حسب امپدانس های پریونیت در شکل زیر نشان داده شده است:



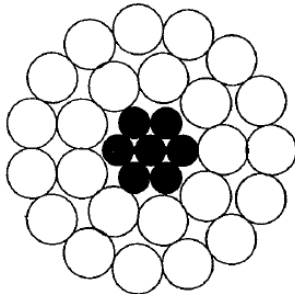
G :	90 MVA	22 kV	$X = 18 \%$
T_1 :	50 MVA	22/220 kV	$X = 10 \%$
T_2 :	40 MVA	220/11 kV	$X = 6.0 \%$
T_3 :	40 MVA	22/110 kV	$X = 6.4 \%$
T_4 :	40 MVA	110/11 kV	$X = 8.0 \%$
M :	66.5 MVA	10.45 kV	$X = 18.5 \%$



فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

✓ متداول ترین هادی های خطوط انتقال و ولتاژ بالا عبارتند از: هادی آلومینیومی تقویت شده با فولاد (ACSR)، هادی تمام آلومینیومی و هادی آلومینیومی تقویت شده با آلیاژ. دلیل محبوبیت این هادی ها هزینه نسبتاً کم و بالا بودن نسبت استحکام به وزن آن ها در مقایسه با هادی های مسی است. دلیل دیگر، فراوانی آلومینیوم در مقایسه با مس است. برای انعطاف پذیری، هادی ها به صورت رشته ای ساخته می شوند.



Cross-sectional view of a 24/7 ACSR conductor.

✓ در ولتاژهای بیش از ۲۳۰ کیلو ولت، بکارگیری بیش از یک هادی در هر فاز ترجیح داده می شود. این عمل دسته بندی یا گروه بندی (باندلینگ) هادی ها نامیده می شود.

سوال: مزیت های باندلینگ (گروه بندی کردن) هادی ها را بیان کنید. (به کتاب بررسی هادی سعادت مراجعه شود).

جواب:

The bundle consists of two, three, or four conductors.

Bundling increases the effective radius of the line's conductor and reduces the electric field strength near the conductors, which reduces corona power loss, audible noise, and radio interference. Another important advantage of bundling is reduced line reactance.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

✓ کلیه خطوط انتقال در سیستم قدرت دارای خواص الکتریکی مقاومت، اندوکتانس، ظرفیت خازنی و رسانائی می باشند.

✓ اندوکتانس و ظرفیت خازنی بواسطه ی اثر میدانهای مغناطیسی و الکتریکی در اطراف هادی ها بوجود می آیند.

مقاومت خط:

✓ مقاومت هادی در ارزیابی بازده انتقال و مطالعات اقتصادی بسیار مهم است. مقاومت dc یک هادی گرد و توپر در دمای مشخص برابر است با:

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

where ρ : مقاومت ویژه هادی
 l : طول هادی
 A : سطح مقطع هادی

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

مقاومت خط:

✓ مقاومت هادی با سه عامل تغییر می کند: فرکانس، تاباندن و دما

✓ هنگامیکه جریان متناوب از یک هادی عبور می کند، توزیع جریان در سطح مقطع هادی یکسان نبوده و چگالی جریان در سطح هادی بیشترین مقدار را دارد. این اثر موجب می شود تا مقاومت ac، کمی بیشتر از مقاومت dc گردد. این رفتار به اثر پوستی موسوم است. در فرکانس ۶۰ هرتز، مقاومت ac تقریباً ۲ درصد بیشتر از مقاومت dc است.

✓ از آنجا که هادی، رشته ای تابانده شده است، بنابراین طول واقعی هر رشته بیشتر از طول هادی است. لذا مقاومت هادی کمی بیشتر از مقاومت واقعی رشته ها است که از رابطه ی زیر بدست می آید.

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

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

مقاومت خط:

✓ مقاومت هادی با زیاد شده دما افزایش می یابد. برای محدوده‌ای از دماهای موجود این تغییر خطی در نظر گرفته می شود و از رابطه ی زیر محاسبه می گردد:

$$R_2 = R_1 \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

where R_2 and R_1 are conductor resistances at t_2 and t_1 -C°, respectively. T is a temperature constant that depends on the conductor material. For aluminum $T \simeq 228$.

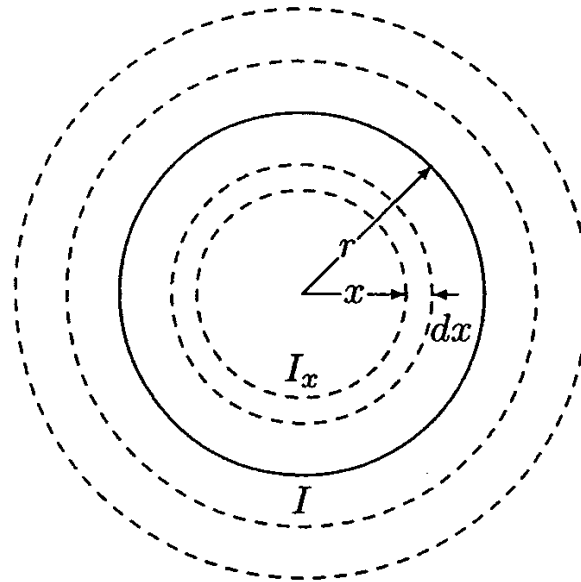
فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

✓ عبور جریان از هادی موجب تولید میدان مغناطیسی در اطراف آن می گردد. خطوط شار در میدان مغناطیسی به صورت دایره های بسته و هم مرکز هستند.

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



فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

اندوکتانس داخلی:

✓ با صرف نظر از اثر پوستی و فرض چگالی جریان یکسان در سرتاسر سطح مقطع هادی، رابطه زیر را خواهیم داشت:

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2}$$

✓ با استفاده از تعاریف شار پیوندی و چگالی شار، اندوکتانس ناشی از شار پیوندی داخلی برابر است با:

$$L_{int} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} \times 10^{-7} \text{ H/m}$$

و μ_0 : نفوذپذیری مغناطیسی هوای آزاد است و مقدار آن برابر است با: $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$

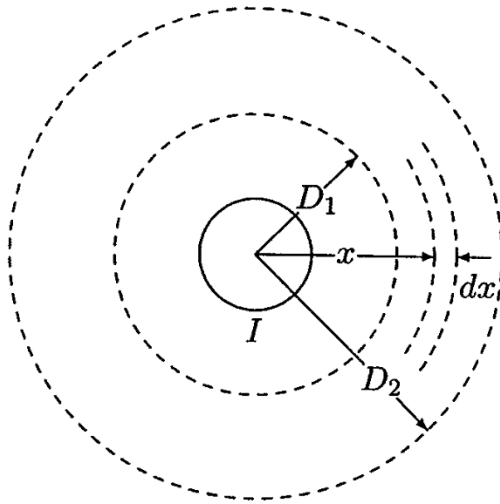
مستقل از شعاع هادی (r) است.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

اندوکتانس ناشی از شار پیوندی خارجی:

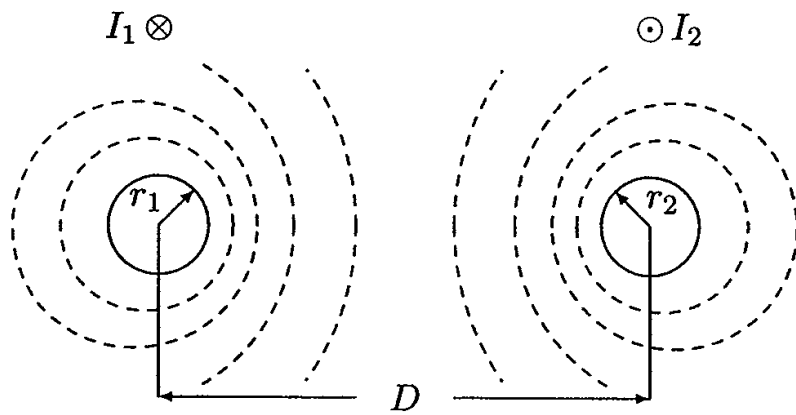


شار پیوندی بین D_1 و D_2

✓ اندوکتانس بین دو نقطه خارج از هادی برابر است با:

$$L_{ext} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_2}{D_1} \text{ H/m}$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال



خط یکفاز با دو سیم

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

اندوکتانس خطوط یکفاز:

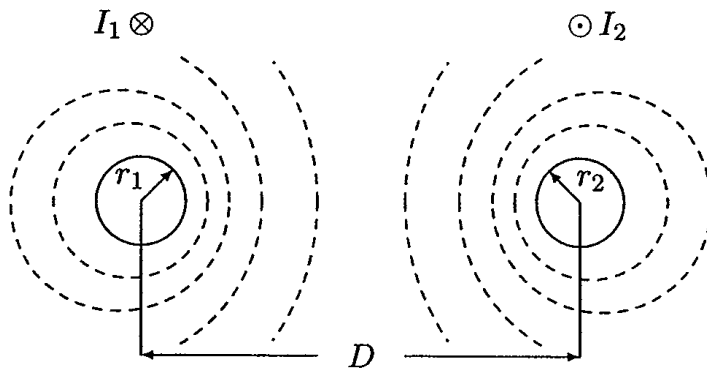
✓ یک متر از یک فاز شامل دو هادی گرد توپر با شعاع های r_1 و r_2 مطابق شکل را در نظر بگیرید. فاصله ی بین دو هادی از هم D است. هادی ۱ حامل جریان فازوری I_1 مرجع می باشد و عمود بر صفحه است و هادی ۲ حامل جریان برگشت $I_2 = -I_1$ می باشد.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

اندوکتانس خطوط یکفاز:



خط یکفاز با دو سیم

$$L_{1(ext)} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \text{ H/m}$$

$$L_1 = \frac{1}{2} \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} \text{ H/m}$$

اندوکتانس کل هادی

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_1} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{1} \text{ H/m}$$

$$L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_2} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{1} \text{ H/m}$$

$$\text{اگر: } r'_1 = r_1 e^{-\frac{1}{4}}$$

با D_s نمایش می دهند. \rightarrow فاصله متوسط هندسی: GMR \rightarrow

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \text{ mH/km}$$

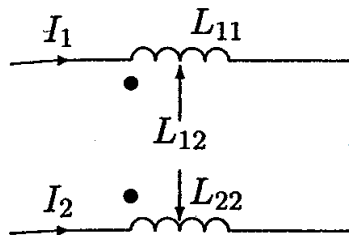
اگر دو هادی یکسان باشند \leftarrow

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس هادی تکی

شار پیوندی بر حسب اندوکتانس های خودی و متقابل:



خط یکفاز که بصورت دو سیم پیچ با تزویج مغناطیسی نشان داده شده است.

