

تهیه دو فصل (دوم و نهم) توسط

حسن کرامت‌لو دانشجوی دانشگاه آزاد واحد علی آباد

استان گلستان

فصل دوم

مدل سازی سیستم‌های قدرت

۱-۲ مقدمه

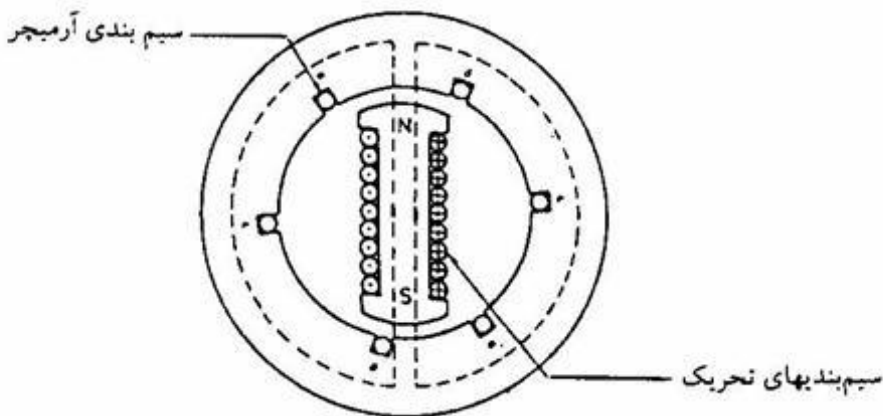
برای بررسی و مطالعه یک سیستم قدرت لازم است مدار معادل آنرا بدست آوریم. سیستم قدرت از اجزاء مختلفی مانند ژنراتورها، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال، بارها و ... تشکیل شده است. برای تعیین مدار معادل کل سیستم، باید مدل هر یک از این عناصر را بدست آورد. مدل خطوط انتقال انرژی در درس بررسی سیستم‌های قدرت ۱ مورد مطالعه قرار گرفت. این مدل شامل مدار اسمی π (برای خطوط متوسط) و مدار معادل π (برای خطوط بلند) می‌باشد.

در این فصل مدل ژنراتور، ترانسفورماتور، و تا حدودی مدل بار مورد مطالعه قرار می‌گیرد. بررسی مدل بار در شرایط مختلف نیاز به مطالعات دقیق‌تری دارد که از بحث این کتاب خارج است. از بهم پیوستن مدل اجزاء مختلف یک سیستم، مدار معادل سیستم قدرت بدست می‌آید که به "دیاگرام امپدانس" ^(۱) موسوم است. در این فصل همچنین مقادیر "نسبت به واحد" ^(۲) معرفی می‌گردند و خواهیم دید که با استفاده از این مقادیر، تجزیه و تحلیل سیستم‌ها بسیار ساده‌تر و ملموس‌تر می‌شود. استفاده از روش پریونیت (نسبت به واحد) در تعیین دیاگرام امپدانس نقش مهمی را ایفا می‌کند که به آن خواهیم پرداخت و در نهایت مدار معادل بدست آمده برای سیستم قدرت آماده بهره‌برداری در محاسبات و مطالعات مختلف شبکه خواهد بود.

۲-۲ ماشین سنکرون ^(۳)

یکی از مهمترین قسمت‌های یک سیستم قدرت ماشینهای سنکرون هستند. ژنراتورهای

سنکرون در نیروگاهها وظیفه تولید قدرت را بهعهده دارند. در حال حاضر قدرت نامی ژنراتورها حدود چند صد مگاوات آمپر می باشد و در محل نیروگاهها اغلب چند ژنراتور سنکرون بصورت موازی انرژی الکتریکی برای شبکه تولید می نمایند. کار ژنراتور سنکرون مانند دیگر ماشینهای الکتریکی براساس قانون الکترومغناطیسی فاراده بنا شده است. کلمه سنکرون به این علت بکار میرود که ماشین تحت شرایط ماندگار^(۱) در سرعت و فرکانس ثابتی کار می کند. ماشینهای سنکرون بصورت موتور نیز می توانند طراحی و مورد بهره برداری قرار گیرند که در اینصورت از شبکه انرژی الکتریکی دریافت و آنرا به انرژی مکانیکی تبدیل می نمایند. مدل ماشین سنکرون در شرایط مختلف کار متفاوت است و در شرایط گذرا و دینامیک پیچیده تر می باشد. مطالعه ما در این فصل فقط به مدل ماشین در شرایط کار ماندگار تحت بار سه فاز متقارن محدود می شود. در شکل (۱-۲) شمای یک ژنراتور سنکرون دو قطبی نشان داده شده است. استاتور^(۲) این ماشین دارای سیم بندی های آرمیچر^(۳) سه فاز aa' ، bb' ، cc' می باشد. سیم بندی تحریک^(۴) نیز روی رتور^(۵) نمایش داده شده است. این سیم بندی با جریان مستقیم تحریک می شود. منبع تولید جریان مستقیم در بسیاری از موارد با ژنراتور سنکرون هم محور است. قطب های رتور معمولاً طوری طراحی می شوند که توزیع چگالی شار مغناطیسی^(۶) در فاصله هوایی^(۷) تقریباً بصورت سینوسی می باشد.



شکل ۱-۲: نمایش یک ماشین سنکرون دو قطبی

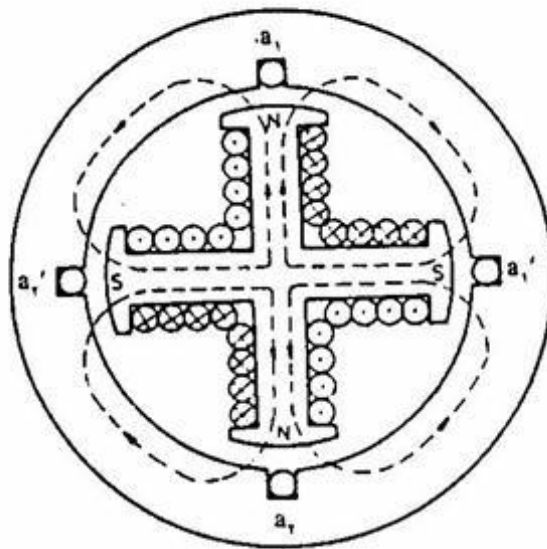
- | | | |
|-----------------|----------|--------------------|
| 1-Steady State | 2-Stator | 3-Armature Winding |
| 4-Field Winding | 5-Rotor | 6-Magnetic Flux |
| 7-Air Gap | | |

بر اثر عبور جریان مستقیم از سیم‌بندیهای تحریک، قطب‌های N و S در رتور ایجاد می‌شود. رتور تحریک شده با سرعت ثابتی بگردش درمی‌آید و در سیم‌بندیهای سه فاز استاتور نیروی محرکه الکتریکی القاء می‌کند. تغییرات ولتاژ القاء شده در این سیم‌بندیها نسبت به زمان سینوسی است و فرکانس آن برحسب سیکل بر ثانیه (هرتز) با سرعت گردش رتور در ثانیه برابر است. بنابراین برای ایجاد ولتاژی با فرکانس ۵۰ هرتز در استاتور، سرعت گردش رتور دو قطبی باید ۳۰۰۰ دور در دقیقه باشد.

شکل (۲-۲) یک ماشین سنکرون با چهار قطب را نشان می‌دهد. در این شکل فقط فاز a شامل سیم‌بندیهای a_1, a_1' و a_2, a_2' نمایش داده شده‌است. در این حالت برای دستیابی به ولتاژی با فرکانس ۵۰ هرتز در استاتور، سرعت گردش رتور باید ۱۵۰۰ دور در دقیقه باشد. به این ترتیب برای یک ماشین سنکرون که تعداد قطب‌ها در آن P باشد خواهیم داشت:

$$f = \frac{P}{2} \frac{n}{60} \quad \text{HZ} \quad (2-1)$$

که در آن f فرکانس ماشین سنکرون برحسب هرتز و n تعداد دور رتور در دقیقه می‌باشد.



شکل ۲-۲: ماشین سنکرون چهار قطبی

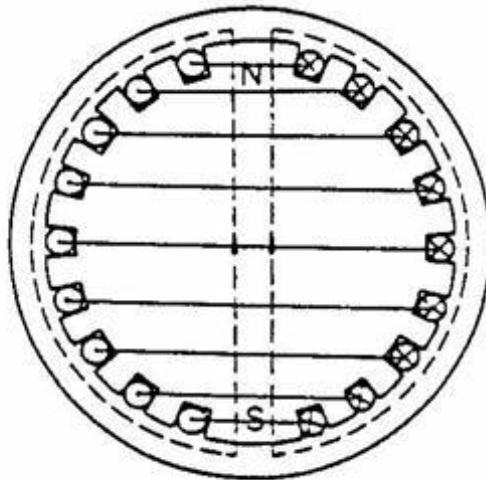
در ماشین دو قطبی اگر رتور ۳۶۰ درجه دوران کند یک سیکل کامل برای ولتاژ القاء شده حاصل می‌شود که معادل ۳۶۰ درجه الکتریکی است، و اگر رتور دارای چهار قطب باشد به ازاء ۱۸۰ درجه دوران رتور یک سیکل کامل ایجاد می‌شود. بنابراین این رابطه زیر را می‌توان برای زاویه

الکتريکی ماشين نوشت:

$$\theta_e = \frac{P}{\gamma} \theta_m \quad (2-2)$$

در اين رابطه θ_e زاويه الکتريکی مربوط به ولتاژ القاء شده در استاتور، θ_m زاويه مکانیکی مربوط به موقعیت رتور و P تعداد قطب‌های رتور می‌باشد.

ماشين‌های مورد بحث در شکل‌های (۲-۱) و (۲-۲) ماشين‌های با قطب برجسته (۱) نامیده می‌شوند. در هیدروژنراتورها (نیروگاه‌های آبی) از اين نوع ماشينها استفاده می‌شود، زیرا سرعت توربین‌های آبی نسبتاً کم بوده و تعداد قطب‌های زیادی برای تولید ولتاژ با فرکانس ۵۰ هرتز مورد نیاز است. نوع دیگری از رتور که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است به رتور استوانه‌ای (۲) یا صاف موسوم است. در توربوژنراتورها (توربین‌های بخار یا گاز) که سرعت بسیار زیادی دارند از ماشين‌های سنکرون با قطب صاف استفاده می‌شود.



شکل ۲-۳: ماشين سنکرون با رتور صاف یا استوانه‌ای

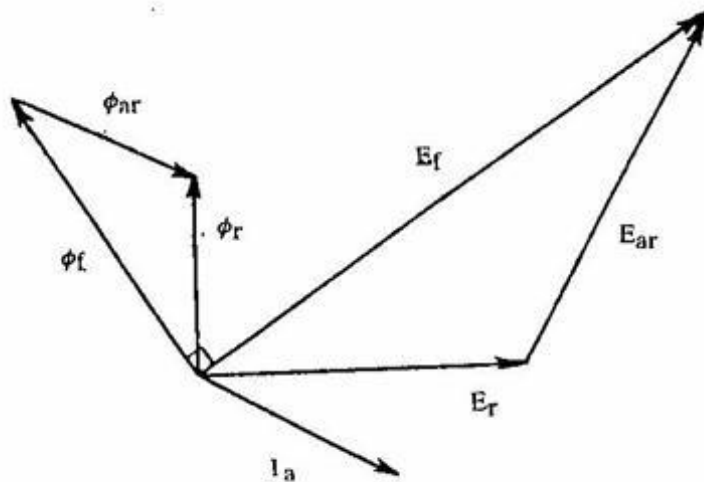
۲-۳ مدار معادل ماشين سنکرون

هنگامی که ماشين سنکرون بی‌بار است و جریانی از آرمیچر (استاتور) نمی‌گذرد، شار

1-Salient Poles

2-Cylindrical Rotor (Nonsalient Pole)

مغناطیسی رتور Φ_r و لتاژ E_r را در فاز a ایجاد می‌کند که با Φ_r متناسب بوده و 90° درجه از آن عقب‌تر است. اگر از استاتور جریان I_a عبور کند، شار مغناطیسی دوار Φ_{ar} بوجود می‌آید که با سرعتی معادل سرعت رتور و هم جهت با آن دوران می‌کند. این شار مغناطیسی که به شار عکس‌العمل آرمیچر^(۱) معروف است با جریان آرمیچر هم‌فاز می‌باشد. چنانچه از اثر اشباع^(۲) طرف‌نظر کنیم، از مجموع Φ_r و Φ_{ar} شار مغناطیسی حاصل در فاصله هوایی^(۳) Φ_f بدست می‌آید که و لتاژ E_r را در فاز a بوجود می‌آورد. این و لتاژ با شار تولید‌کننده آن متناسب است. دیاگرام برداری مربوط به فاز a در شکل (۲-۴) نشان داده شده‌است. و لتاژهای E_r و E_{ar} از شارهای مغناطیسی Φ_r و Φ_{ar} که آنها را بوجود آورده‌اند به اندازه 90° درجه عقب‌تر هستند.



شکل ۲-۴: دیاگرام برداری شارهای مغناطیسی و و لتاژهای حاصله

با توجه به تشابه مثلث شارهای مغناطیسی و مثلث و لتاژها در شکل (۲-۴)، و لتاژ E_{ar} نیز با Φ_{ar} متناسب بوده و 90° درجه از آن عقب‌تر است و چون Φ_{ar} هم‌فاز با I_a و متناسب با آن است، داریم:

$$E_{ar} = -j I_a X_\phi \quad (2-3)$$

X_ϕ که ضریب تناسب و لتاژ E_{ar} و جریان I_a می‌باشد تأثیر عکس‌العمل آرمیچر را نشان می‌دهد

و به راکتانس مغناطیس کننده^(۱) ماشین موسوم است.
با توجه به دیاگرام برداری شکل (۲-۴) داریم:

$$E_r = E_f + E_{ar} = E_f - jI_a X_\phi \quad (2-4)$$

که در آن E_r ولتاژ القاء شده در فاز a بر اثر شار مغناطیسی فاصله هوا می باشد. ولتاژ ترمینالهای ژنراتور V_t از اختلاف ولتاژ E_r با افت ولتاژ در مقاومت آرمیچر R_a و راکتانس پراکندگی^(۲) X_L بدست می آید. راکتانس پراکندگی X_L تأثیر شار پراکندگی (نشستی) آرمیچر را که توسط I_a بوجود آمده است نشان می دهد. بنابراین:

$$V_t = E_r - R_a I_a - j I_a X_L \quad (2-5)$$

چنانچه E_r از رابطه (۲-۴) را در معادله (۲-۵) جایگزین کنیم داریم:

$$V_t = E_f - jI_a (X_\phi + X_L) - R_a I_a \quad (2-6)$$

و یا:

$$V_t = E_f - I_a (R_a + jX_s) = E_f - I_a Z_s \quad (2-7)$$

در رابطه اخیر X_s و Z_s بترتیب راکتانس سنکرون^(۳) و امپدانس سنکرون نامیده می شوند و طبق روابط زیر تعریف می شوند:

$$X_s = X_\phi + X_L \quad (2-8)$$

$$Z_s = R_a + jX_s \quad (2-9)$$

مدل یک ژنراتور سنکرون را براساس (۲-۷) می توان طبق شکل (۲-۵) نشان داد. مقاومت آرمیچر R_a در مقایسه با X_s بسیار کوچک و قابل صرف نظر می باشد، لذا مدار معادل را می توان مطابق شکل (۲-۶) نمایش داد. در اغلب سیستمها از این به بعد از همین مدل برای ژنراتور سنکرون استفاده خواهیم کرد.