✓ برای n هادی شار پیوندی هادی ۱ بصورت زیر محاسبه می شود:

$$\lambda_i = L_{ii}I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij}I_j \quad j \neq i$$

or

$$\lambda_i = 2 \times 10^{-7} \left(I_i \ln \frac{1}{r_i'} + \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{ij}} \right) \quad j \neq i$$

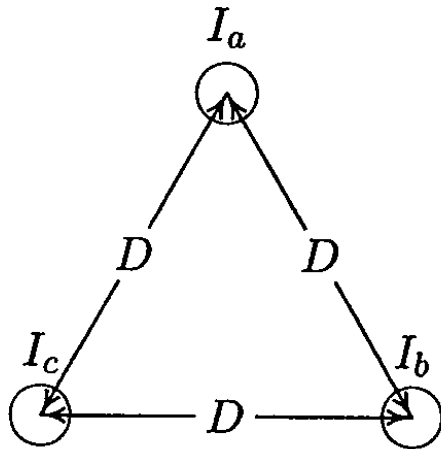
فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس خطوط انتقال سه فاز

۱- فاصله گذاری متقارن:

➤ یک خط سه فاز دارای سه هادی با شعاع r و طول یک متر را مانند شکل مقابل در نظر بگیرید:



$$I_a + I_b + I_c = 0$$

فاصله گذاری متقارن

$$\lambda_i = 2 \times 10^{-7} \left(I_i \ln \frac{1}{r'_i} + \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{ij}} \right) \quad j \neq i$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right)$$

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} - I_a \ln \frac{1}{D} \right)$$

$$= 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{D}{r'}$$

$$I_b + I_c = -I_a$$

$$\lambda_b = \lambda_c = \lambda_a$$

شعاع متوسط هندسی: $D_s = r e^{-\frac{1}{4}}$

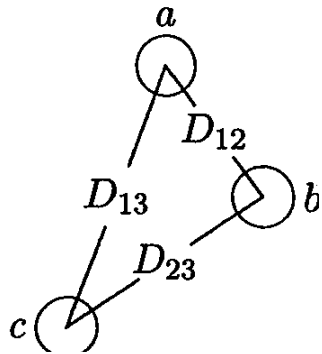
اندوکتانس هر فاز در هر کیلومتر: $L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \text{ mH/km}$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس خطوط انتقال سه فاز

۲- فاصله گذاری نامتقارن:



$$\lambda_i = 2 \times 10^{-7} \left(I_i \ln \frac{1}{r'_i} + \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{ij}} \right) \quad j \neq i$$

$$\begin{cases} \lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'_a} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ \lambda_b = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'_b} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \\ \lambda_c = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'_c} \right) \end{cases}$$

or in matrix form

$$\lambda = \mathbf{L} \mathbf{I} \quad \mathbf{L} = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r'_a} & \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{D_{13}} \\ \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{r'_b} & \ln \frac{1}{D_{23}} \\ \ln \frac{1}{D_{13}} & \ln \frac{1}{D_{23}} & \ln \frac{1}{r'_c} \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} L_a = \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'_a} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ L_b = \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'_b} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \\ L_c = \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'_c} \right) \end{cases}$$

❖ جریان فاز a بعنوان جریان مرجع انتخاب می شود

$$\begin{cases} I_b = I_a \angle 240^\circ = a^2 I_a \\ I_c = I_a \angle 120^\circ = a I_a \end{cases}$$

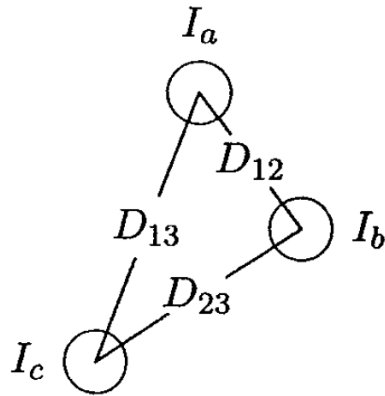
$$a = 1 \angle 120^\circ \text{ and } a^2 = 1 \angle 240^\circ$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اندوکتانس خطوط انتقال سه فاز

جابجایی هادی ها در خط انتقال:



❖ در اکثر تجزیه و تحلیل های سیستم قدرت به مدل هر فاز خط انتقال نیاز است.

❖ یک روش مناسب برای ایجاد تقارن و مدل سازی هر فاز،

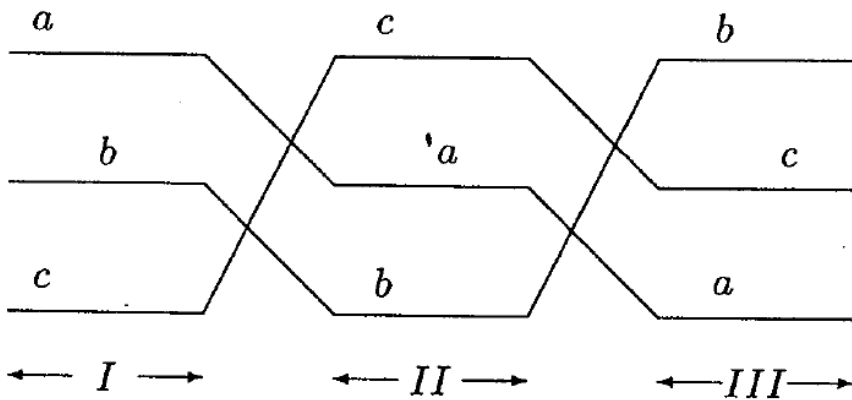
جابجایی هادی های خط است. این روش شامل جابجایی آرایش

فازها برای یک سوم طول خط بوده و هر هادی با یک ترکیب

منظم چنان جابجا می شود که موقعیت فیزیکی بعدی را اشغال

نماید. برای مدل سازی بهترین راه این است که مدار را به صورت

جابجا شده فرض کنیم.



در یک خط جابجا شده، هر فاز هر سه موقعیت را اشغال می کند

average value
$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3}$$

$$a + a^2 = 1 \angle 120^\circ + 1 \angle 240^\circ = -1 \quad L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left(3 \ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right)$$

فاصله متوسط هندسی

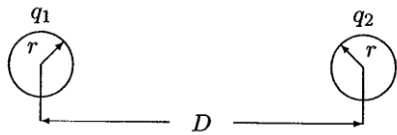
اندوکتانس هر فاز در هر کیلومتر:
$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \text{ mH/km}$$

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

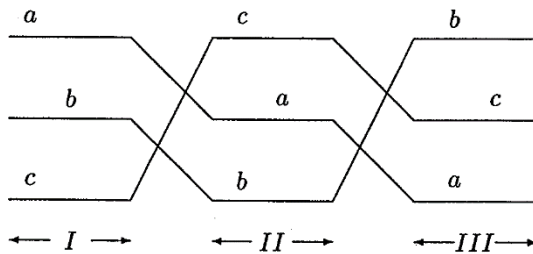
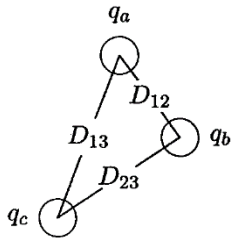
❖ هادی های خط انتقال، به دلیل وجود اختلاف پتانسیل بین آن ها، نسبت به یکدیگر ظرفیت خازنی دارند. مقدار ظرفیت خازنی میان هادی ها تابعی از اندازه ی هادی، فاصله ی میان آن ها و ارتفاع آن ها از زمین است.



$$C_{12} = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \text{ F/m}$$

یکفاز

ظرفیت خازنی خطوط



سه فاز

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{r}} \mu\text{F/km}$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

تأثیر زمین بر ظرفیت خازنی خطوط

✓ سطح زمین همانند یک سطح هم پتانسیل بوده و بنابراین خطوط شار، سطح زمین را بصورت عمودی قطع می کنند.

✓ معمولاً زمین را با یک هادی فرضی باردار با بار مساوی و خلاف بار روی هادی اصلی، جایگزین می کنند.

✓ حضور زمین موجب **افزایش ظرفیت خازنی** می گردد. اما معمولاً ارتفاع هادی در مقایسه با فاصله ی میان هادی ها زیاد بوده

و اثر زمین قابل صرف نظر است.

نکته: میدان الکتریکی همیشه در اطراف بار الکتریکی وجود دارد و میدان مغناطیسی هنگامی که بارهای الکتریکی جریان

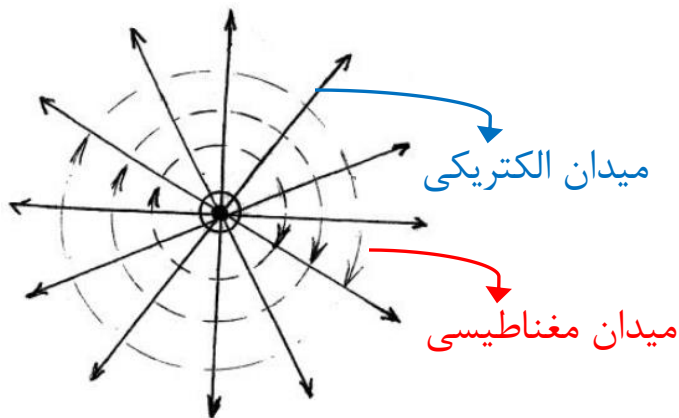
می یابند، تشکیل می شود. این دو میدان برهم عمود هستند.

✓ زمانی که جریانی از یک سیم می گذرد، در اطراف آن خطوط

میدان مغناطیسی که به شکل دایره متحد المکز هستند،

تشکیل می شوند. اما خطوط میدان الکتریکی به صورت شعاعی

از سطح سیم به خارج می روند.



سوال: تأثیر میدان های الکتریکی و مغناطیسی بر روی اشیای نزدیک خط انتقال را بررسی کنید.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

پدیده ی کرونا: هنگامی که گرادیان ولتاژ در سطح یک هادی بیش از شدت دی الکتریک هوای اطراف هادی گردد، هوای

اطراف هادی یونیزه می شود. این مسئله می تواند منجر به تخلیه جزئی انرژی الکتریکی شود، که به آن کرونا می گویند.

✓ پدیده ی کرونا تحت تأثیر شدت میدان الکتریکی اتفاق می افتد.

علامت های پدیده ی کرونا:

✓ مهم ترین علامت آن بوجود آمدن هاله ای نورانی اطراف خطوط فشار قوی است. کرونا در واقع یونیزه شدن نیتروژن هوا

است و علت وجود تلفات انرژی ایجاد نور و حرارت در اطراف سطح هادی است. نشانه های کرونا شامل نور که بسته به

شدت کرونا طول موج آن از مادون قرمز تا ماورای بنفش تغییر می کند. نشانه های دیگر صدای جرقه های کوچک

الکتریکی و تشکیل گاز اوزن (که بوی آن در محیط اطراف قابل تشخیص است) و بوجود آمدن اسید نیتریک در اثر

ترکیب نیتروژن جدا شده از هوا با رطوبت موجود در هوا است که به صورت گرد سفید اطراف سیم ها نمایان می گردد.

✓ افزایش ولتاژ، شکل ظاهری ماده رسانا، و قطرات آب و گرد و خاک می توانند در ایجاد کرونا نقش مهمی داشته باشند.

پدیده کرونا باعث به هدر رفتن انرژی الکتریکی و همچنین کاهش راندمان خطوط انتقال نیرو می گردد. همچنین کرونا

باعث اختلال در پیام های مخابراتی و ایجاد نویز می شود.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

پارامترهای خط انتقال

اثر پوستی:

✓ اثر پوستی پدیده‌ای است که در خطوط انتقال برق جریان متناوب رخ داده و منجر به کاهش چگالی جریان در مرکز سیم و افزایش آن در لایه‌های بیرونی یا پوسته سیم می‌شود. زمانی که جریان متناوب از یک سیم عبور می‌کند، یک میدان مغناطیسی در دور سیم ایجاد می‌گردد. با تغییر جهت جریان متناوب، جهت میدان ایجاد شده نیز تغییر می‌کند. در این زمان **طبق قانون لنز** جریانی در جهت مخالف جریان عادی، در سیم ایجاد می‌شود تا با تغییر میدان مخالفت کند. جریان ایجاد شده در لایه‌های مرکزی سیم بیشتر و در لایه‌های بیرونی کمتر است. به شکلی که گاهی جریان خالص در مرکز سیم برابر صفر شده و در لایه‌های بیرونی یا پوسته تمرکز بیشتری پیدا می‌کند. به همین سبب به آن اثر پوستی یا Skin Effect گفته می‌شود.

✓ اثر پوستی موجب عدم یکنواختی چگالی جریان در مقطع سیم می‌گردد. هرچه فرکانس جریان بیشتر باشد، اثر پوستی بروز بیشتری یافته و جریان‌های مخالف و مکرر ایجاد شده در مرکز سیم بیشتر و بیشتر می‌شوند. به همین دلیل اثر پوستی در فرکانس‌های بالا منجر به بالا رفتن مقاومت در برابر عبور جریان می‌گردد.

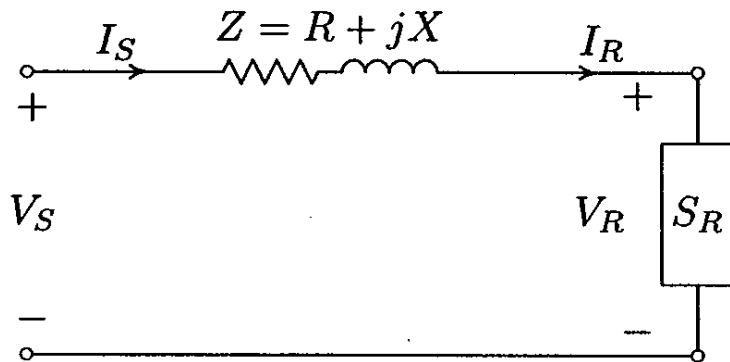
✓ برای کاهش اثر پوستی در خطوط انتقال نیرو، از باندل کردن یا گروه‌بندی خطوط استفاده می‌شود. به شکلی که به جای یک خط انتقال، از چند خط برای انتقال همان انرژی استفاده می‌گردد.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

۱- مدل خط کوتاه:

if the lines are less than about 80 km (50 miles) long, or if the voltage is not over 69 kV.



$$Z = (r + j\omega L)\ell$$

$$= R + jX$$

ℓ : طول خط

$$I_R = \frac{S_{R(3\phi)}^*}{3V_R^*}$$

جریان در انتهای خط

$$V_S = V_R + ZI_R$$

ولتاژ فاز در ابتدای خط

در مدل خط کوتاه از ظرفیت خازنی خط صرف نظر می شود. $I_S = I_R$

$$\text{Percent } V_R = \frac{|V_{R(NL)}| - |V_{R(FL)}|}{|V_{R(FL)}|} \times 100$$

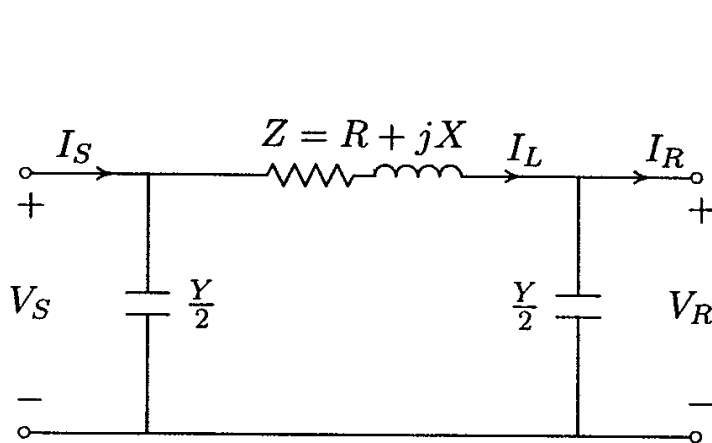
درصد تنظیم ولتاژ

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

۲- مدل خط متوسط: Lines above 80 km (50 miles) and below 250 km (150 miles)

✓ در مدل خط متوسط از ظرفیت خازنی خط صرف نظر نمی شود. نصف ظرفیت خازنی موازی به صورت **متمرکز** (فشرده) در دو طرف خط در نظر گرفته می شود. Y ادمیتانس موازی کل خط است.



مدل اسمی π برای خط متوسط

$$Y = (g + j\omega C)l$$

کنداکتانس یا رسانایی موازی، که ناشی از جریان نشتی مفره و پدیده کرونا است، که برابر صفر در نظر گرفته می شود.

$$I_S = Y \left(1 + \frac{ZY}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) I_R$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

۳- مدل خط بلند: For lines 250 km (150 miles) and longer

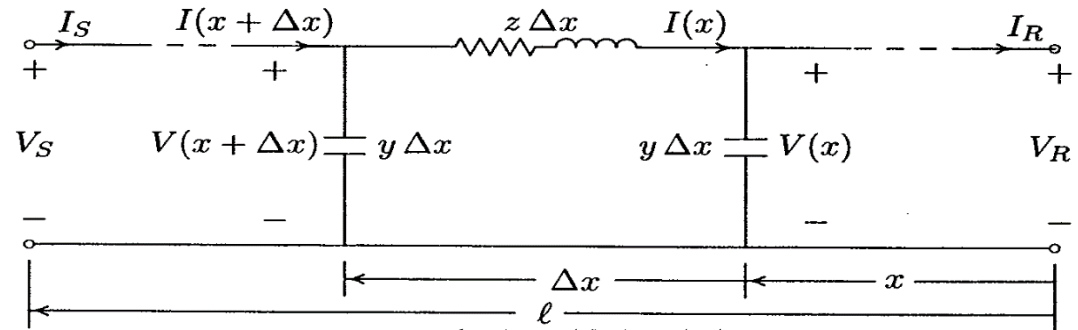
✓ در این حالت برای جواب دقیق تر در هر نقطه از خط، روابطی برای ولتاژ و جریان بدست می آید.

✓ برای مدل خط **کوتاه** و **متوسط** با فرض **متمرکز بودن پارامترهای** خط، مدل نهایی طراحی شد. اما در خطوط بلند

پارامترهای خط **فشرده** نیستند و باید اثر کامل **پارامترهای گسترده** را در نظر گرفت و روابطی را برای ولتاژ و جریان

در هر نقطه از خط به دست آورد.

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad \text{امپدانس مشخصه}$$

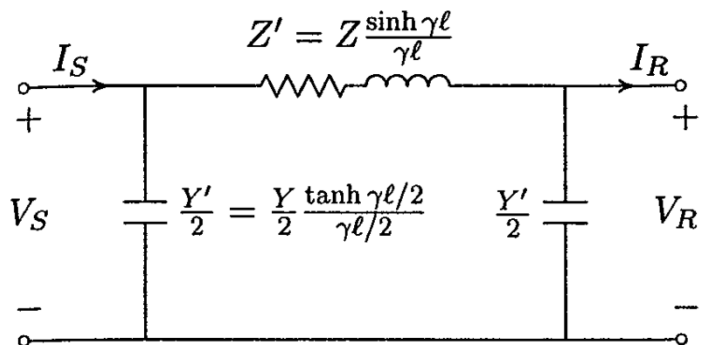


خط بلند با پارامترهای گسترده

سؤال: روابط مربوط به مدل خط بلند را با مراجعه به کتاب بررسی

سیستم های قدرت سعادت بدست آورید. مدل π مربوط به خط بلند در

شکل مقابل نشان داده شده است.