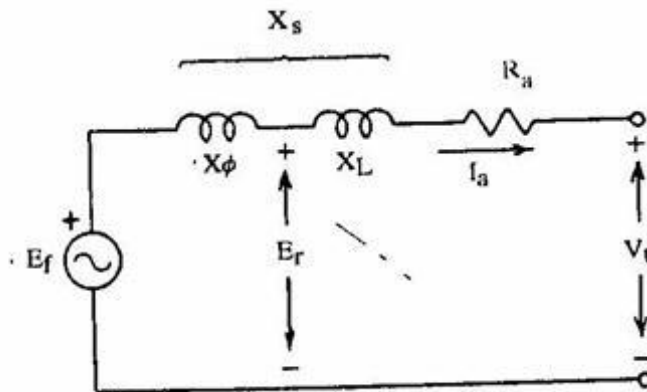
1-Magnetizing Reactance

2-Leakage Reactance

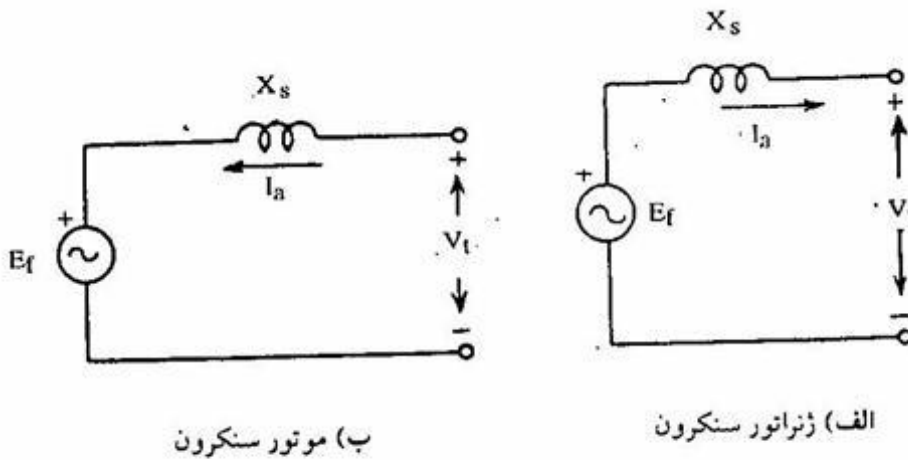
3-Synchronous Reactance

مدار معادل موتور سنکرون نیز مشابه ژنراتور سنکرون بوده و تنها تفاوت در جهت جریان آرمیچر I_a می باشد که در موتور سنکرون این جریان از ترمینالها به طرف E_f رسم می شود (شکل ۲-۶ ب). بنابراین برای موتور سنکرون می توان نوشت:

$$V_t = E_f + jI_a X_s \quad (2-10)$$



شکل ۲-۵: مدار معادل یک فاز ژنراتور سنکرون



(ب) موتور سنکرون

(الف) ژنراتور سنکرون

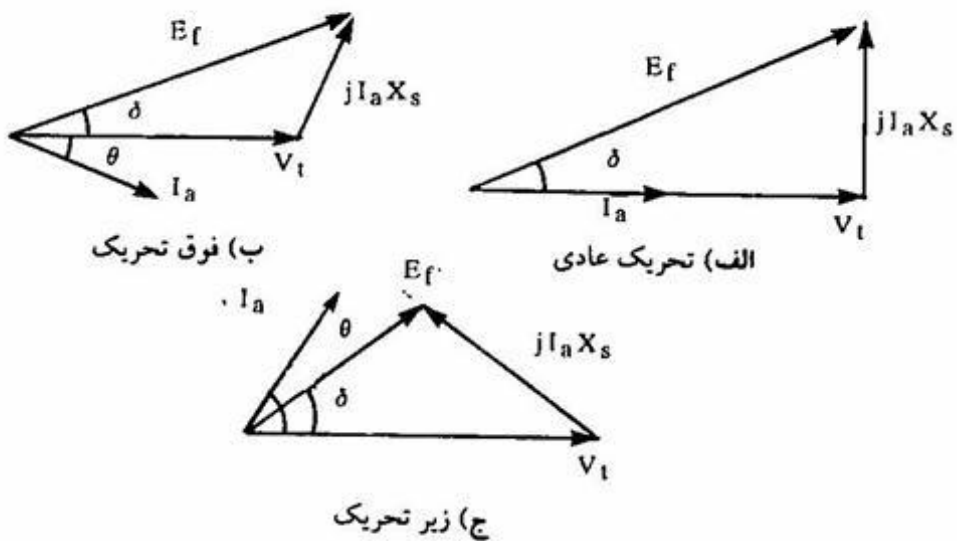
شکل ۲-۶: مدار معادل تقریبی ژنراتور و موتور سنکرون

در فصول بعدی خواهیم دید که در محاسبات اتصال کوتاه یک ماشین سنکرون، جریان اتصال کوتاه بلافاصله پس از وقوع اتصال کوتاه با جریان ماندگار اتصال کوتاه متفاوت بوده و از آن بیشتر است. در این صورت بجای راکتانس سنکرون X_s ، در فاصله دو الی سه سیکل اول از

راکتانس زیر گذرا^(۱) (X''_d) و برای حدود ۳۰ سیکل اول از راکتانس گذرا^(۲) (X'_d) در مدل ماشین سنکرون استفاده می‌کنیم. راکتانس سنکرون نیز برای محاسبات مربوط به حالت دائمی^(۳) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۲-۴ بررسی شرایط کار ماشین سنکرون

فرض کنید که ژنراتور سنکرونی به یک شین از یک سیستم قدرت بسیار بزرگی متصل باشد، بنحوی که ولتاژ و فرکانس این سیستم ثابت بوده و در اثر تغییر تحریک ژنراتور و یا تبادل قدرت بین ژنراتور و سیستم تغییر نمی‌نمایند. چنین شینی از سیستم مذکور را شین بی‌نهایت^(۴) می‌نامند. اگر توان اکتیو ثابت $|V_t| |I_a| \cos\theta$ توسط ژنراتور به شین بی‌نهایت داده‌شود، دیباگرام برداری ولتاژها در سه حالت ضریب قدرت یک، پس‌فاز و پیش‌فاز برای ژنراتور را می‌توان مطابق شکل (۲-۷) نشان داد.



شکل ۲-۷: دیباگرام برداری ژنراتور سنکرون در سه حالت کار

زاویه جریان استاتور نسبت به ولتاژ ترمینالهای ژنراتور را با θ نشان داده‌ایم. در حالتی که این زاویه صفر و در نتیجه ضریب قدرت یک است شرایط کار تحریک عادی^(۵) ماشین حاصل می‌شود که در آن مطابق شکل (۲-۷) الف داریم:

$$|E_f| \cos\delta = V_t \quad (2-11)$$

1-Subtransient Reactance

2-Transient Reactance

3-Steady State

4-Infinite-Bus

5-Normal Excitation

در اینجا δ زاویه جلوافتادگی E_f نسبت به V_1 می باشد که به زاویه قدرت (۱) و یا زاویه گشتاور (۲) ماشین موسوم است. در شرایط کار تحریک عادی $\cos\delta = 1$ و در نتیجه $\sin\delta = 0$ بوده و لذا قدرت راکتیو تولیدی ژنراتور $Q_G = |V_1| |I_a| \sin\delta$ صفر بوده و فقط قدرت اکتیو از ژنراتور به شین بی نهایت منتقل می شود.

اگر جریان تحریک ژنراتور از حالت تحریک عادی بیشتر شود، حالت کار فوق تحریک (۳) بدست می آید که در آن جریان پس فاز از ژنراتور بطرف ترمینالهای آن جاری می گردد. بعبارت دیگر جریان ورودی به ژنراتور پیش فاز می باشد و در نتیجه مانند یک خازن، قدرت راکتیو تولید می کند. شکل (۷-۲) رژیم کار فوق تحریک ژنراتور را نشان می دهد. در این حالت داریم:

$$|E_f| \cos\delta > V_1 \quad (۲-۱۲)$$

شکل (۷-۲) ج) نیز حالت کار زیر تحریک (۴) ژنراتور سنکرون را نشان می دهد. در این حالت جریان ژنراتور بطرف ترمینالها پیش فاز بوده و یا بعبارت دیگر جریان ورودی به ژنراتور پس فاز می باشد و لذا مانند یک سیم پیچ، قدرت راکتیو مصرف می کند. در شرایط کار زیر تحریک داریم:

$$|E_f| \cos\delta < V_1 \quad (۲-۱۳)$$

زاویه قدرت δ در هر سه حالت کار ژنراتور سنکرون مثبت می باشد.

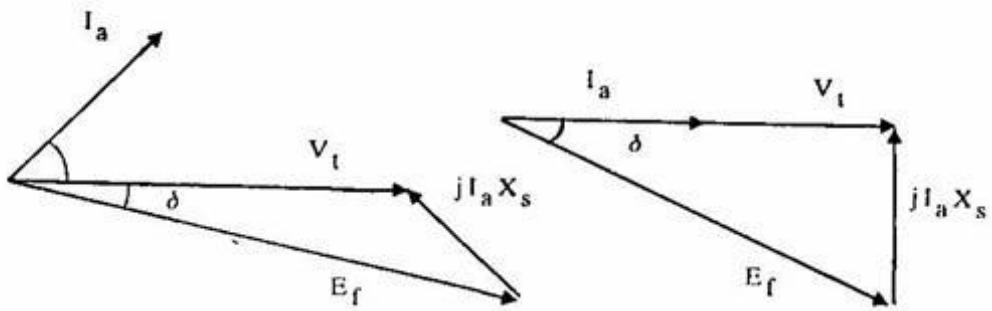
موتور سنکرون نیز دارای سه رژیم کار فوق تحریک، زیر تحریک و تحریک عادی می باشد. در شکل (۸-۲) این رژیم های کار نشان داده شده است. در تحریک عادی $|E_f| \cos\delta = V_1$ بوده و ضریب قدرت یک می باشد. بنابر این قدرت راکتیو موتور صفر است. در حالت فوق تحریک $|E_f| \cos\delta > V_1$ بوده، موتور جریان پیش فاز از شبکه جذب می کند و در نتیجه قدرت راکتیو تولید و به شین بی نهایت منتقل می نماید. در حالت زیر تحریک $|E_f| \cos\delta < V_1$ بوده، موتور جریان پس فاز مصرف می کند و در نتیجه قدرت راکتیو جذب می کند. در هر سه حالت کار موتور سنکرون زاویه قدرت δ منفی می باشد.

1-Power Angle

2-Torque Angle

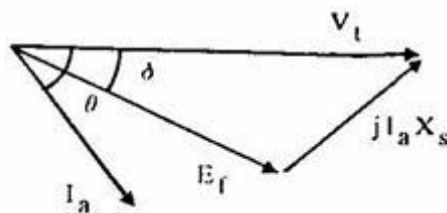
3-Overexcited

4-Underexcited



ب) فوق تحریک

الف) تحریک عادی



ج) زیر تحریک

شکل ۸-۲: دیاگرام برداری موتور سنکرون در سه حالت کار

از مطالب فوق‌الذکر نتیجه می‌شود که اولاً ژنراتورها و موتورهای سنکرون در حالت فوق تحریک قدرت راکتیو تولید و در حالت زیر تحریک قدرت راکتیو مصرف می‌نمایند. ثانیاً کنترل قدرت راکتیو ماشین با تغییر جریان تحریک ماشین امکان‌پذیر است. برای بررسی این مطالب بصورت تحلیلی، ژنراتور متصله به شین بی‌نهایت را در نظر بگیرید. داریم:

$$V_t = |V_t| \angle 0^\circ$$

$$E_f = |E_f| \angle \delta$$

$$I_a = \frac{|E_f| \angle \delta - |V_t|}{X_s \angle 90^\circ}$$

قدرت مختلط منتقل شده از ژنراتور به شین بی‌نهایت برابر است با:

$$S_1 = P_1 + jQ_1 = E_f I_a^*$$

قدرت مختلط دریافت شده توسط شین بی‌نهایت نیز برابر است با:

$$S_r = P_r + jQ_r = V_t I_a^*$$

اگر مقادیر V_t و E_f و I_a را در روابط S_1 و S_r قرار دهیم خواهیم داشت:

$$S_1 = |E_f| \angle \delta \frac{|E_f| \angle -\delta - |V_t|}{X_s \angle -90^\circ} = \frac{|E_f|^2 \angle 90^\circ - |E_f| |V_t| \angle 90^\circ + \delta}{X_s}$$

$$S_r = |V_t| \frac{|E_f| \angle -\delta - |V_t|}{X_s \angle -90^\circ} = \frac{|V_t| |E_f| \angle 90^\circ - \delta - |V_t|^2 \angle 90^\circ}{X_s}$$