Equivalent π model for long length line.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

۳- مدل خط بلند: For lines 250 km (150 miles) and longer

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \text{ : امپدانس مشخصه}$$

با چشم پوشی از تلفات خط، امپدانس مشخصه اهمی خالص می شود و طبق رابطه زیر محاسبه می شود:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}} \text{ : امپدانس موجی}$$

سؤال: توان الکتریکی در خطوط تقریباً با سرعت نور انتقال می یابد. این موضوع را اثبات کنید. (راهنمایی: به کتاب بررسی

سیستم های قدرت هادی سعادت مراجعه شود، بخش مدل خط بلند)

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

بارگذاری امپدانس موجی:

✓ چنانچه امپدانس بار در سمت دریافت برابر امپدانس مشخصه آن خط باشد، جریان سمت دریافت برابر است با:

$$I_R = \frac{V_R}{Z_C}$$

✓ در خط بدون تلفات Z_C کاملاً اهمی است.

✓ بار مربوط به امپدانس موجی در ولتاژ نامی که بارگذاری امپدانس موجی (SIL) نامیده می شود عبارتست از:

$$SIL = \frac{(kV_{Lrated})^2}{Z_c} \text{ MW}$$

✓ در خط بدون تلفات در بارگذاری امپدانس موجی، اندازه ولتاژ و جریان در هر نقطه از خط ثابت بوده و با مقادیر متناظر

آن ها در سمت ارسال خط برابر می باشند.

✓ از آنجایی که Z_C مؤلفه راکتیو ندارد، توان راکتیوی در خط وجود ندارد و داریم:

$$Q_S = Q_R = 0 \implies \omega L |I_R|^2 = \omega C |V_R|^2 \implies Z_c = V_R / I_R = \sqrt{L/C}$$

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

بارگذاری امپدانس موجی:

✓ بارگذاری امپدانس موجی معیار مناسبی از ظرفیت خط انتقال است؛ زیرا نشان دهنده ی بارگذاری است که نیاز توان راکتیو آن کم می باشد.

براهایی که به نحو قابل توجه‌ای بیشتر از SIL هستند. ← برای حداقل کردن افت ولتاژ در خط باید از خازن های موازی استفاده نمود.

براهایی که به نحو قابل توجه‌ای کمتر از SIL هستند. ← برای برطرف کردن اضافه ولتاژ در خط باید از راکتورهای موازی استفاده نمود.

قابلیت انتقال توان:

✓ قابلیت انتقال توان یک خط به حد بارگذاری حرارتی و حد پایداری آن محدود می گردد.

✓ افزایش درجه حرارت هادی ناشی از تلفات توان حقیقی موجب افزایش طول هادی ها می شود. این موضوع افزایش شکم خطوط انتقال در بین دکل ها را به دنبال خواهد داشت.

✓ حداکثر توان انتقالی **تئوری** در $\delta=90^\circ$ به دست می آید. اما برای اطمینان از کافی بودن **حاشیه پایداری**، **در عمل** زاویه بار در حال کار بین ۳۵ درجه تا ۴۵ درجه تغییر می کند.

فصل چهارم: آشنایی با پارامترها، مدل و عملکرد خط انتقال

مدل و عملکرد خط انتقال

✓ در خطوط انتقال **بلند**، بارهای خیلی کمتر از SIL باعث افزایش ولتاژ در سمت دریافت خط شده و بارهای خیلی بیشتر از SIL موجب کاهش ولتاژ می شود. این کاهش و افزایش ولتاژ در خطوط بلند بایستی جبران شوند.

جبران سازی خط: ← **راکتورهای موازی** ← برای جبران اثرات نامطلوب ناشی از ظرفیت خازنی خط به کار می روند و مشکل اضافه ولتاژ در بارهای کم را برطرف می کنند.
راکتورها در دو طرف خط وصل می شوند. سوال: چرا؟

← **خازن موازی** ← برای بهبود تلفات توان راکتیو و جبران افت ولتاژهای ناشی از بارهای سنگین (بویژه بارهای سلفی نظیر موتورهای القایی)
معمولاً مستقیماً در شین ها وصل می شوند یا در سیم پیچ های ثالثیه ترانسفورماتور اصلی نصب می شوند.

← **خازن سری** ← به منظور افزایش قابلیت اطمینان انتقال توان، معمولاً در وسط خط قرار می گیرد و برای کاهش راکتانس سری بین بار و نقطه تغذیه به کار می روند.

← ۱- بهبود پایداری گذرا و حالت ماندگار

← ۲- اقتصادی تر شدن بارگذاری

← ۳- حداقل شدن افت ولتاژ شین ها

← ۴- افزایش حد پایداری بارگذاری خط بلند تا بیش از دو برابر

مزایا

معایب

۱- داشتن تجهیزات اضافی برای حفاظت از خازن و ایجاد کنارگذر برای آن.

۲- وجود خازن سری یک مدار رزونانس ایجاد می کند که مشکلات پدیده رزونانس زیر سنکرون را ایجاد می کند.

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش توان (پخش بار – LOAD FLOW)

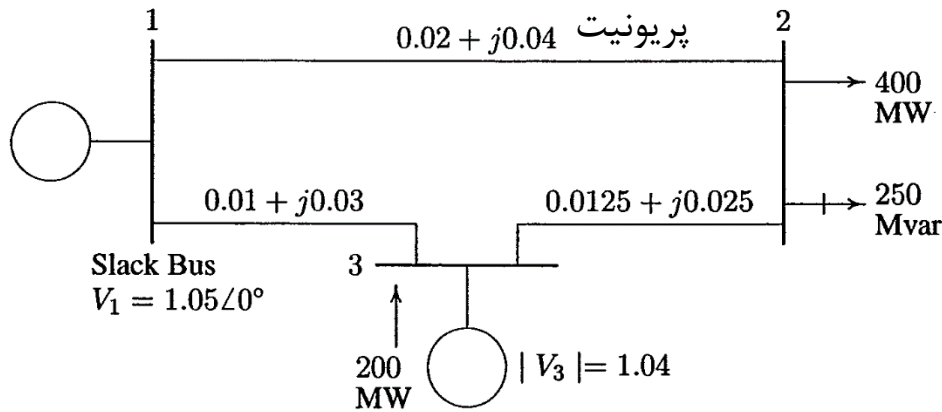
- ✓ در این فصل تجزیه و تحلیل حالت ماندگار یک سیستم قدرت مورد بحث قرار می گیرد.
- ✓ مطالعات پخش توان، پخش بار نامیده می شود.
- ✓ پخش بار شامل معادلات جبری **غیرخطی** است که بایستی توسط روش های ریاضی مناسب حل شوند.
- ✓ دو روش متداول مبتنی بر تکرار تحت عناوین **گوس-سایدل** و **نیوتن-رافسون** برای حل این معادلات استفاده می شوند.
- ✓ پخش بار بخش مهمی از تجزیه و تحلیل یک سیستم قدرت را تشکیل می دهد. مسأله شامل تعیین اندازه و زاویه ولتاژها در هر شین و توان های اکتیو و راکتیو عبوری از هر خط است.

معرفی شین های سیستم قدرت:

- ۱- **شین مرجع (شین جبران کننده) یا (شین شناور (slack bus) یا شین نوسان (Swing bus)):**
 شینی که در آن اندازه و زاویه فاز ولتاژ معلوم است.
- ۲- **شین PQ (شینهای بار):** در این شین P و Q معلوم اند و اندازه و زاویه فاز ولتاژ آنها مجهول است.
- ۳- **شین PV (شین تنظیم شده):** این شین ها شینهای دارای ژنراتور می باشند. P و اندازه ولتاژ در آنها معلوم است.
 زاویه فاز ولتاژها و Q ها باید محاسبه شوند.

نکته: در هر شین دو متغیر مجهول وجود دارد.

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار



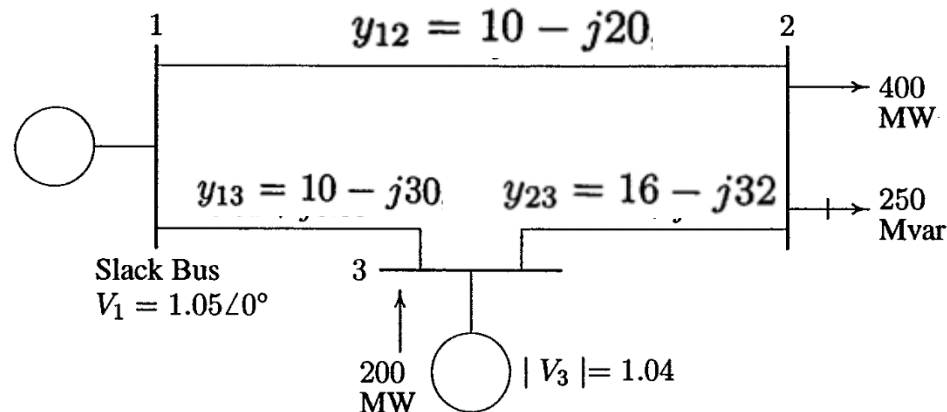
مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

توجه: مقادیر بدست آمده در این مثال بر اساس کتاب زبان اصلی بررسی سیستم قدرت هادی سعادت است.

$$y_{12} = \frac{1}{0.02 + j0.04} = 10 - j20$$

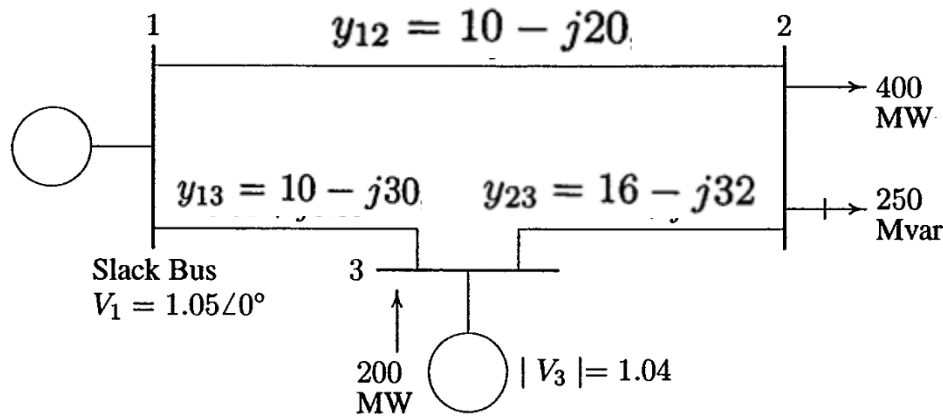
حل: امپدانس خطوط را به ادمیتانس تبدیل می کنیم:

$$y_{12} = 10 - j20, y_{13} = 10 - j30, \text{ and } y_{23} = 16 - j32$$



فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

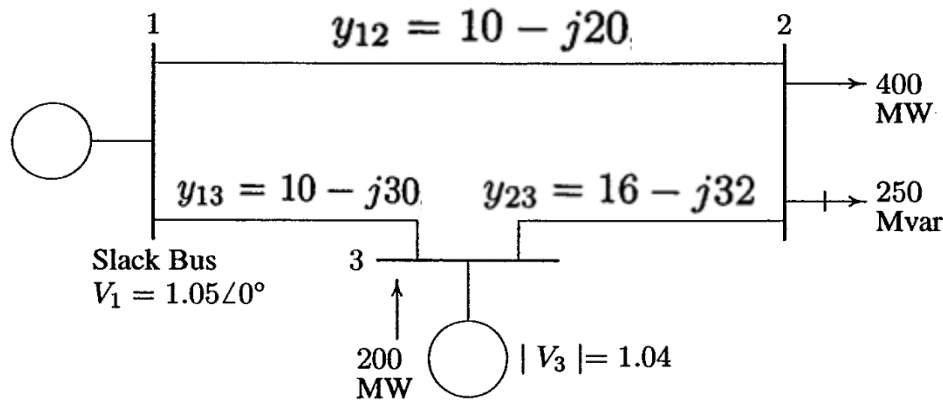
حل: حال ماتریس امیدانس خطوط را بر حسب ادمیتانس می نویسیم:

عناصر قطر اصلی ماتریس: $Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij}$ $j \neq i$ عناصر غیر قطری (ادمیتانس متقابل با انتقالی): $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

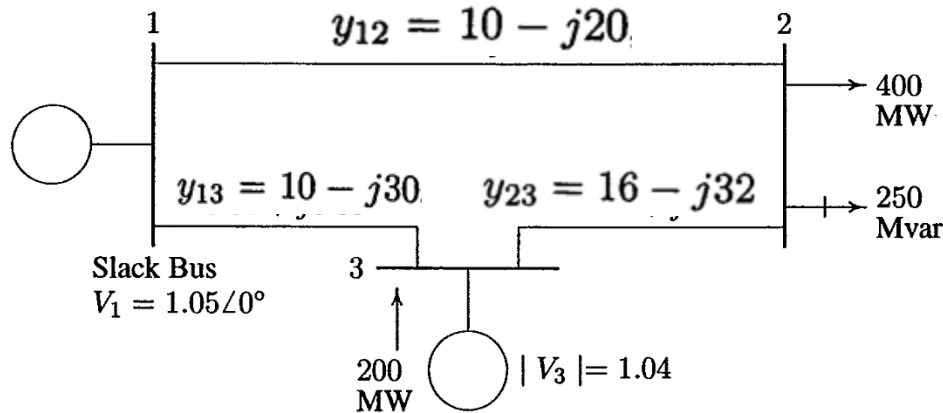
حل: حال ماتریس امیدانس خطوط را بر حسب ادمیتانس می نویسیم:

عناصر قطر اصلی ماتریس: $Y_{ii} = \sum_{j=0}^n y_{ij}$ $j \neq i$ عناصر غیر قطری (ادمیتانس متقابل با انتقالی): $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

جلسه سیزدهم

پریونیت



فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

حل: حال ماتریس امیدانس خطوط را به صورت قطبی می نویسیم:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} 20 - j50 & -10 + j20 & -10 + j30 \\ -10 + j20 & 26 - j52 & -16 + j32 \\ -10 + j30 & -16 + j32 & 26 - j62 \end{bmatrix}$$

$$\Rightarrow Y_{bus} = \begin{bmatrix} 53.85165\angle-1.19029 & 22.36068\angle-1.1071 & 31.62278\angle-1.2490 \\ 22.36068\angle-1.1071 & 58.13777\angle-1.1071 & 35.77709\angle-1.1071 \\ 31.62278\angle-1.2490 & 35.77709\angle-1.1071 & 67.23095\angle-1.1737 \end{bmatrix}$$

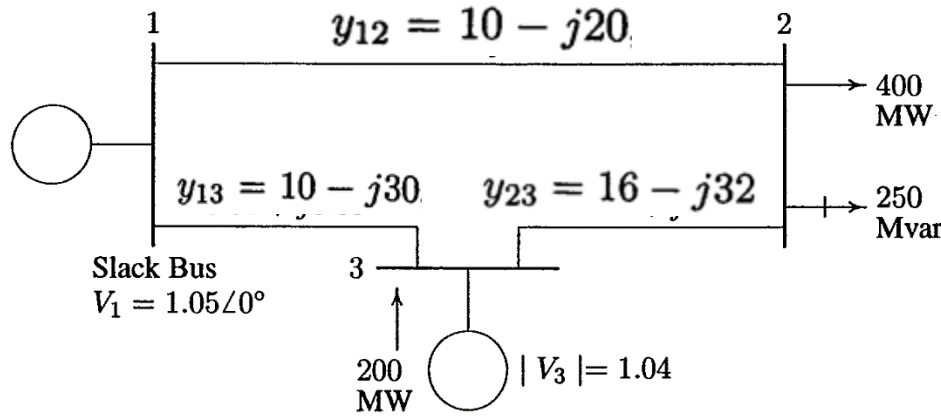
طبق دو معادله روبرو روابط زیر را برای توان اکتیو شین های

۲ و ۳ و توان راکتیو شین ۲ بدست می آوریم:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \end{cases}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

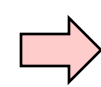
➤ طبق دو معادله روبرو روابط زیر را برای توان اکتیو شین های ۲ و ۳ و توان راکتیو شین ۲ بدست می آوریم:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \end{cases}$$

$$P_2 = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2^2||Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

$$P_3 = |V_3||V_1||Y_{31}| \cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3^2||Y_{33}| \cos \theta_{33}$$

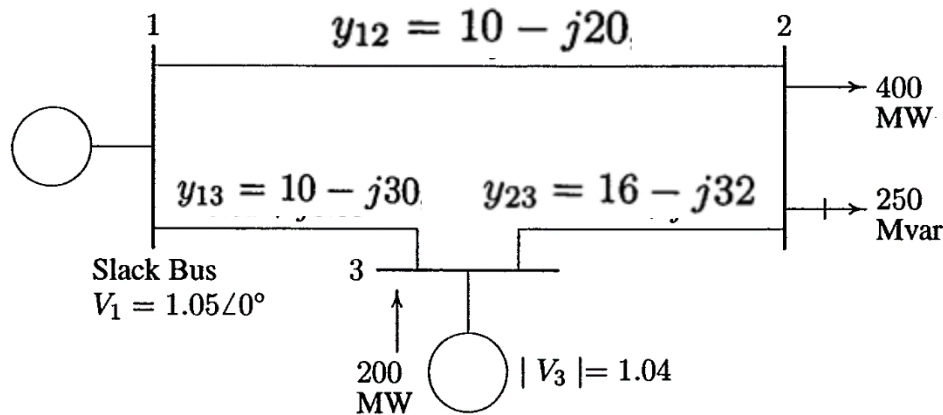
$$Q_2 = -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2^2||Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$



با مشتق گیری از این معادلات عناصر ماتریس ژاکوبین تعیین می شوند.

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



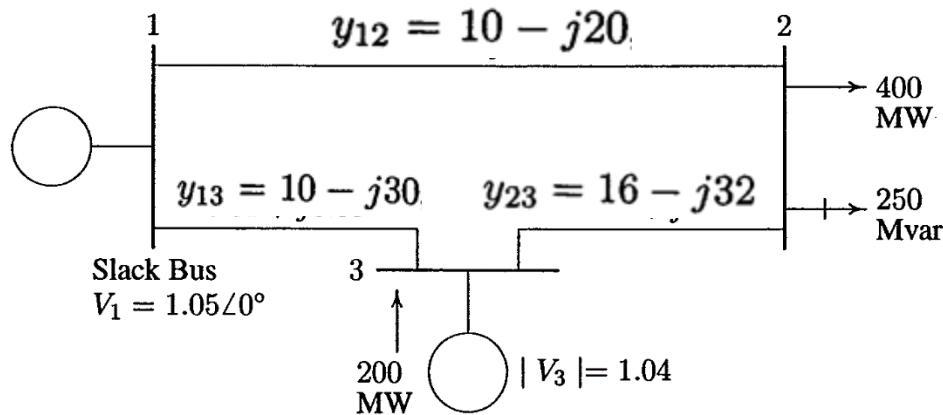
مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \right. & \dots & \left| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \right. \\ \vdots & \mathbf{J}_1 & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} \right. & \dots & \left| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \right. \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \right. & \dots & \left| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \right. \\ \vdots & \mathbf{J}_3 & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} \right. & \dots & \left| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right. \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