با تفکیک قسمت‌های حقیقی و موهومی روابط فوق داریم:

$$P = P_1 = P_r = \frac{|V_t| |E_f|}{X_s} \text{Sin} \delta \quad (2-14)$$

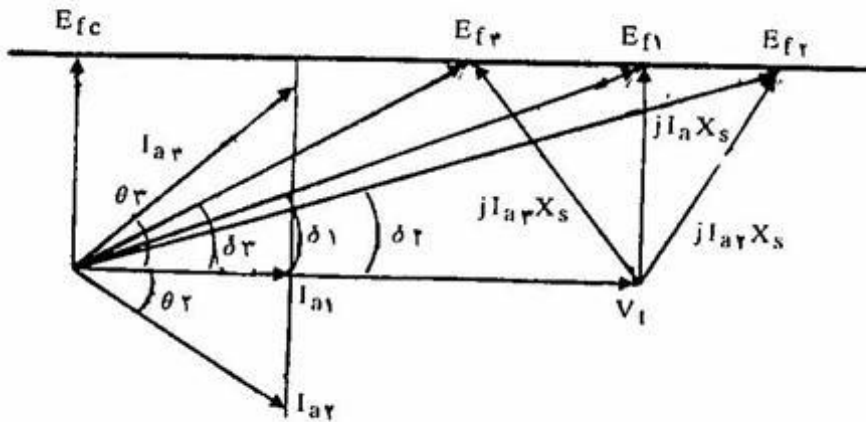
$$Q_1 = \frac{|E_f|}{X_s} (|E_f| - |V_t| \text{Cos} \delta) \quad (2-15)$$

$$Q_r = \frac{|V_t|}{X_s} (|E_f| \text{Cos} \delta - |V_t|) \quad (2-16)$$

علت تساوی P_1 و P_r این است که از مقاومت آرمیچر صرف‌نظر کرده‌ایم و تلفات اکتیو بین E_f و V_t وجود ندارد. براساس رابطه (2-16) اگر تحریک ژنراتور $|E_f|$ را تغییر دهیم می‌توانیم رژیم‌های کار ژنراتور سنکرون را بدست آوریم. اگر $|E_f| \text{Cos} \delta = V_t$ باشد قدرت اکتیو در این رابطه صفر خواهد بود و اگر $|E_f| \text{Cos} \delta$ بزرگتر و یا کوچکتر از V_t باشد بترتیب شرایط کار فوق تحریک (تولید توان اکتیو) و زیر تحریک (مصرف توان اکتیو) حاصل می‌شوند. از آنجائیکه کنترل توان اکتیو در توان اکتیو ثابت انجام می‌شود براساس رابطه (2-14) مقدار $|E_f| \text{Sin} \delta$ ثابت بوده و لذا داریم:

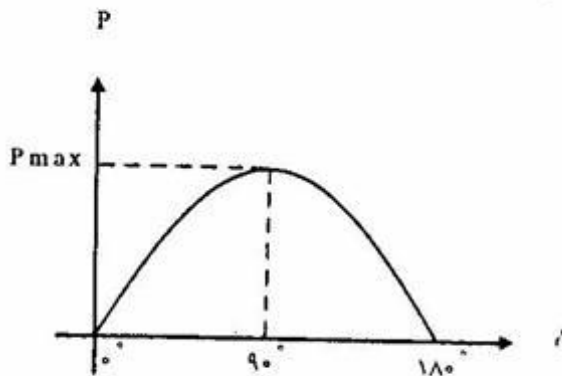
$$|E_f| \text{Sin} \delta = \frac{P}{|V_t|} X_s = \frac{|V_t| |I_a| \text{Cos} \theta}{|V_t|} X_s = X_s |I_a| \text{Cos} \theta \quad (2-17)$$

شکل (2-9) دیاگرام برداری ژنراتور سنکرون را در قدرت اکتیو ثابت و به ازاء سه مقدار جریان تحریک نشان می‌دهد.



شکل ۹-۲: دیاگرام برداری ماشین سنکرون در قدرت اکتیو ثابت

همانطوریکه در شکل (۹-۲) دیده می‌شود با کاهش جریان تحریک زاویه δ افزایش می‌یابد. در $\delta = 90^\circ$ ولتاژ بی‌باری ماشین مقدار بحرانی خود E_{fc} را خواهد داشت و هر کوششی از این به بعد جهت کاهش جریان تحریک، ژنراتور را از حالت پایدار خارج خواهد نمود. برای کنترل قدرت اکتیو ژنراتور سنکرون، بدون اینکه جریان تحریک تغییر نماید ($|E_f|$ ثابت باشد)، با توجه به اینکه ولتاژ شین بی‌نهایت $|V_t|$ ثابت است، تنها عامل تغییر دهنده توان اکتیو با توجه به رابطه (۱۴-۲) زاویه قدرت δ می‌باشد. منحنی تغییرات قدرت بر حسب زاویه δ در شکل (۱۰-۲) نشان داده شده است.

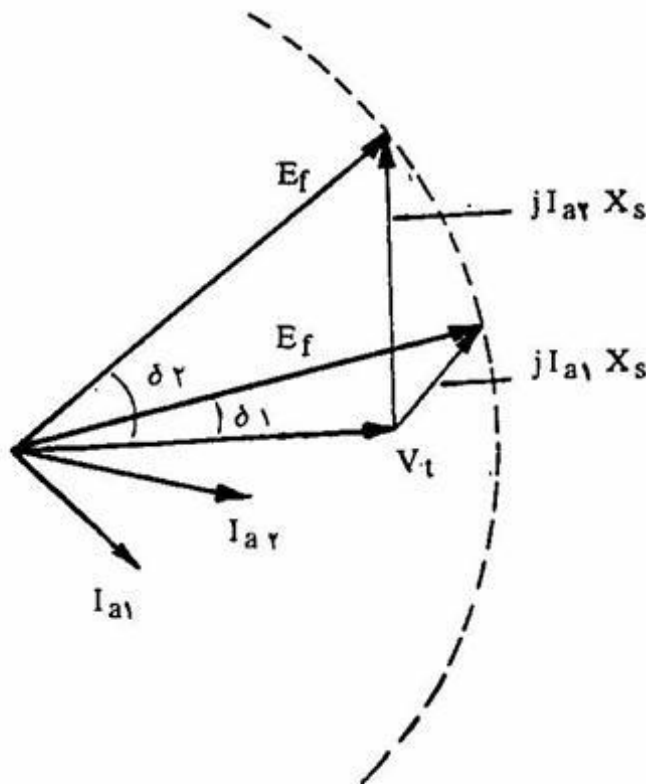


شکل ۱۰-۲: منحنی تغییرات قدرت اکتیو بر حسب زاویه قدرت (مشخصه قدرت - زاویه^(۱))

بر اساس رابطه (۲-۱۴) حداکثر قدرتی که یک ژنراتور سنکرون می‌تواند به شین بی‌نهایت بدهد در $\delta = 90^\circ$ بدست می‌آید که برابر است با:

$$P_{\max} = \frac{|V_t| |E_f|}{X_s} \quad (2-18)$$

دیاگرام برداری مربوط به کنترل قدرت اکتیو در جریان تحریک ثابت در شکل (۲-۱۱) نشان داده شده‌است.

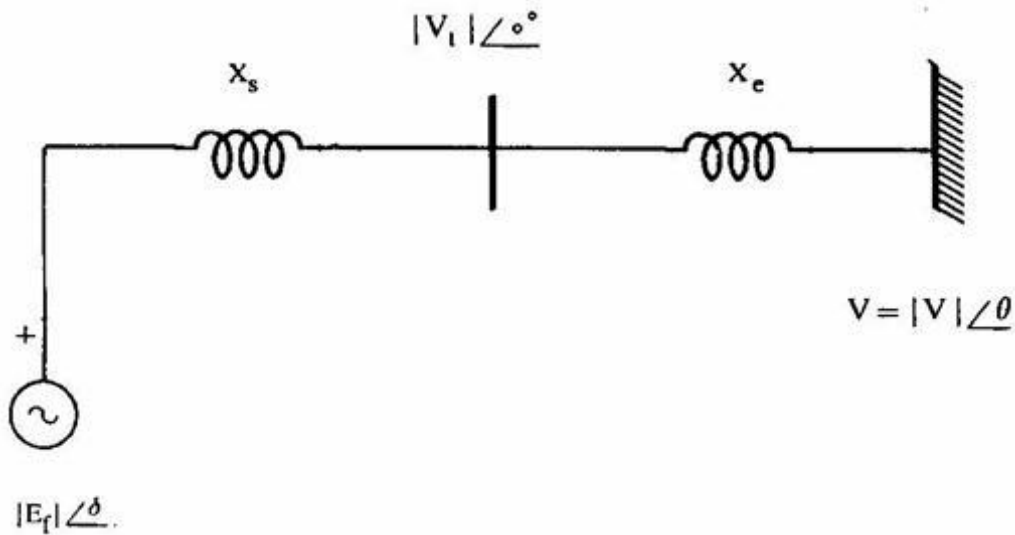


شکل ۲-۱۱: دیاگرام برداری ژنراتور سنکرون در جریان تحریک ثابت

همانطوریکه در شکل مذکور مشاهده می‌شود اگر زاویه قدرت از δ_1 به δ_2 تغییر یابد (این کار با تنظیم شیر بخار یا دریچه آب ورودی به توربین انجام می‌شود) جریان آرمیچر از I_{a1} به I_{a2} افزایش یافته و ضریب قدرت نیز به یک نزدیک‌تر می‌شود.

در حالت کلی ژنراتور سنکرون از طریق یک ترانسفورماتور یا خط انتقال و یا هر دو به شین بی نهایت متصل است. اگر راکتانس عناصر ارتباطی بین ژنراتور و شین بی نهایت را با X_e نشان دهیم داریم:

$$X = X_s + X_e \quad (2-19)$$



شکل ۲-۱۲: اتصال ژنراتور به شین بی نهایت

در اینصورت قدرت های اکتیو و راکتیو داده شده به شین بی نهایت از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$P = \frac{|V| |E_f|}{X} \sin \delta \quad (2-20)$$

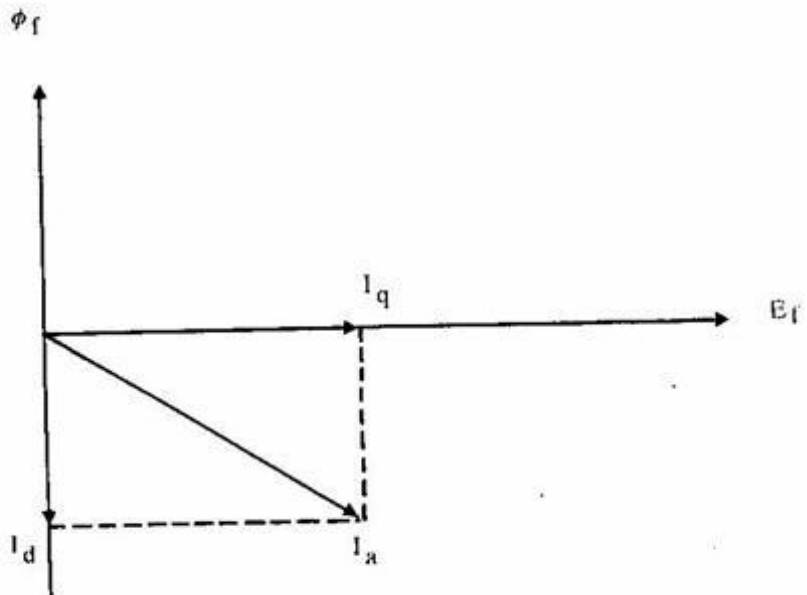
$$Q = \frac{|V|}{X} (|E_f| \cos \delta - |V|) \quad (2-21)$$

در این روابط V ولتاژ شین بی نهایت و δ زاویه بین ولتاژ بی باری ژنراتور E_f و ولتاژ شین بی نهایت است. همانطوریکه مشاهده می شود کنترل توان راکتیو بوسیله جریان تحریک ژنراتور در توان اکتیو ثابت انجام می شود، لیکن کنترل توان اکتیو با تغییر زاویه δ قدرت راکتیو را نیز کمی تغییر می دهد. از آنجا که در زوایای کوچک تغییرات سینوس بمراتب بیشتر از کسینوس است لذا تقریباً می توان فرض نمود که کنترل توان اکتیو با تغییر زاویه δ در توان راکتیو ثابت انجام می شود.

۲-۵ بررسی تأثیر برجسته بودن قطبها در روابط ماشین سنکرون

معادلات (۲-۷)، (۲-۲۰) و (۲-۲۱) برای ماشینهای سنکرون با قطبهای صاف صادق هستند. در این ماشینها فاصله هوایی یکنواخت بوده و مقاومت مغناطیسی (رلوکتانس)^(۱) فاصله هوایی در پیرامون قطبها یکسان می باشد. در ماشینهای سنکرون با قطب برجسته، فاصله هوایی بین قطبها زیادتر از فاصله هوایی زیر قطبها است و لذا رلوکتانس فاصله هوایی یکنواخت نبوده و در محور قطبها کمتر از محور بین قطبها است. براساس بررسی روابط ولتاژها و قدرت‌ها در این نوع ماشینها، دو محور اصلی را مورد نظر قرار می دهیم. محور قطبها را محور مستقیم^(۲) و محور بین قطبها را محور عمودی^(۳) می نامیم. بنابراین این جریان آرمیچر I_a را به دو بردار I_d و I_q تجزیه می کنیم، بنحوی که مؤلفه I_d در امتداد محور مستقیم و مؤلفه I_q در امتداد محور عمودی می باشد.

در شکل (۲-۱۳) تجزیه I_a به دو مؤلفه جریان محور مستقیم و جریان محور عمودی نشان داده شده است. نیروی محرکه E_f به اندازه 90° درجه از شار مغناطیسی بوجود آورنده آن یعنی Φ_f عقب تر است و چون Φ_f بر محور قطبها (محور مستقیم) قرار دارد، لذا E_f بر محور عمودی قرار خواهد گرفت. به همین دلیل براساس شکل (۲-۱۳) جریان محور عمودی I_q همفاز با E_f و جریان مستقیم I_d به اندازه 90° درجه از آن عقب تر است.