➤ در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

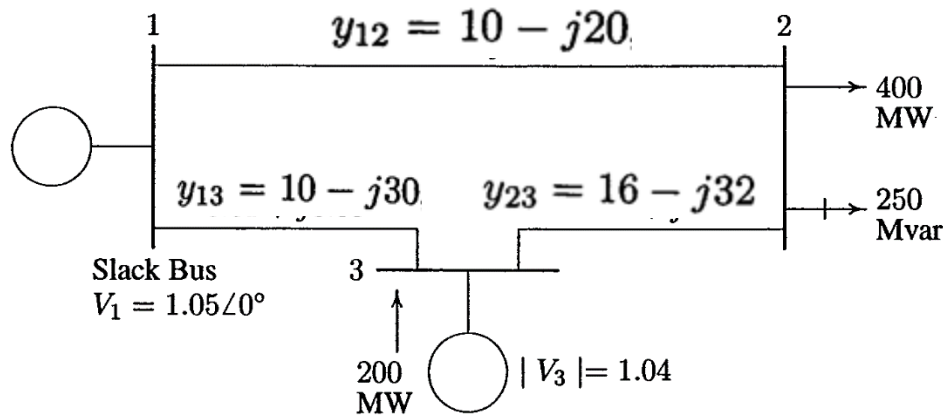
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \mathbf{J} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \end{cases}$$

مشتق می گیریم

$$P_2 = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2|^2|Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

➤ در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

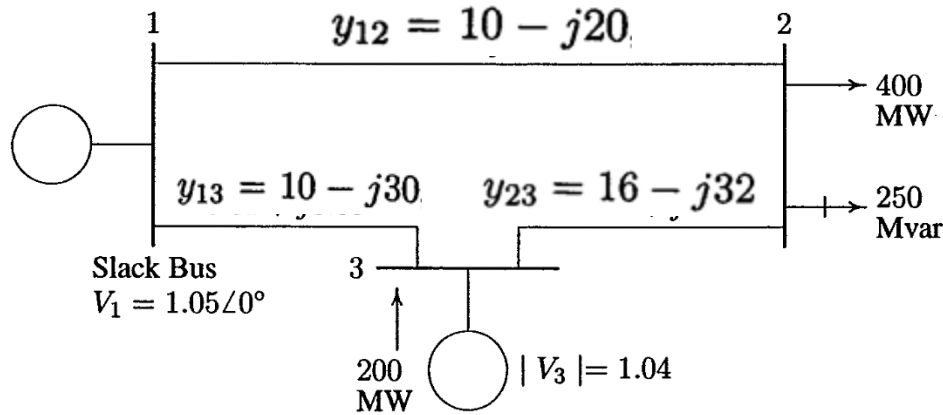
$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & \mathbf{J} & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} = -|V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} = |V_3||V_1||Y_{31}| \sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) \end{cases}$$

مشتق می گیریم

$$P_3 = |V_3||V_1||Y_{31}| \cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3||V_2||Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3|^2|Y_{33}| \cos \theta_{33}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

$$\begin{array}{ccc}
 \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\
 \vdots & & \vdots \\
 \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|}
 \end{array}
 \mathbf{J}_2$$

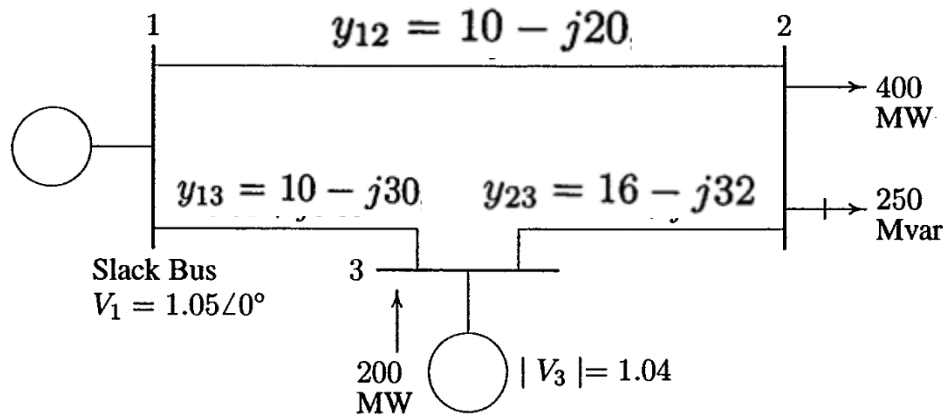
$$\frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} = |V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + 2|V_2||Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

مشتق می گیریم

$$P_2 = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2^2||Y_{22}| \cos \theta_{22} + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

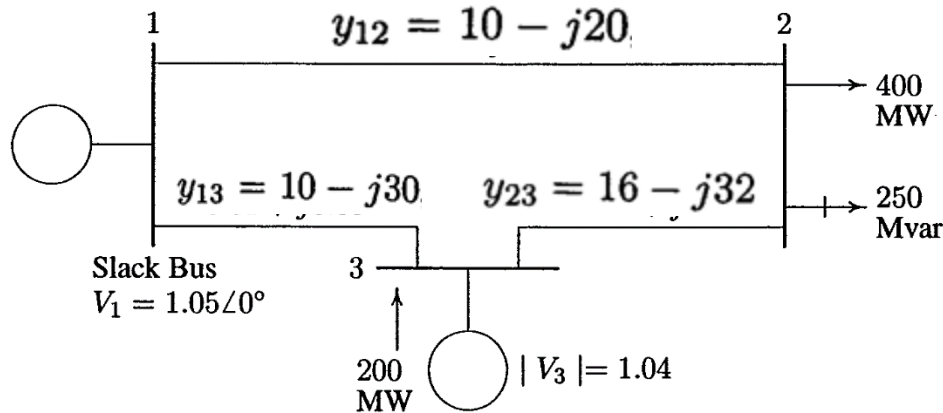
$$\begin{matrix} \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \end{matrix} \mathbf{J}_2 \rightarrow \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} = |V_3| |Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2)$$

مشتق می گیریم

$$P_3 = |V_3| |V_1| |Y_{31}| \cos(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) + |V_3| |V_2| |Y_{32}| \cos(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) + |V_3|^2 |Y_{33}| \cos \theta_{33}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

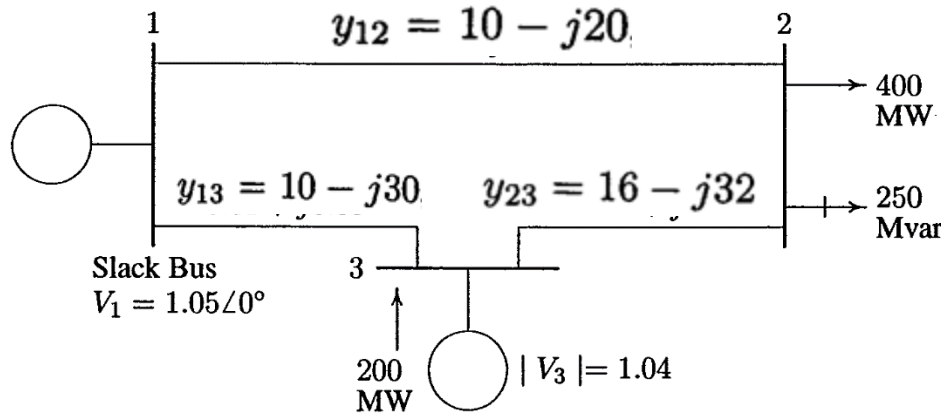
$$\begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} \\ \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} \end{matrix} \mathbf{J}_3 \rightarrow \begin{cases} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} = |V_2||V_1||Y_{21}| \cos(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) + |V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} = -|V_2||V_3||Y_{23}| \cos(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3) \end{cases}$$

مشتق می گیریم

$$Q_2 = -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2|^2||Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید.

➤ در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

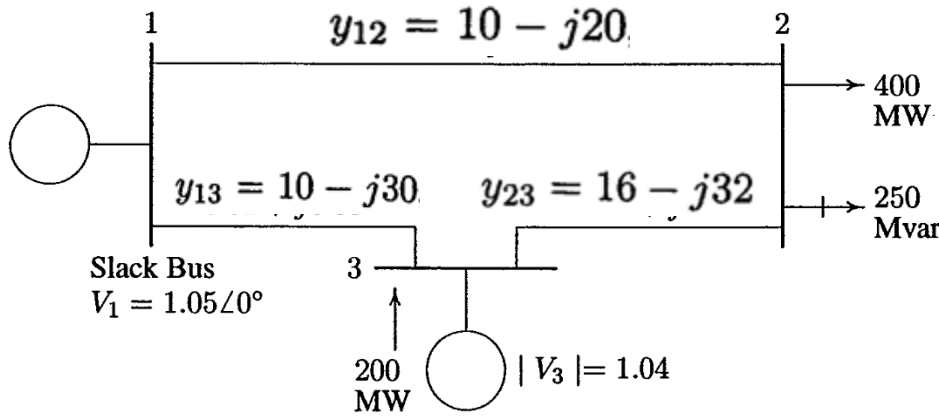
$$\begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \\ \vdots & \mathbf{J} & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \end{matrix} \rightarrow \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} = -|V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - 2|V_2||Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

مشتق می گیریم

$$Q_2 = -|V_2||V_1||Y_{21}| \sin(\theta_{21} - \delta_2 + \delta_1) - |V_2^2||Y_{22}| \sin \theta_{22} - |V_2||V_3||Y_{23}| \sin(\theta_{23} - \delta_2 + \delta_3)$$

جلسه چهاردهم

پریونیت



فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است).