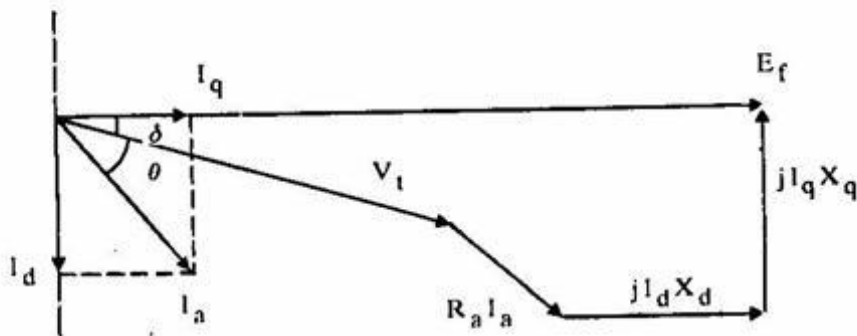


شکل ۲-۱۳: مؤلفه‌های محور مستقیم و عمودی جریان آرمیچر

سنکرون محور عمودی (راکتانس محور عمودی)^(۱) نامیده می‌شوند. البته در اینجا راکتانس پراکندگی X_L را برای هر دو مؤلفه جریان محور مستقیم و عمودی یکسان فرض کرده‌ایم. به این ترتیب نیروی محرکه E_f بر حسب ولتاژ V_t به این صورت نوشته می‌شود:

$$E_f = V_t + I_a R_a + j I_d X_d + j I_q X_q \quad (2-24)$$

با توجه به این رابطه، دیاگرام برداری ولتاژها مطابق شکل (۲-۱۵) رسم می‌گردد.



شکل ۲-۱۵: دیاگرام برداری ولتاژها در ماشین سنکرون با قطب برجسته

برای رسم این دیاگرام از آنجا که I_d و I_q مؤلفه‌های I_a هستند داریم:

$$I_a = I_d + I_q$$

با جایگزینی $I_q = I_a - I_d$ در معادله (۲-۲۴) خواهیم داشت:

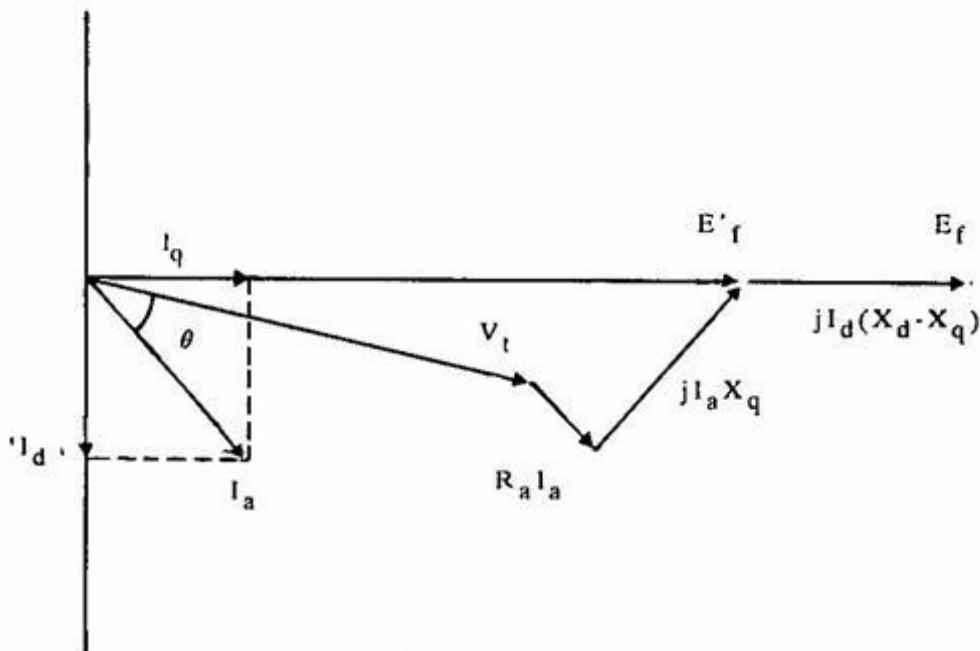
$$E_f = V_t + I_a(R_a + jX_q) + jI_d(X_d - X_q) \quad (2-25)$$

$$E_f = E_f' + jI_d(X_d - X_q) \quad (2-26)$$

که در این رابطه:

$$E_f' = V_t + I_a(R_a + jX_q) \quad (2-27)$$

جریان I_d نسبت به E_f به اندازه 90° درجه عقب‌تر است لذا با توجه به رابطه (۲-۲۶) بردارهای E_f ، E'_f و $jI_d(X_d - X_q)$ هم‌فاز هستند. به این ترتیب برای رسم دیاگرام برداری ولتاژها، ابتدا V_t و I_a را رسم می‌کنیم. سپس با رسم $R_a I_a$ و $jI_a X_q$ براساس رابطه (۲-۲۷) بردار E'_f را بدست می‌آوریم که این بردار جهت E_f را مشخص می‌نماید. آنگاه با توجه به رابطه (۲-۲۶) بردار $jI_d(X_d - X_q)$ را به E'_f می‌افزاییم تا بردار E_f بدست آید. شکل (۲-۱۶) این مراحل را نشان می‌دهد.



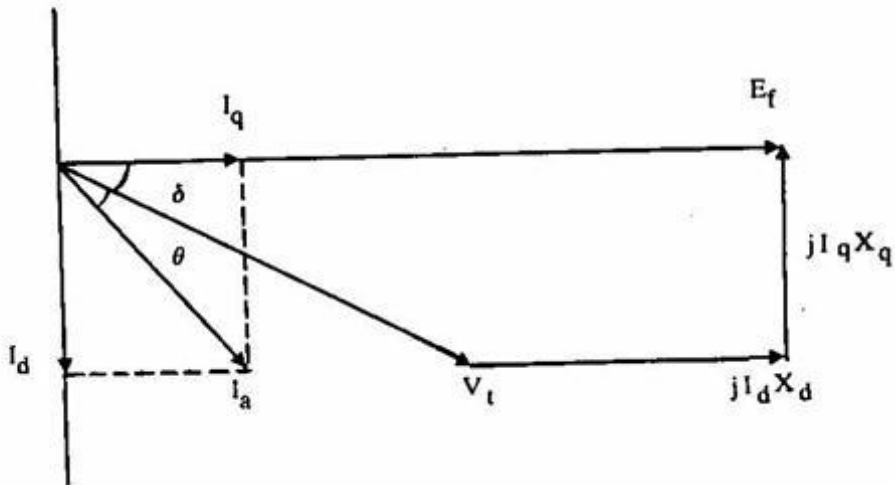
شکل ۲-۱۶: مراحل رسم دیاگرام برداری ولتاژها در ماشین سنکرون با قطب برجسته

چنانچه از مقاومت اهمی آرمیچر صرف‌نظر شود، با استفاده از معادله (۲-۲۵) می‌توان دیاگرام برداری ولتاژها را مطابق شکل (۲-۱۷) نمایش داد. با توجه به این شکل داریم:

$$P = |I_d| |V_t| \sin\delta + |I_q| |V_t| \cos\delta \quad (2-28)$$

$$Q = |I_d| |V_t| \cos\delta - |I_q| |V_t| \sin\delta \quad (2-29)$$

جریان‌های I_d و I_q با استفاده از شکل (۲-۱۷) به این ترتیب بدست می‌آیند:



شکل ۲-۱۷: دیاگرام برداری ماشین سنکرون با قطب برجسته با صرف نظر از مقاومت اهمی آرمیچر

$$|I_d| = \frac{|E_f| - |V_t| \cos \delta}{X_d}$$

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

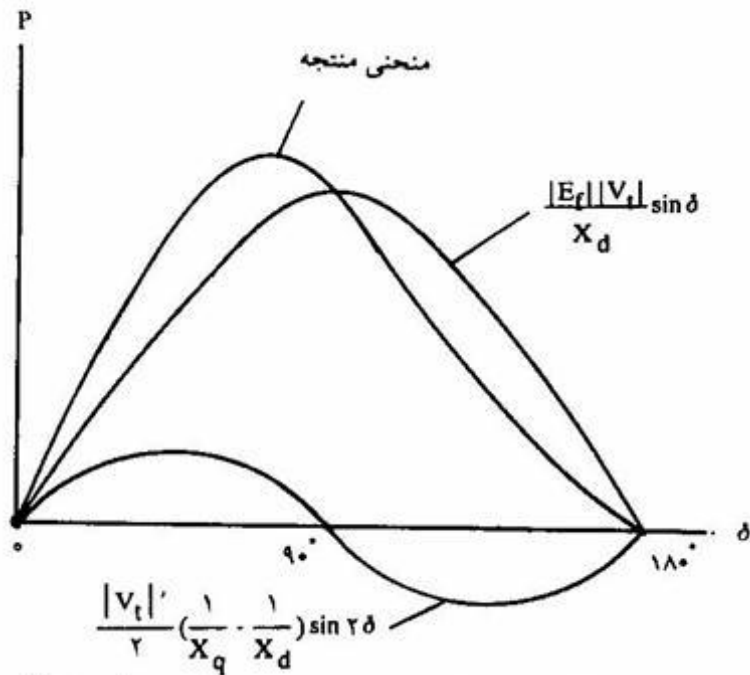
با جایگزین کردن این مقادیر در روابط (۲-۲۸) و (۲-۲۹) داریم:

$$P = \frac{|V_t| |E_f|}{X_d} \sin \delta + \frac{|V_t|^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2 \delta \quad (2-30)$$

$$Q = \frac{|V_t|}{X_d} (|E_f| \cos \delta - |V_t|) - |V_t|^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin^2 \delta \quad (2-31)$$

در ماشین سنکرون با رتور صاف (استوانه‌ای) که فاصله هوائی یکنواخت می‌باشد $X_s = X_d = X_q$ بوده و لذا جملات دوم روابط (۲-۳۰) و (۲-۳۱) حذف شده و فقط جملات اول این روابط باقی می‌مانند که مشابه روابط (۲-۲۰) و (۲-۲۱) می‌باشند. در شکل (۲-۱۸) منحنی تغییرات قدرت (P) بر حسب زاویه قدرت (δ) برای ماشین سنکرون با قطب برجسته نشان داده شده است.

در روابط (۲-۳۰) و (۲-۳۱) جملات دوم در رابطه با جملات اول قابل ملاحظه نمی‌باشند و در کلیه محاسبات از این بی‌بعد از اثر برجسته بودن قطبها صرف نظر می‌کنیم و برای هر نوع رتور صاف و برجسته راکتانس سنکرون را تقریباً با X_d و X_q برابر فرض می‌کنیم.



شکل ۱۸-۲: مشخصه قدرت-زاویه در ماشین سنکرون باقطب برجسته

۶-۲ مقادیر نسبت به واحد^(۱) (پریونیت)

کمیت‌های الکتریکی در سیستم‌های قدرت، نظیر ولتاژ، قدرت، جریان و امپدانس برحسب واحدهایشان در سیستم متریک، محدوده وسیعی از اعداد را تشکیل می‌دهند. اگر برای هر یک از این کمیت‌ها یک مقدار مبنا^(۲) انتخاب گردد و مقادیر این کمیت‌ها برحسب درصد یا نسبت به واحدی از آن مقدار مبنا بیان شوند بجای اعداد بزرگی از مگاوات، مگاوار، مگاولت‌آمپر، ولت و یا آمپر، اعداد کوچکتر و ملموس‌تری بدست می‌آیند که کاربرد آنها باعث تسلط بیشتر مهندسین سیستم‌ها روی این کمیت‌ها می‌گردد. همچنین تحلیل سیستم‌ها با وجود سطوح مختلف ولتاژ و ترانسفورماتورها بسیار ساده‌تر می‌شود.

۱-۶-۲ مقادیر نسبت به واحد در سیستم‌های یک فاز

طبق تعریف مقدار نسبت به واحد یک کمیت برابر است با نسبت مقدار واقعی آن کمیت به مقدار مبنای انتخاب شده برای آن کمیت. بعنوان مثال اگر برای ولتاژ در یک سیستم یک‌فاز مبنائی معادل ۲۰KV انتخاب کنیم، این مقدار برابر ۱ نسبت به واحد (۱PU) و یا ۱۰۰ درصد

مقدار مبنا می‌باشد. مقادیر دیگر بصورت نسبت به واحد یا درصدی از این مبنا مشخص می‌گردند. مثلاً ۱۹KV برابر ۰/۹۵PU و ولتاژ ۲۱KV برابر ۱/۰۵PU خواهند بود. اگر V_b و I_b بترتیب ولتاژ مبنا و جریان مبنای انتخاب شده، و V و I بترتیب ولتاژ و جریان در نقطه‌ای از سیستم قدرت باشند (مقادیر مختلط) در اینصورت داریم:

$$V_{PU} = \frac{V}{V_b}$$

$$I_{PU} = \frac{I}{I_b}$$

از آنجا که V و I اعداد مختلط هستند لذا V_{PU} و I_{PU} که مقادیر ولتاژ و جریان بر حسب نسبت به واحد (PU) هستند اعداد مختلطی بدون دیمانسیون می‌باشند. مثلاً اگر ولتاژ مبنا ۲۰KV باشد ولتاژ $19\angle 30^\circ$ KV عبارتست از:

$$19\angle 30^\circ \text{ KV} = \frac{19}{20} \angle 30^\circ \text{ PU} = 0.95 \angle 30^\circ \text{ PU}$$

ولتاژ مبنا معمولاً برحسب KV و جریان مبنا برحسب آمپر انتخاب می‌شوند. اگر V_b و I_b بترتیب ولتاژ مبنا (KV) و جریان مبنا (A) باشند قدرت مبنا S_b برحسب KVA و MVA برابر است با:

$$\begin{aligned} S_b &= V_b I_b && \text{KVA} \\ &= 10^{-2} V_b I_b && \text{MVA} \end{aligned} \quad (2-32)$$

قدرت مبنا معمولاً برحسب MVA در نظر گرفته می‌شود. اگر قدرت مختلط در نقطه‌ای از سیستم برابر S باشد داریم:

$$S_{PU} = \frac{S}{S_b} = \frac{P + jQ}{S_b} = \frac{P}{S_b} + j \frac{Q}{S_b} = P_{PU} + j Q_{PU}$$

بنابر این مبنای قدرت‌های اکتیو و راکتیو نیز همان S_b است. مثلاً اگر قدرت مبنا ۱۰۰MVA باشد، قدرت اکتیو ۸۰MW معادل ۰/۸PU خواهد بود.

امپدانس مبنا Z_b برحسب V_b ، I_b و S_b از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$Z_b = \frac{V_b}{I_b} = \frac{V_b}{\frac{S_b}{V_b}} = \frac{V_b^2}{S_b} \quad \Omega$$

که در آن V_b برحسب ولت، I_b برحسب آمپر و S_b برحسب ولت آمپر می‌باشند. اگر V_b برحسب KV و S_b برحسب MVA جایگزین شوند، از رابطه زیر باز هم Z_b برحسب اهم بدست می‌آید:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (2-33)$$

انتخاب دو مقدار مبنا از چهار کمیت V_b ، I_b ، S_b و Z_b کفایت می‌کند و دو مقدار مبنای دیگر قابل محاسبه هستند. معمولاً ولتاژ مبنا برحسب KV و قدرت مبنا برحسب MVA انتخاب می‌شوند. سپس جریان مبنا برحسب آمپر و امپدانس مبنا برحسب اهم از روابط زیر تعیین می‌گردند:

$$I_b = \frac{S_b}{V_b} \times 10^3 \quad (2-34)$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (2-35)$$

در سیستم‌های پرینیت بسیاری از روابط اساسی شبکه‌ها صادق است. مثلاً برای ولتاژ و قدرت مختلط در نقطه‌ای از سیستم داریم:

$$V_{PU} = \frac{V}{V_b} = \frac{ZI}{Z_b I_b} = \frac{Z}{Z_b} \cdot \frac{I}{I_b} = Z_{PU} I_{PU}$$

$$S_{PU} = \frac{S}{S_b} = \frac{VI^*}{V_b I_b} = \frac{V}{V_b} \cdot \frac{I^*}{I_b} = V_{PU} I_{PU}^*$$

۲-۶-۲ مقادیر نسبت به واحد در سیستم‌های سه فاز

در سیستم‌های قدرت سه فاز کمیت‌های اصلی مورد بحث از دیدگاه مقادیر نسبت به

واحد عبارتند از:

- ۱- قدرت سه فاز برحسب مگاوات آمپر
- ۲- ولتاژ خطی برحسب کیلوولت
- ۳- جریان خطی برحسب آمپر
- ۴- امپدانس معادل یک فاز برحسب اهم

اگر یک فاز سیستم را در نظر بگیریم و ولتاژ مبنا و قدرت مبنا را برای آن بترتیب با V_{pb} و $S_{b1\phi}$ نشان دهیم، امپدانس مبنا (معادل یک فاز) از رابطه زیر بدست می آید:

$$Z = \frac{V_{pb}^2}{S_{b1\phi}} \quad (2-36)$$

در سیستم سه فاز قدرت مبنای سه فاز و ولتاژ مبنای خطی را بترتیب با S_b و V_b نشان می دهیم. در اینصورت داریم:

$$S_{b1\phi} = \frac{1}{3} S_b$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{3}} V_b$$

با جایگزین کردن این مقادیر در معادله (۲-۳۶) خواهیم داشت:

$$Z_b = \frac{\left(\frac{V_b}{\sqrt{3}}\right)^2}{\frac{1}{3} S_b} = \frac{V_b^2}{S_b}$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad (2-37)$$

که در آن V_b برحسب KV، S_b برحسب MVA و Z_b برحسب اهم می باشند. جریان مبنا برحسب آمپر نیز در سیستم سه فاز عبارتست از:

$$I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b} \times 10^3 \quad (2-38)$$

اگر در این رابطه S_b برحسب MVA و V_b بر حسب KV جایگزین شوند، جریان I_b برحسب آمپر بدست می آید.

قدرت مختلط برحسب PU در یک سیستم سه فاز مطابق زیر تعیین می شود:

$$S_{PU} = \frac{S}{S_b} = \frac{\sqrt{3}VI^*}{\sqrt{3}V_b I_b} = \frac{V}{V_b} \cdot \frac{I^*}{I_b} = V_{PU} I_{PU}^* \quad (2-39)$$

این معادله نشان می دهد که ضریب $\sqrt{3}$ در روابط قدرت برحسب ولتاژ و جریان در سیستم نسبت به واحد حذف می شود. بهمین ترتیب در مورد قدرت اکتیو یک سیستم سه فاز داریم:

$$P = |V| |I| \cos\Phi \quad (2-40)$$

که در آن $|V|$ و $|I|$ اندازه (قدرمطلق) ولتاژ خطی و جریان برحسب PU و P قدرت اکتیو سه فاز برحسب PU می باشند.

مثال ۱-۲: یک ژنراتور سنکرون قدرت ۲۵۰MW را در ولتاژ ۲۱KV و ضریب قدرت ۰/۸ پس فاز تولید می کند. جریان این ژنراتور را برحسب PU محاسبه کنید. قدرت مبنا ۱۰۰MVA و ولتاژ مبنا ۲۰KV انتخاب گردد.

$$P = 250 \text{ MW} = \frac{250 \text{ MW}}{100 \text{ MVA}} = 2/5 \text{ PU}$$

$$|V| = 21 \text{ KV} = \frac{21}{20} = 1/0.5 \text{ PU}$$

$$V = 1/0.5 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

$$P = |V| |I| \cos\Phi$$

$$2/5 = 1/0.5 \times |I| \times 0/8$$

$$|I| = 2/976 \text{ PU}$$

$$I = |I| \angle \Phi = 2/976 \angle -\cos^{-1} 0/8 = 2/976 \angle -36/9^\circ \text{ PU}$$

۳-۶-۲ نمایش راکتانس های ماشین سنکرون برحسب PU اطلاعات اصلی یک ماشین سنکرون، قدرت نامی (MVA)، ولتاژ نامی (KV) و راکتانس ماشین می باشد. راکتانس ماشین سنکرون معمولاً برحسب PU و یا درصد مشخص می گردد. در اینصورت امپدانس مبنای این راکتانس از قدرت نامی و ولتاژ نامی ماشین بدست می آید. در حقیقت قدرت مبنای ولتاژ مبنای راکتانس ماشین، همان قدرت نامی و ولتاژ نامی آنست. فرض کنید مقادیر زیر داده های یک ماشین سنکرون باشند:

$$100 \text{ MVA} , 20 \text{ KV} , X_d'' = 0.10 = 0.1 \text{ PU}$$

برای راکتانس داده شده فوق بصورت PU یا درصد، قدرت نامی و ولتاژ نامی این ماشین مقادیر مبنای در نظر گرفته شده اند. بنابراین این امپدانس مبنای برابر است با:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{20^2}{100} = 4 \ \Omega$$

و از آنجا:

$$X_{d(PU)}'' = \frac{X_d''}{Z_b}$$

$$0.1 = \frac{X_d''}{4}$$

$$X_d'' = 0.4 \ \Omega$$

بنابر این راکتانس زیر گذرای ماشین $0.4 \ \Omega$ بوده است که برحسب درصد با مقدار 0.10 و یا 0.1 PU نمایش داده شده است.

جدول (۲-۱) مقادیر راکتانس محور مستقیم (X_d) و راکتانس محور عمودی (X_q) را برای توربوژنراتورهای ۲ و ۴ قطب و ژنراتورهای با قطب برجسته و همچنین کندانسورهای سنکرون^(۱) برحسب PU نشان می دهد.

جدول ۱-۲: راکتانس‌های ماشین سنکرون برحسب PU

	X_d	X_q
توربوژنراتورهای ۲ قطب	۰/۹۵ - ۱/۴۵	۰/۹۲ - ۱/۴۲
توربوژنراتورهای ۴ قطب	۱/۰۰ - ۱/۴۵	۰/۹۲ - ۱/۴۲
ژنراتورهای با قطب برجسته	۰/۶ - ۱/۵	۰/۴ - ۰/۸
کندانسورهای سنکرون	۱/۲۵ - ۲/۲۰	۰/۹۵ - ۱/۳

۲-۷ تغییر مبنای مقادیر نسبت به واحد

امپدانس عناصر سیستم نظیر ژنراتورها، ترانسفورماتورها و ... در مبنای مقادیر نامی آنها برحسب PU داده می‌شود، لیکن قدرت مینا و ولتاژ مبنای انتخاب شده برای نقطه مشخصی از سیستم ممکن است با قدرت و ولتاژ آن عنصر متفاوت باشد. در این صورت باید بتوان امپدانس عنصر را به مبنای انتخاب شده جدید تبدیل نمود. اگر امپدانس عنصری برحسب PU در مبنای S_b و V_b برابر Z_{PU} باشد و مقدار آن برحسب اهم با Z نشان داده شود داریم:

$$Z_{PU} = \frac{Z}{Z_b} = \frac{Z}{\frac{V_b^2}{S_b}} = Z \frac{S_b}{V_b^2} \quad (2-41)$$

حال اگر بخواهیم امپدانس این عنصر را در مبنای جدید $S_{b_{new}}$ و $V_{b_{new}}$ بدست آوریم خواهیم داشت:

$$Z_{PU_{new}} = \frac{Z}{Z_{b_{new}}} = \frac{Z}{\frac{V_{b_{new}}^2}{S_{b_{new}}}} = Z \frac{S_{b_{new}}}{V_{b_{new}}^2} \quad (2-42)$$

از تقسیم طرفین معادله (۲-۴۲) بر طرفین معادله (۲-۴۱) و حل آن برحسب $Z_{PU_{new}}$ خواهیم داشت:

$$Z_{PU_{new}} = Z_{PU} \left(\frac{S_{b_{new}}}{S_b} \right) \left(\frac{V_b}{V_{b_{new}}} \right)^2 \quad (2-43)$$

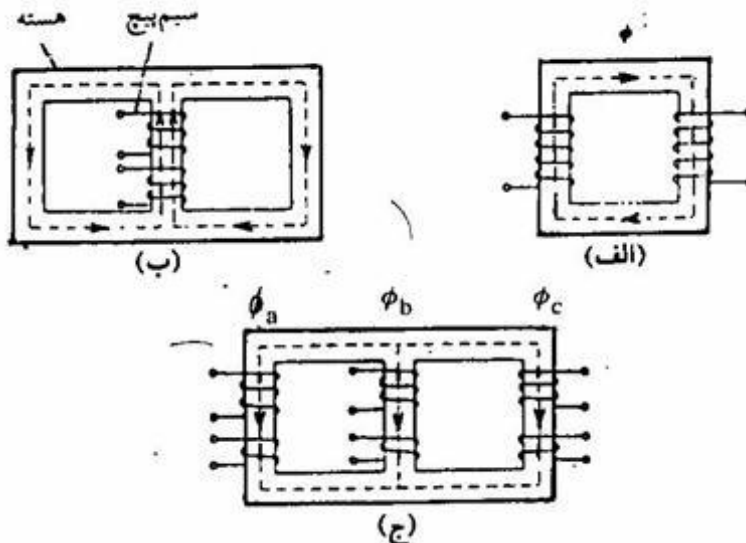
مثال ۲-۲: راکتانس یک ژنراتور در مبنای مقادیر نامی آن، ۲۵۰ MVA و ۲۱ KV برابر ۰/۲ PU می‌باشد. مبنای جدید انتخاب شده برای سیستم ۱۰۰ MVA و ۲۰ KV است. راکتانس این ژنراتور را در مبنای جدید محاسبه کنید.

$$X = 0.2 \left(\frac{100}{250} \right) \left(\frac{21}{20} \right)^2 = 0.0882 \text{ PU}$$

۲-۸ ترانسفورماتورها

در سیستم‌های قدرت برای انتقال قدرت‌های زیاد و کم کردن تلفات انتقال، از خطوط انتقال انرژی با ولتاژهای بالا استفاده می‌شود. از طرف دیگر تولید انرژی با ولتاژهایی در حدود چند صد کیلوولت توسط ژنراتورهای سنکرون عملاً امکان‌پذیر نیست. بنابراین ترانسفورماتورها بعنوان مبدل ولتاژها از اهمیت ویژه‌ای در سیستم‌های قدرت برخوردار هستند. ترانسفورماتورهای قدرت^(۱) در حال حاضر تا قدرت ۱۰۰۰ MVA ساخته شده و مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند.

قسمت اصلی یک ترانسفورماتور هسته مغناطیسی^(۲) می‌باشد که شار مغناطیسی AC را هدایت می‌کند. این هسته از لایه‌هایی از آلیاژ آهن و سیلیکان به ضخامت ۰/۳ mm ساخته می‌شود تا تلفات آهنی آن به حداقل برسد. شکل (۲-۱۹) سه نوع هسته متداول و نحوه بسته شدن مسیر مغناطیسی را نشان می‌دهد.



شکل ۲-۱۹: هسته‌های متداول و مسیرهای مغناطیسی

در ترانسفورماتورهای سه فاز ممکن است از سه هسته یک فاز از نوع (الف) و (ب) شکل (۲-۱۹) و یا از یک هسته سه فاز مطابق شکل (۲-۱۹ ج) استفاده شود. مجموعه هسته و سیم پیچ‌ها در محفظه‌ای محتوی روغن مخصوص قرار می‌گیرد. وجود روغن باعث می‌شود تا عایق‌بندی بین سیم پیچ‌ها بهتر انجام شود و در ضمن حرارت نیز به بیرون بهتر منتقل گردد.

۲-۹ ترانسفورماتور ایده‌آل

یک ترانسفورماتور ایده‌آل دارای مشخصات زیر است:

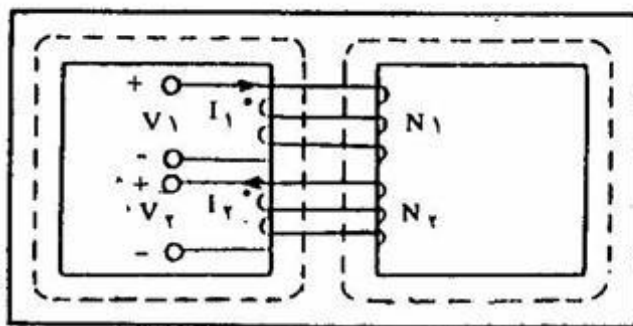
(الف) قابلیت نفوذ مغناطیسی هسته بی‌نهایت است.

(ب) شار مغناطیسی پیوست با یک سیم پیچ تمام حلقه‌های سیم پیچ دیگر را قطع می‌کند.

(ج) تلفات آهنی هسته صفر است.

(د) مقاومت سیم پیچ‌ها صفر است.

در شکل (۲-۲۰) یک ترانسفورماتور ایده‌آل یک فاز با دو سیم پیچ نشان داده شده است.