➤ در روش نیوتن - رافسون باید ماتریس زیر را که به ماتریس ژاکوبین معروف است، تشکیل دهیم:

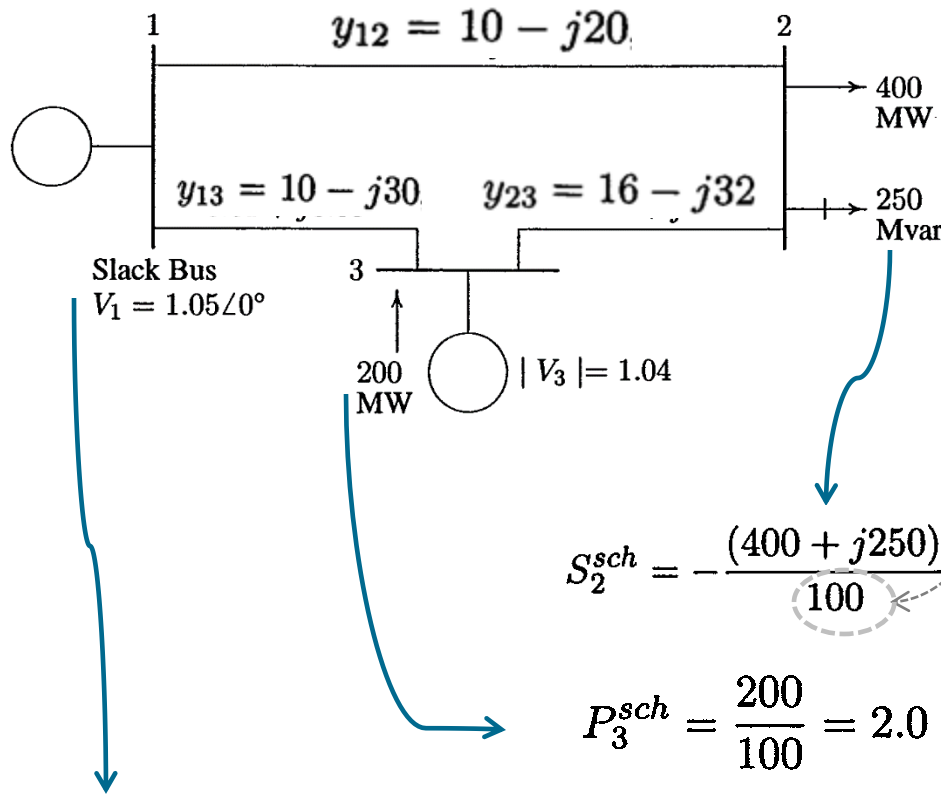
تعیین شد.

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta P_n^{(k)} \\ \hline \Delta Q_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta Q_n^{(k)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial P_2}{\partial |V_n|} \right| \\ \vdots & \mathbf{J}_1 & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_2 & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial P_n}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial P_n}{\partial |V_n|} \right| \\ \hline \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial Q_2}{\partial |V_n|} \right| \\ \vdots & \mathbf{J}_3 & \vdots & \vdots & \mathbf{J}_4 & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \delta_n} & \left| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_2|} \right| & \dots & \left| \frac{\partial Q_n}{\partial |V_n|} \right| \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta \delta_n^{(k)} \\ \hline \Delta |V_2^{(k)}| \\ \vdots \\ \Delta |V_n^{(k)}| \end{bmatrix}$$

باید تعیین شود.

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است).

$$S_2^{sch} = -\frac{(400 + j250)}{100} = -4.0 - j2.5 \text{ pu} \quad \text{مقدار بار بر حسب پریونیت:}$$

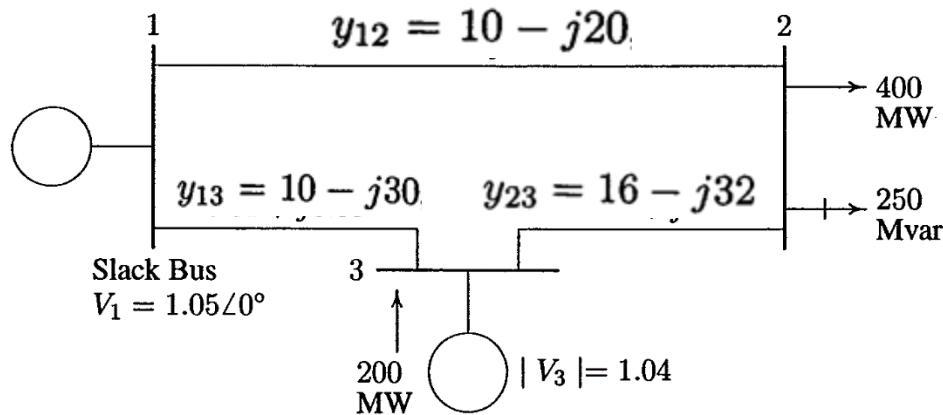
$$P_3^{sch} = \frac{200}{100} = 2.0 \text{ pu} \quad \text{مقدار تولید بر حسب پریونیت:}$$

The slack bus voltage is $V_1 = 1.05\angle 0$ pu, and the bus 3 voltage magnitude is $|V_3| = 1.04$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_2^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, and $\delta_3^{(0)} = 0.0$, the power residuals are computed

$$\begin{cases} \Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \end{cases}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

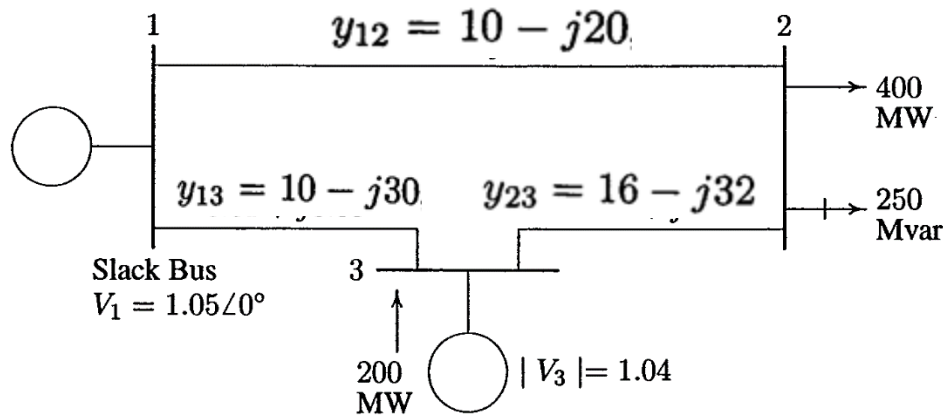
The slack bus voltage is $V_1 = 1.05\angle 0$ pu, and the bus 3 voltage magnitude is $|V_3| = 1.04$ pu. Starting with an initial estimate of $|V_2^{(0)}| = 1.0$, $\delta_2^{(0)} = 0.0$, and $\delta_3^{(0)} = 0.0$, the power residuals are computed

$$\begin{cases} \Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -4.0 - (-1.14) = -2.8600 \\ \Delta P_3^{(0)} = P_3^{sch} - P_3^{(0)} = 2.0 - (0.5616) = 1.4384 \\ \Delta Q_2^{(0)} = Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -2.5 - (-2.28) = -0.2200 \end{cases}$$

➤ حال عناصر ماتریس ژاکوبین را محاسبه می کنیم:

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

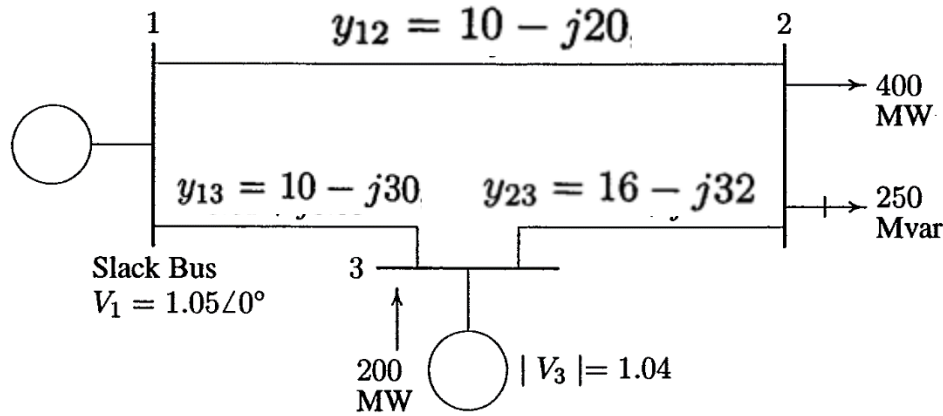
$$\begin{cases} \Delta P_i^{(k)} = P_i^{sch} - P_i^{(k)} \\ \Delta Q_i^{(k)} = Q_i^{sch} - Q_i^{(k)} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \Delta P_2^{(0)} = P_2^{sch} - P_2^{(0)} = -4.0 - (-1.14) = -2.8600 \\ \Delta P_3^{(0)} = P_3^{sch} - P_3^{(0)} = 2.0 - (0.5616) = 1.4384 \\ \Delta Q_2^{(0)} = Q_2^{sch} - Q_2^{(0)} = -2.5 - (-2.28) = -0.2200 \end{cases}$$

➤ حال عناصر ماتریس ژاکوبین را محاسبه می کنیم:

$$\begin{bmatrix} -2.8600 \\ 1.4384 \\ -0.2200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54.28000 & -33.28000 & 24.86000 \\ -33.28000 & 66.04000 & -16.64000 \\ -27.14000 & 16.64000 & 49.72000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

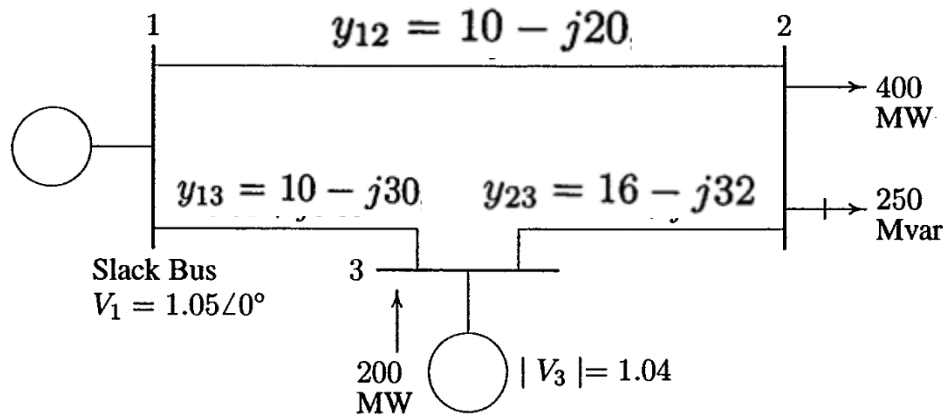
$$\begin{bmatrix} -2.8600 \\ 1.4384 \\ -0.2200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54.28000 & -33.28000 & 24.86000 \\ -33.28000 & 66.04000 & -16.64000 \\ -27.14000 & 16.64000 & 49.72000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(0)} \\ \Delta\delta_3^{(0)} \\ \Delta|V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