شکل ۲-۲۰: ترانسفورماتور یک فاز

ولتاژهای القاء شده V_1 و V_2 بر اثر شار مغناطیسی متغیر ϕ با یکدیگر همفاز هستند. این مقادیر برابرند با:

$$v_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad , \quad v_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \quad (2-44)$$

در اینجا N_1 و N_2 تعداد دور سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه می‌باشند. این معادلات برحسب فازور ولتاژها و شار مغناطیسی به این صورت نوشته می‌شوند:

$$V_1 = j\omega N_1 \Phi \quad (2-45)$$

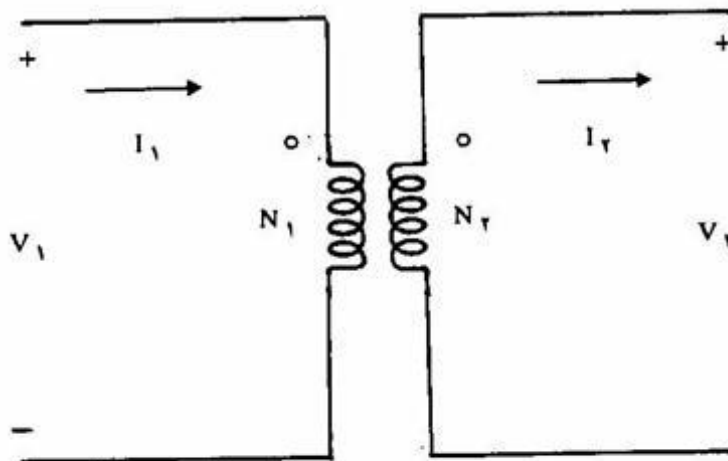
$$V_2 = j\omega N_2 \Phi \quad (2-46)$$

از تقسیم طرفین روابط (۲-۴۵) و (۲-۴۶) بر یکدیگر خواهیم داشت:

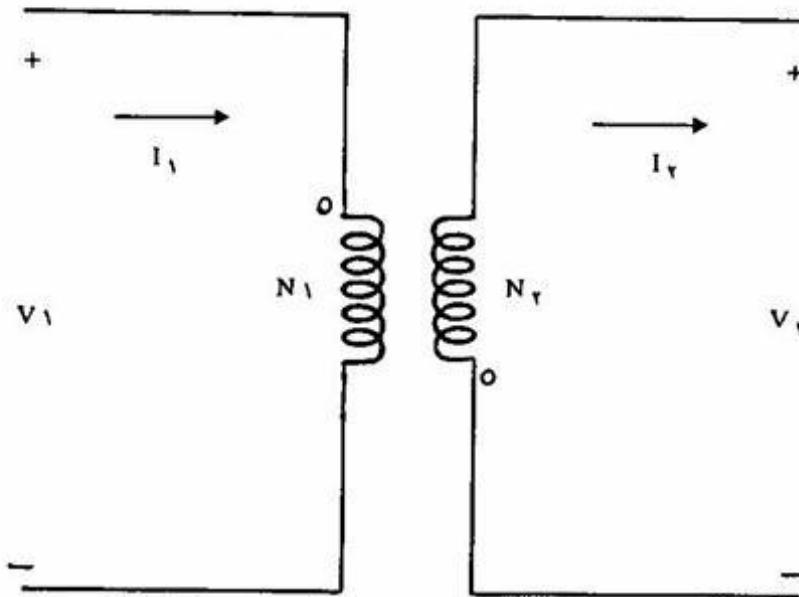
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2-47)$$

در اینجا نسبت تعداد دور سیم پیچ اولیه به تعداد دور سیم پیچ ثانویه، a ، را نسبت تبدیل (۱) ترانسفورماتور می نامند. سیم پیچ های نشان داده شده در شکل (۲-۲۰) هم جهت بسته شده اند. مطابق شکل (۲-۲۱) قرار دادن نقطه در سر هر یک از سیم پیچ ها می تواند مشخص کننده نحوه بستن حلقه های سیم پیچ ها باشد. شکل (۲-۲۱) جایگزین شکل (۲-۲۰) می باشد و نشان می دهد که ولتاژهای القاء شده در سیم پیچ های اولیه و ثانویه هم فاز هستند.

اگر سیم پیچ های شکل (۲-۲۰) در خلاف جهت هم بسته شوند، نقاط در بالا و پائین سیم پیچ ها، مطابق شکل (۲-۲۲)، قرار داده می شوند و نشان دهنده اختلاف فاز 180° درجه در ولتاژهای القاء شده V_1 و V_2 می باشد.



شکل ۲-۲۱: شمای ترانسفورماتور یک فاز در حالتی که اختلاف فاز V_1 و V_2 برابر صفر است.



شکل ۲-۲۲: شمای ترانسفورماتور یک فاز در حالتی که اختلاف فاز V_2 و V_1 برابر 180° است.

اگر رلوکتانس کل مسیر مغناطیسی را با \mathcal{R} نشان دهیم، قانون اهم برای هسته مغناطیسی شکل (۲-۲۰) را می‌توان به این صورت نوشت:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \mathcal{R} \Phi \quad (2-48)$$

در ترانسفورماتور ایده‌آل، قابلیت نفوذ مغناطیسی μ بی‌نهایت است و در نتیجه رلوکتانس برابر صفر است. بنابراین:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0$$

لذا خواهیم داشت:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2-49)$$

با تعیین مزدوج رابطه اخیر و استفاده از معادله (۲-۴۷) داریم:

$$\frac{I_1^*}{I_2^*} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{V_2}{V_1}$$

بنابر این:

$$V_1 I_1^* = V_2 I_2^* \quad (2-50)$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد که در ترانسفورماتور ایده‌آل، قدرت ظاهری و قدرت مختلط ورودی با همین قدرت‌ها در خروجی برابر هستند.

امپدانس دیده شده از طرف اول ترانسفورماتور برابر است با:

$$Z_1 = \frac{V_1}{I_1} = \frac{V_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)}{I_2 \left(\frac{N_1}{N_2}\right)} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \frac{V_2}{I_2}$$

اگر به دو سر خروجی ترانسفورماتور امپدانس Z_2 را متصل کنیم داریم:

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

$$Z_1 = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 = a^2 Z_2 \quad (2-51)$$

بنابر این امپدانس متصله به ترمینالهای طرف دوم ترانسفورماتور با ضرب شدن در a^2 به طرف اول تبدیل می‌شود.

۱۰-۲ مدار معادل ترانسفورماتور

یک ترانسفورماتور واقعی در عمل دارای هیچیک از مشخصات ذکر شده برای ترانسفورماتور ایده‌آل نمی‌باشد. قابلیت نفوذ مغناطیسی بی‌نهایت نیست. بنابر این رلوکتانس نیز برابر صفر نمی‌باشد. شار مغناطیسی پیوست با یک سیم‌پیچ با سیم‌پیچ دیگر کاملاً پیوست نمی‌باشد، تلفات آهنی هسته صفر نیست و سیم‌پیچ‌ها دارای مقاومت اهمی هستند. لیکن از اطلاعات مفیدی که از ترانسفورماتور ایده‌آل بدست می‌آید، می‌توان در تعیین مدار معادل ترانسفورماتور واقعی استفاده نمود.

در ترانسفورماتور ایده‌آل در شرایط بی‌باری داریم:

$$I_2 = 0$$

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 = 0$$

بنابراین:

و این بدان مفهوم است که امپدانس دیده شده از طرف اول بی نهایت است. علت این امر آنست که رلوکتانس مغناطیسی صفر منظور شده است. در ترانسفورماتور واقعی رلوکتانس صفر نبوده و در حالت بی باری جریان مغناطیس کننده $I_m^{(1)}$ از طرف اول عبور می کند. این موضوع با توجه به معادله (۲-۴۸) نیز قابل پیش بینی است. براساس این معادله داریم:

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = \Phi \mathcal{R}$$

به ازاء $I_2 = 0$ و $I_1 = I_m$ در حالت بی بار خواهیم داشت:

$$I_1 = I_m = \frac{\Phi \mathcal{R}}{N_1} \quad (2-52)$$

با استفاده از رابطه (۲-۴۵) شار مغناطیسی Φ بدست می آید:

$$\Phi = \frac{V_1}{j\omega N_1}$$

بنابر این خواهیم داشت:

$$I_m = -j \frac{\mathcal{R}}{\omega N_1^2} V_1 \quad (2-53)$$

$$I_m = Y_m V_1 \quad (2-54)$$

در رابطه اخیر Y_m ادمیتانس مغناطیس کننده از دید طرف اول است و مقدار آن برابر است با:

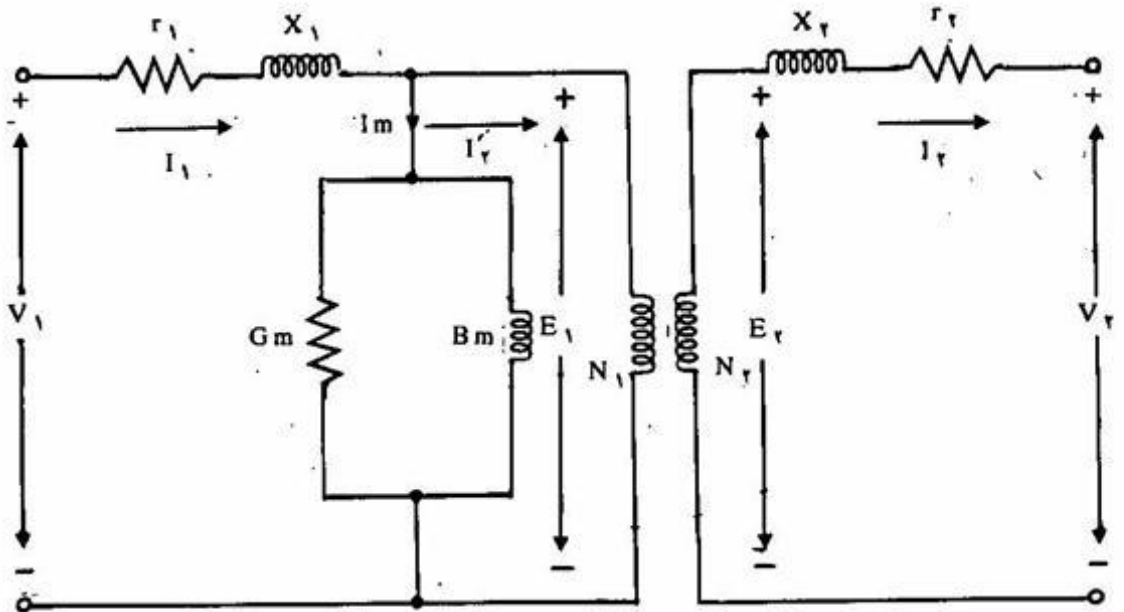
$$Y_m = -j \frac{\mathcal{R}}{\omega N_1^2} = -jB_m \quad (2-55)$$

این رابطه نشان می دهد که ادمیتانس مغناطیس کننده (Y_m) کاملاً راکتیو است، لیکن آزمایش بی باری نشان می دهد که Y_m دارای قسمت حقیقی نیز بوده و بصورت زیر قابل نوشتن است:

$$Y_m = G_m - jB_m \quad (2-56)$$

یعنی ترانسفورماتور دارای هر دو قدرت مغناطیس کننده حقیقی و موهومی است. قدرت حقیقی مغناطیس کننده مربوط به تلفات جریان گردابی^(۱) و تلفات هیستریزس^(۲) هسته می باشد که به مجموع آنها تلفات آهنی گفته می شود. بنابر این در مدار معادل ترانسفورماتور واقعی می توان اثر جریان مغناطیس کننده I_m را با قرار دادن ساسپتانس B_m موازی با کندوکتانس G_m مطابق شکل (۲-۲۳) منظور نمود. در این شکل داریم:

$$E_r = \frac{N_r}{N_1} E_1, \quad I'_r = \frac{N_r}{N_1} I_r \quad (2-57)$$



شکل ۲-۲۳: مدار معادل ترانسفورماتور واقعی با استفاده از مفهوم ترانسفورماتور ایده آل

مقاومت های اهمی سیم پیچ های اول و دوم در ترانسفورماتور واقعی با این سیم پیچ ها بصورت سری قرار می گیرند. این مقاومت ها در شکل (۲-۲۳) نشان داده شده اند. در این ترانسفورماتورها شار مغناطیسی پیوست با سیم پیچ اول، سیم پیچ دوم را قطع نمی کند. مقدار این شار متناسب با جریان سیم پیچ اول بوده و افت ولتاژی ایجاد میکند که ضریب تناسب این

1- Eddy Current Loss

2- Hysteresis Loss

افت ولتاژ با جریان سیم‌پیچ اول را با x_1 نشان داده و آنرا راکتانس پراکندگی^(۱) می‌نامیم. این راکتانس مطابق شکل (۲-۲۳) با سیم‌پیچ اول بصورت سری قرار می‌گیرد. بهمین ترتیب راکتانس پراکندگی متناظر آن x_2 سری با سیم‌پیچ دوم در نظر گرفته می‌شود. اگر جریان، ولتاژ و امپدانس طرف دوم شکل (۲-۲۳) را براساس روابط ترانسفورماتور ایده‌آل به طرف اول تبدیل کنیم، مدار معادل ترانسفورماتور واقعی تبدیل شده به طرف اول بدست می‌آید. این مدار در شکل (۲-۲۴ الف) رسم شده‌است. در این شکل داریم:

$$V'_2 = \frac{N_1}{N_2} V_2, \quad I'_2 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \quad (2-58)$$