با حل معادله ماتریسی فوق، ولتاژ جدید شین ها در تکرار اول بصورت زیر بدست می آیند:

$$\begin{aligned} \Delta\delta_2^{(0)} &= -0.045263 & \delta_2^{(1)} &= 0 + (-0.045263) = -0.045263 \\ \Delta\delta_3^{(0)} &= -0.007718 & \delta_3^{(1)} &= 0 + (-0.007718) = -0.007718 \\ \Delta|V_2^{(0)}| &= -0.026548 & |V_2^{(1)}| &= 1 + (-0.026548) = 0.97345 \end{aligned}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

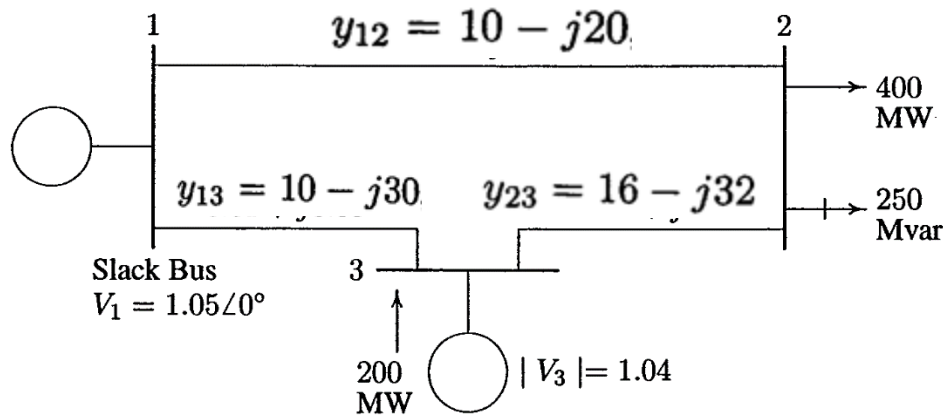
$$\begin{bmatrix} -2.8600 \\ 1.4384 \\ -0.2200 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 54.28000 & -33.28000 & 24.86000 \\ -33.28000 & 66.04000 & -16.64000 \\ -27.14000 & 16.64000 & 49.72000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(0)} \\ \Delta \delta_3^{(0)} \\ \Delta |V_2^{(0)}| \end{bmatrix}$$

در تکرار دوم داریم: ➤

$$\begin{bmatrix} -0.099218 \\ 0.021715 \\ -0.050914 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51.724675 & -31.765618 & 21.302567 \\ -32.981642 & 65.656383 & -15.379086 \\ -28.538577 & 17.402838 & 48.103589 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2^{(1)} \\ \Delta \delta_3^{(1)} \\ \Delta |V_2^{(1)}| \end{bmatrix}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم

قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است.

پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون

حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت

در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است.)

$$\Delta\delta_2^{(1)} = -0.001795$$

$$\delta_2^{(2)} = -0.045263 + (-0.001795) = -0.04706$$

$$\Delta\delta_3^{(1)} = -0.000985$$

$$\delta_3^{(2)} = -0.007718 + (-0.000985) = -0.00870$$

$$\Delta|V_2^{(1)}| = -0.001767$$

$$|V_2^{(2)}| = 0.973451 + (-0.001767) = 0.971684$$

در تکرار سوم داریم:



$$\begin{bmatrix} -0.000216 \\ 0.000038 \\ -0.000143 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 51.596701 & -31.693866 & 21.147447 \\ -32.933865 & 65.597585 & -15.351628 \\ -28.548205 & 17.396932 & 47.954870 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\delta_2^{(2)} \\ \Delta\delta_3^{(2)} \\ \Delta|V_2^{(2)}| \end{bmatrix}$$

$$\Delta\delta_2^{(2)} = -0.000038$$

$$\delta_2^{(3)} = -0.047058 + (-0.0000038) = -0.04706$$

$$\Delta\delta_3^{(2)} = -0.0000024$$

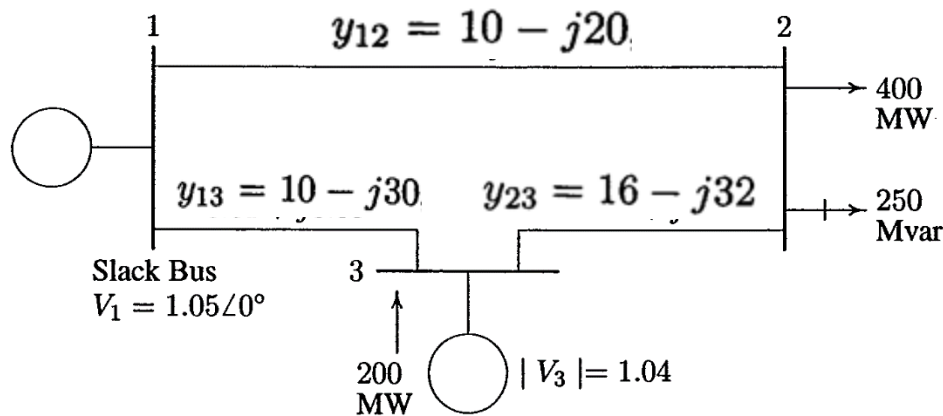
$$\delta_3^{(3)} = -0.008703 + (-0.0000024) = -0.008705$$

$$\Delta|V_2^{(2)}| = -0.0000044$$

$$|V_2^{(3)}| = 0.971684 + (-0.0000044) = 0.97168$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است).

➤ در تکرار سوم همگرایی مطلوبی حاصل شد.

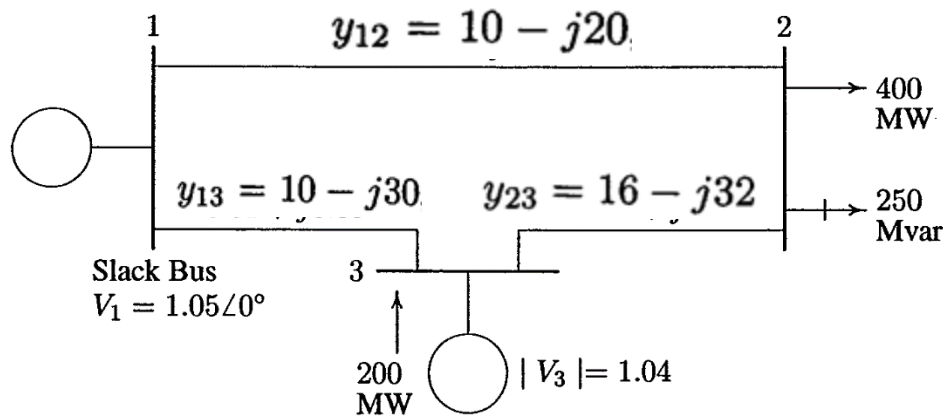
$$\begin{aligned} \Delta \delta_2^{(2)} &= -0.000038 & \delta_2^{(3)} &= -0.047058 + (-0.0000038) = -0.04706 \\ \Delta \delta_3^{(2)} &= -0.0000024 & \delta_3^{(3)} &= -0.008703 + (-0.0000024) = -0.008705 \\ \Delta |V_2^{(2)}| &= -0.0000044 & |V_2^{(3)}| &= 0.971684 + (-0.0000044) = 0.97168 \end{aligned}$$

➤ حال توان راکتیو شین ۳ و توان های اکتیو و راکتیو شین مرجع را حساب می کنیم:

$$\begin{cases} P_i = \sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \\ Q_i = -\sum_{j=1}^n |V_i||V_j||Y_{ij}| \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q_3 = -|V_3||V_1||Y_{31}| \sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) - |V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) - |V_3|^2|Y_{33}| \sin \theta_{33} \\ P_1 = |V_1|^2|Y_{11}| \cos \theta_{11} + |V_1||V_2||Y_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + |V_1||V_3||Y_{13}| \cos(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \\ Q_1 = -|V_1|^2|Y_{11}| \sin \theta_{11} - |V_1||V_2||Y_{12}| \sin(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) - |V_1||V_3||Y_{13}| \sin(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \end{cases}$$

فصل پنجم: تجزیه و تحلیل پخش بار

پریونیت



مثال: در شکل مقابل نمایش تک خطی یک سیستم قدرت ساده با سه شین نشان داده شده است. پخش بار را با استفاده از روش نیوتن رافسون حل کنید. (امپدانس خطوط بر حسب پریونیت در مبنای ۱۰۰ MVA مشخص شده است).

➤ با جایگذاری مقادیر بدست آمده داریم:

$$\begin{cases} Q_3 = -|V_3||V_1||Y_{31}| \sin(\theta_{31} - \delta_3 + \delta_1) - |V_3||V_2||Y_{32}| \sin(\theta_{32} - \delta_3 + \delta_2) - |V_3|^2|Y_{33}| \sin \theta_{33} \\ P_1 = |V_1|^2|Y_{11}| \cos \theta_{11} + |V_1||V_2||Y_{12}| \cos(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) + |V_1||V_3| |Y_{13}| \cos(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \\ Q_1 = -|V_1|^2|Y_{11}| \sin \theta_{11} - |V_1||V_2||Y_{12}| \sin(\theta_{12} - \delta_1 + \delta_2) - |V_1||V_3| |Y_{13}| \sin(\theta_{13} - \delta_1 + \delta_3) \end{cases} \quad \begin{cases} Q_3 = 1.4617 \text{ pu} \\ P_1 = 2.1842 \text{ pu} \\ Q_1 = 1.4085 \text{ pu} \end{cases}$$

تمرین تحویلی: در مثال فوق شین ۳ و خطوط متصل به آن را حذف کرده و مساله را مجدداً حل نمایید.

نکته: حل پخش بار با استفاده از روش مجزای سریع: در این روش عناصر J2 و J3 از ماتریس ژاکوبین برابر صفر قرار