در محاسبات سیستم‌های قدرت از جریان مغناطیس‌کننده I_m صرف‌نظر می‌شود و لذا مدار معادل ساده‌تر شکل (۲-۲۴ ب) بدست می‌آید. در این مدار R_1 و X_1 از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$R_1 = r_1 + \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 r_2 \quad (2-59)$$

$$X_1 = x_1 + \left[\frac{N_1}{N_2}\right]^2 x_2$$

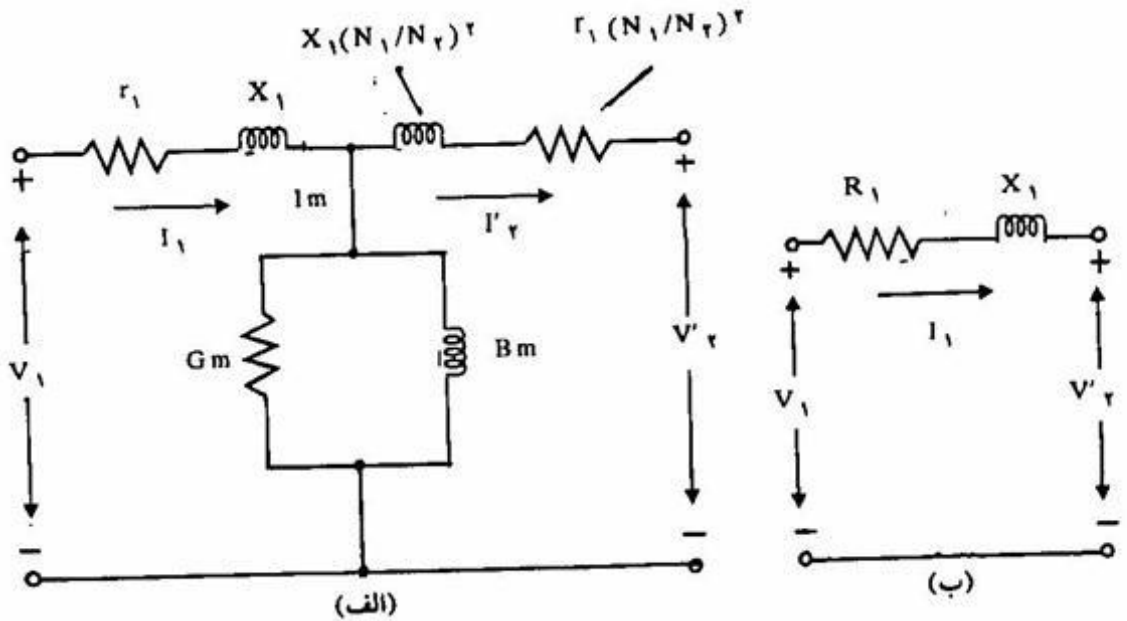
در اغلب محاسبات سیستم‌های قدرت از مقاومت R_1 در مقایسه با راکتانس X_1 صرف‌نظر می‌شود. در اینصورت مدار معادل ترانسفورماتور فقط با راکتانس پراکندگی تبدیل شده به طرف اول X_1 و یا راکتانس پراکندگی تبدیل شده به طرف دوم X_2 نشان داده می‌شود. راکتانس X_2 این چنین تعریف می‌شود:

$$X_2 = x_2 + \left[\frac{N_2}{N_1}\right]^2 x_1 \quad (2-60)$$

راکتانس‌های X_1 و X_2 نیز طبق روابط زیر بهم تبدیل می‌گردند:

$$X_r = \left(\frac{N_1}{N_r}\right)^2 x_1 = \left(\frac{V_1}{V_r}\right)^2 x_1 \quad (2-61)$$

$$X_1 = \left(\frac{N_r}{N_1}\right)^2 x_r = \left(\frac{V_r}{V_1}\right)^2 x_r$$



شکل ۲-۲۴: مدار معادل ترانسفورماتور

۲-۱۱ اتو ترانسفورماتور (۱)

اگر سیم پیچ‌های یک ترانسفورماتور مطابق شکل (۲-۲۵ الف) علاوه بر پیوست مغناطیسی از لحاظ الکتریکی نیز بهم متصل باشند اتو ترانسفورماتور بدست می‌آید. شکل مذکور یک اتو ترانسفورماتور افزایشده^(۲) را نشان می‌دهد. با استفاده از مفاهیم ترانسفورماتور ایده‌آل برای شکل مذکور می‌توان نوشت:

$$\frac{V_1}{V_r} = \frac{N_1}{N_r}$$

قدرت ظاهری ورودی برابر است با:

$$S_{in} = |V_1| (|I_1| + |I_r|) = |V_1| |I_1| + |V_1| |I_r| \frac{N_1}{N_r} \quad (2-62)$$

1- Autotransformer

2- Step-Up Autotransformer

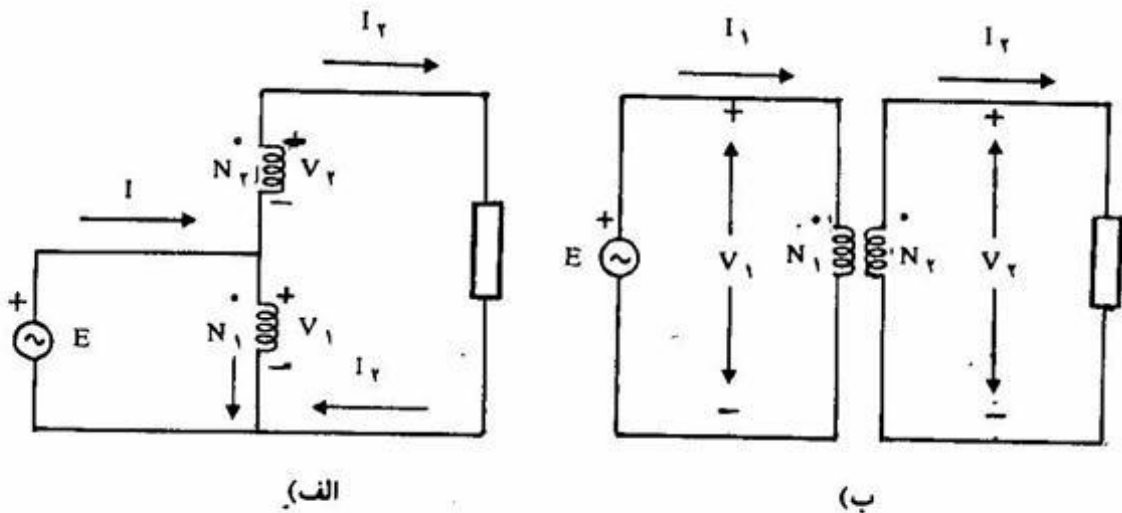
قدرت ظاهری خروجی نیز این چنین محاسبه می شود:

$$S_{out} = (|V_1| + |V_2|) |I_2| = |V_2| |I_2| + |V_1| |I_2| \frac{N_1}{N_2} \quad (2-63)$$

حال اگر ترانسفورماتوری با همان تعداد دور سیم پیچ N_1 و N_2 را مطابق شکل (۲-۲۵) در نظر بگیریم، قدرت نامی آن از رابطه زیر بدست می آید:

$$S = |V_1| |I_1| = |V_2| |I_2| \quad (2-64)$$

مقایسه روابط (۲-۶۲) و (۲-۶۳) با رابطه (۲-۶۴) نشان می دهد که قدرت نامی اتوترانسفورماتور با دو سیم پیچ N_1 و N_2 بیشتر از قدرت نامی ترانسفورماتور عادی با همان دو سیم پیچ N_1 و N_2 است. در ضمن چون جریان هر سیم پیچ در هر دو شکل (۲-۲۵) و (۲-۲۵) یکسان است لذا تلفات یکسان بوده و ضریب بهره اتوترانسفورماتور بیشتر از ترانسفورماتور عادی با همان دو سیم پیچ است. از معایب اتوترانسفورماتور می توان عدم وجود عایق بندی الکتریکی بین سیم پیچ های اولیه و ثانویه و زیاد بودن جریان اتصال کوتاه را نام برد.



شکل ۲-۲۵: مقایسه ترانسفورماتور و اتوترانسفورماتور با سیم پیچ های یکسان N_1 و N_2

مثال ۲-۳: سیم پیچ های یک ترانسفورماتور با قدرت ۲۴KVA و ولتاژ ۲/۴/۰/۶ را بصورت یک اتوترانسفورماتور می بندیم. جریان ورودی و خروجی و قدرت این اتوترانسفورماتور را بدست آورید.

حل: ابتدا جریان سیم‌پیچ‌های اول و دوم ترانسفورماتور را بدست می‌آوریم:

$$|I_1| = \frac{24}{0.6} = 40 \text{ A}$$

$$|I_2| = \frac{24}{2.4} = 10 \text{ A}$$

$|I_2|$ همان جریان خروجی اتوترانسفورماتور I_{out} است. جریان ورودی نیز مطابق شکل (۲۵-۲ الف) به این ترتیب محاسبه می‌شود:

$$|I_{in}| = |I_1 + I_2| = 40 + 10 = 50 \text{ A}$$

ولتاژهای ورودی و خروجی اتوترانسفورماتور نیز برابرند با:

$$|V_{in}| = |V_1| = 0.6 \text{ KV}$$

$$|V_{out}| = |V_1 + V_2| = 2.4 + 0.6 = 3 \text{ KV}$$

با داشتن ولتاژها و جریانهای بدست آمده، قدرت نامی (ورودی و خروجی) این اتوترانسفورماتور بترتیب زیر بدست می‌آید:

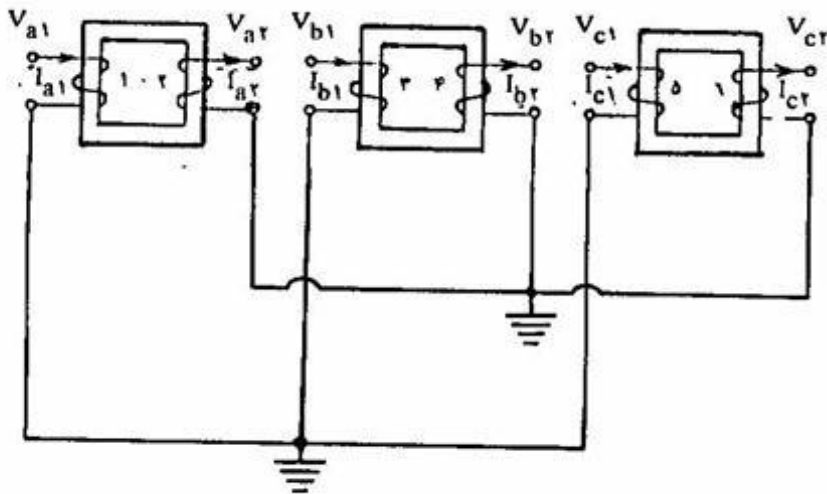
$$S_{in} = |V_{in}| |I_{in}| = 0.6 \times 50 = 30 \text{ KVA}$$

$$S_{out} = |V_{out}| |I_{out}| = 3 \times 10 = 30 \text{ KVA}$$

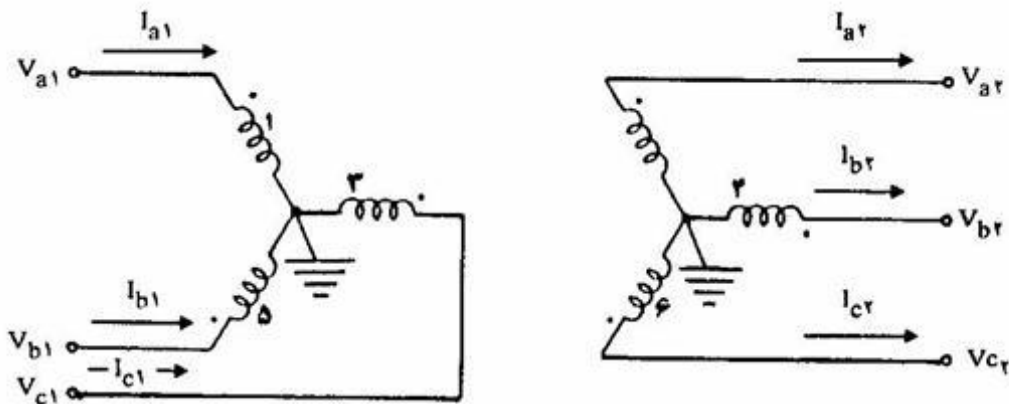
۱۲-۲ ترانسفورماتورهای سه فاز

از اتصال سه ترانسفورماتور یکفاز بیکدیگر ترانسفورماتور سه فاز بدست می‌آید، لیکن در نوع متداول ترانسفورماتورهای سه فاز مطابق شکل (۱۹-۲ ج) از یک هسته مغناطیسی سه فاز استفاده می‌شود. جمع شارهای مغناطیسی سه فاز در این هسته در هر لحظه برابر صفر است. بدیهی است که تلفات آهنی یک هسته سه فاز کمتر از سه هسته یکفاز است. این موضوع با اضافه صرفه‌جویی اقتصادی از مزایای ترانسفورماتور سه فاز با هسته مغناطیسی سه فاز است. از معایب این ترانسفورماتور این است که در صورتیکه خرابی در یکی از فازهای آن بوجود آید کل هسته باید تعویض گردد.

هر یک از سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه ترانسفورماتور سه فاز را می‌توان با اتصال ستاره Y و یا مثلث Δ بست. بنابراین این ترانسفورماتور سه فاز داری سه نوع اتصال Δ/Δ ، Y/Y و یا Y/Δ می‌باشد. نقطه صفر هر یک از اتصالات ستاره نیز ممکن است به زمین متصل شود. در شکل (۲۶-۲) ترانسفورماتور سه فازی با اتصال ستاره-ستاره نشان داده شده است. نقطه صفر این ستاره‌ها زمین شده است. این اتصال را با علامت $Y_{\downarrow}/Y_{\downarrow}$ نشان می‌دهیم.



(الف)

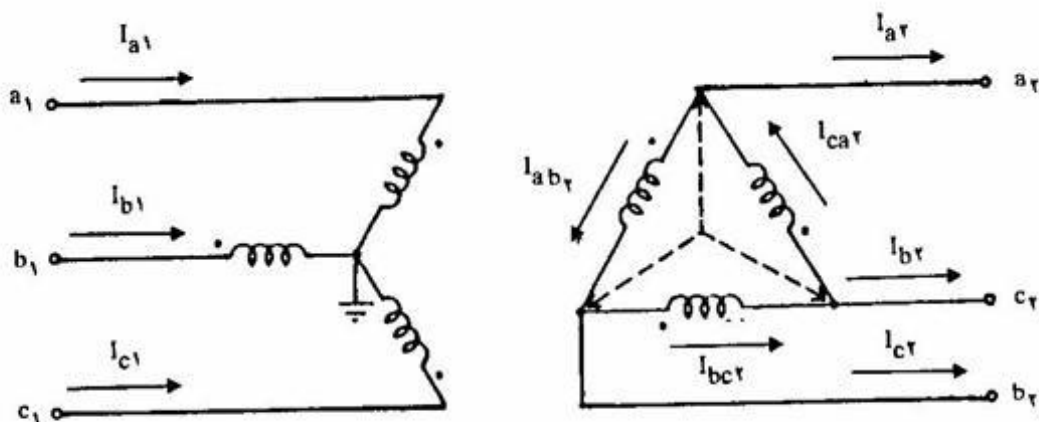


(ب)

شکل ۲-۲۶: ترانسفورماتور سه فاز با اتصال $Y_{\downarrow}/Y_{\downarrow}$.

V_{a1} و V_{b1} و V_{c1} ولتاژهای اولیه و V_{a2} و V_{b2} و V_{c2} ولتاژهای فازی ثانویه هستند. طبق شکل (۲۶-۲) ولتاژهای اولیه و ثانویه در هر فاز با یکدیگر همفاز هستند. بهمین ترتیب I_{a1} و I_{b1} و I_{c1} جریانهای اولیه و I_{a2} و I_{b2} و I_{c2} جریانهای ثانویه می‌باشند. جریانهای اولیه و ثانویه نیز در هر فاز با یکدیگر همفاز هستند.

یکی دیگر از اتصالات ترانسفورماتورها که کاربرد زیادی دارد ترانسفورماتور Δ/Δ است که شمای آن در شکل (۲۷-۲) دیده می‌شود. با کمی بررسی در شکل (۲۷-۲) مشاهده می‌شود که ولتاژ معادل فازی طرف مثلث V_{a2} از ولتاژ فازی طرف ستاره V_{a1} به اندازه 30° درجه عقب‌تر است. ولتاژهای خطی طرف مثلث نیز نسبت به ولتاژهای خطی همنام خود در طرف ستاره 30° درجه عقب‌تر هستند. بهمین ترتیب جریانهای خطی طرف مثلث از جریانهای خطی همنام خود در طرف ستاره 30° درجه عقب‌تر می‌باشند. این نتایج فقط در مورد نحوه اتصال شکل (۲۷-۲) صادق است و در صورتیکه نحوه اتصال سیم‌پیچ‌ها در ترانسفورماتور ستاره-مثلث تغییر کند (مثلاً سیم‌پیچ‌های اولیه و ثانویه برعکس بسته شوند) نتایج نیز تغییر خواهند کرد.



شکل ۲۷-۲: ترانسفورماتور سه فاز با اتصال Δ/Δ

برای تبدیل کردن امپدانس از یک طرف ترانسفورماتور سه فاز به طرف دیگر می‌توان امپدانس مذکور را همواره در توان دوم نسبت ولتاژهای خطی ضرب نمود و این موضوع به نوع اتصال ترانسفورماتور بستگی ندارد. روابط زیر صحت این مطلب را در سه نوع اتصال ثابت می‌کنند. در این روابط ابتدا راکتانس معادل ستاره سیم‌پیچ طرف اول (X_1) ، به اتصال سیم‌پیچ طرف اول تبدیل شده، سپس در توان دوم نسبت ولتاژهای فازی ضرب شده است و در انتها راکتانس بدست آمده به معادل ستاره سیم‌پیچ طرف دوم تبدیل گردیده است:

$$Y/Y : X_1 \left(\frac{V_2/\sqrt{3}}{V_1/\sqrt{3}} \right)^2 = X_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

$$\Delta/\Delta : X_1 (3) \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \frac{1}{3} = X_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

$$Y/\Delta : X_1 \left(\frac{V_2}{V_1/\sqrt{3}} \right)^2 \left(\frac{1}{3} \right) = X_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

در این روابط V_1 و V_2 بترتیب ولتاژهای خطی اولیه و ثانویه هستند.

۱۳-۲ مقادیر پریونیت در ترانسفورماتورها

اطلاعات مورد نیاز یک ترانسفورماتور، قدرت برحسب MVA، ولتاژ طرف فشار قوی و فشار ضعیف بر حسب KV و راکتانس پراکندگی آن برحسب PU و یا درصد می باشد. اگر راکتانس پراکندگی ترانسفورماتورها برحسب اهم داده شود باید مشخص گردد که این راکتانس ها تبدیل شده به طرف فشار قوی هستند و یا تبدیل شده به طرف فشار ضعیف. در سیستم های قدرت واقعی که چندین ترانسفورماتور و سطوح مختلف ولتاژ وجود دارند این وضعیت پیچیده تر می شود. استفاده از سیستم پریونیت مشکل مذکور را حل نموده و بطور قابل ملاحظه ای محاسبات سیستم های قدرت را در این رابطه آسان می کند.

اگر راکتانس پراکندگی یک ترانسفورماتور برحسب پریونیت و یا درصد داده شود لازم نیست مشخص شود که این راکتانس تبدیل شده به کدام طرف است. در حقیقت راکتانس پراکندگی برحسب پریونیت از دیدگاه هر دو سیم پیچ یکسان است. برای اثبات این موضوع ترانسفورماتوری با قدرت S و ولتاژ V_1/V_2 را در نظر بگیرید. امپدانس های مبنا در سیم پیچ های اول و دوم به این ترتیب بدست می آیند:

$$Z_{b1} = \frac{V_1^2}{S_b} \quad [\Omega] \quad , \quad Z_{b2} = \frac{V_2^2}{S} \quad [\Omega]$$

راکتانس های القائی تبدیل شده به طرف اول و دوم را برحسب اهم بترتیب با X_1 و X_2 نشان می دهیم. در اینصورت داریم:

$$X_2 = X_1 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \quad [\Omega]$$

راکتانس های پراکندگی برحسب PU تبدیل شده به طرف اول و دوم را بترتیب با X_{PU1} و X_{PU2}

نشان می‌دهیم که از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$X_{PU_1} = \frac{X_1}{Z_{b1}} = \frac{X_1}{V_1^2/S} = X_1 \frac{S}{V_1^2}$$

$$X_{PU_2} = \frac{X_2}{Z_{b2}} = \frac{X_2 (V_2/V_1)^2}{V_2^2/S} = X_2 \frac{S}{V_1^2}$$

همانطوریکه مشاهده می‌شود:

$$X_{PU_1} = X_{PU_2} \quad (۲-۶۵)$$

بنابر این از این بیعدراکتانس پراکندگی ترانسفورماتور را برحسب پریونیت و یا درصد بیان می‌کنیم که امپدانس مبنای این راکتانس از قدرت و ولتاژ نامی ترانسفورماتور بدست می‌آید.

مثال ۲-۴: یک ترانسفورماتور سه‌فاز با مشخصات زیر مفروض است:

$$X = \%۱۰ \quad ۲۳۰/۲۰KV \quad ۱۰۰MVA$$

امپدانس مبنا و راکتانس پراکندگی در هر طرف ترانسفورماتور را برحسب اهم بدست آورید.
حل: امپدانس‌های مبنا در هر طرف را بدست می‌آوریم:

$$Z_{b1} = \frac{V_1^2}{S} = \frac{۲۳۰^2}{۱۰۰} = ۵۲۹ \quad \Omega$$

$$Z_{b2} = \frac{V_2^2}{S} = \frac{۲۰^2}{۱۰۰} = ۰.۴ \quad \Omega$$

حال راکتانس‌های تبدیل شده به طرف اول و دوم را برحسب اهم محاسبه می‌کنیم:

$$X_1 = Z_{b1} X_{PU_1} = ۵۲۹ \times ۰.۱ = ۵۲.۹ \quad \Omega$$

$$X_2 = Z_{b2} X_{PU_2} = ۰.۴ \times ۰.۱ = ۰.۰۴ \quad \Omega$$

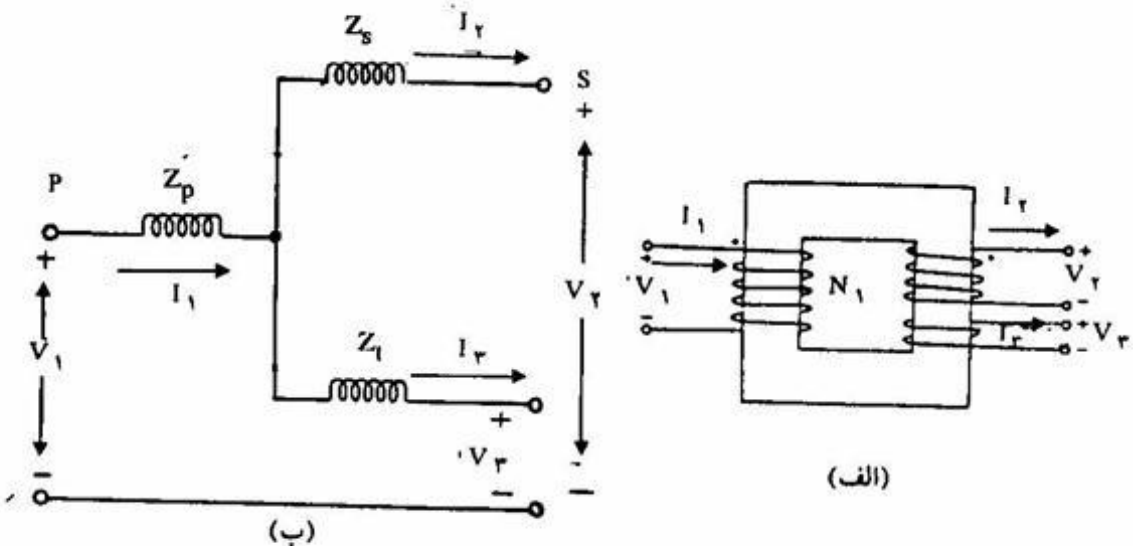
راکتانس X_r را برحسب X_1 از رابطه زیر نیز می‌توان بدست آورد:

$$X_r = X_1 \left(\frac{V_r}{V_1} \right)^2 = 52/9 \left(\frac{20}{230} \right)^2 = 0/4 \ \Omega$$

۲-۱۴ ترانسفورماتورهای سه سیم‌پیچ (۱)

ترانسفورماتورهای سه سیم‌پیچ در بسیاری از قسمت‌های سیستم‌های قدرت برای صرفه‌جویی در نصب دستگاهها بکار برده می‌شوند. در بیشتر موارد سیم‌پیچ‌های طرف اول و دوم این ترانسفورماتورها نقش اصلی را برای انتقال قدرت بازی می‌کنند و سیم‌پیچ سوم که معمولاً دارای قدرت کمی است برای تغذیه مصارف داخلی نیروگاهها و پست‌ها و یا نصب راکتورها و خازنها و امثالهم بکار می‌رود.

در ترانسفورماتور با دو سیم‌پیچ قدرت نامی در هر دو طرف یکسان است، در صورتیکه در ترانسفورماتور با سه سیم‌پیچ قدرت نامی هر سه طرف با یکدیگر متفاوت است. در شکل (۲-۲۸) یک فاز ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ و مدار معادل یک فاز آن نشان داده شده‌است. در این مدار نقطه صفر ستاره وجود خارجی نداشته و کاملاً فرضی است و ارتباطی با نقطه صفر سیستم ندارد.



شکل ۲-۲۸: ترانسفورماتور با سه سیم‌پیچ و مدار معادل آن

امپدانس‌هایی که معمولاً با آزمایش‌های استاندارد بدست می‌آیند عبارتند از:
 Z_{ps} = امپدانس طرف اول با اتصال کوتاه طرف دوم و مدار باز طرف سوم
 Z_{pt} = امپدانس طرف اول با اتصال کوتاه طرف سوم و مدار باز طرف دوم
 Z_{st} = امپدانس طرف دوم با اتصال کوتاه طرف سوم و مدار باز طرف اول

امپدانس‌های Z_{ps} و Z_{pt} در طرف اول برحسب اهم اندازه‌گیری می‌شوند. بنابراین برای پیدا کردن مقدار آنها برحسب PU، امپدانس مبنای مربوط به این مقادیر را باید از قدرت و ولتاژ طرف اول بدست آورد. امپدانس Z_{st} در طرف دوم برحسب اهم اندازه‌گیری می‌شود و برای تعیین مقدار آن برحسب PU، امپدانس مبنای از قدرت و ولتاژ طرف دوم بدست می‌آید. برای مثال فرض کنید راکتانس پراکنندگی ترانسفورماتور سه سیم‌پیچ‌های بترتیب زیر اندازه‌گیری شده‌اند:

$$Z_{ps} = 64 \ \Omega$$

$$Z_{pt} = 51/2 \ \Omega$$

$$Z_{st} = 12/7 \ \Omega$$

قدرت‌های نامی و ولتاژهای نامی این ترانسفورماتور مطابق زیر است:

$$400/230/20 \text{ KV} \quad 250/200/50 \text{ MVA}$$

امپدانس‌های مبنای در طرف اول و دوم عبارتند از:

$$Z_{b1} = \frac{V_1^2}{S} = \frac{400^2}{250} = 640 \ \Omega$$

$$Z_{b2} = \frac{V_2^2}{S_2} = \frac{230^2}{200} = 264/5 \ [\Omega]$$

راکتانس‌های پراکنندگی X_{ps} و X_{pt} برحسب PU، بر مبنای مقادیر نامی طرف اول عبارتند از:

$$X_{ps} = \frac{64}{640} = 0/1 \text{ PU} = \%10$$

$$X_{pt} = \frac{51/2}{640} = 0/08 \text{ PU} = \%8$$

راکتانس پراکنده X_{st} برحسب PU، بر مبنای مقادیر نامی طرف دوم تعیین می‌شود که برابر است با:

$$X_{st} = \frac{12/7}{264/5} = 0/048 \text{ PU} = \%4/8$$

معمولاً برای سهولت در محاسبات بعدی سیستم، چون برای کل سیستم قدرت یک مبنا انتخاب خواهد شد بهتر است X_{st} را نیز به مبنای قدرت طرف اول تبدیل نمود. برای اینکار داریم:

$$X_{st} = 0/048 \times \frac{250}{200} = 0/06 \text{ PU} = \%6$$

اکثر اوقات سه راکتانس X_{st} ، X_{pt} ، X_{ps} به قدرت مبنای ۱۰۰MVA تبدیل شده و اطلاعات راکتانس‌ها در این قدرت مبنا داده می‌شوند. در مثال فوق‌الذکر، این راکتانس‌ها در قدرت مبنای ۱۰۰MVA برابرند با:

$$X_{ps} = 0/1 \times \frac{100}{250} = 0/04 \text{ PU} = \%4$$

$$X_{pt} = 0/08 \times \frac{100}{250} = 0/032 \text{ PU} = \%3/2$$

$$X_{st} = 0/06 \times \frac{100}{250} = 0/024 \text{ PU} = \%2/4$$

در شکل (۲۸-۲ ب) مدار معادل یک ترانسفورماتور سه سیم پیچ نشان داده شده است. اگر امپدانس‌های طرف اول، دوم و سوم را به ترتیب با Z_p ، Z_s ، Z_1 نشان دهیم داریم:

$$Z_{ps} = Z_p + Z_s$$

$$Z_{pt} = Z_p + Z_1$$

$$Z_{st} = Z_s + Z_1$$

با حل این سه معادله برای Z_1 ، Z_s ، Z_p خواهیم داشت:

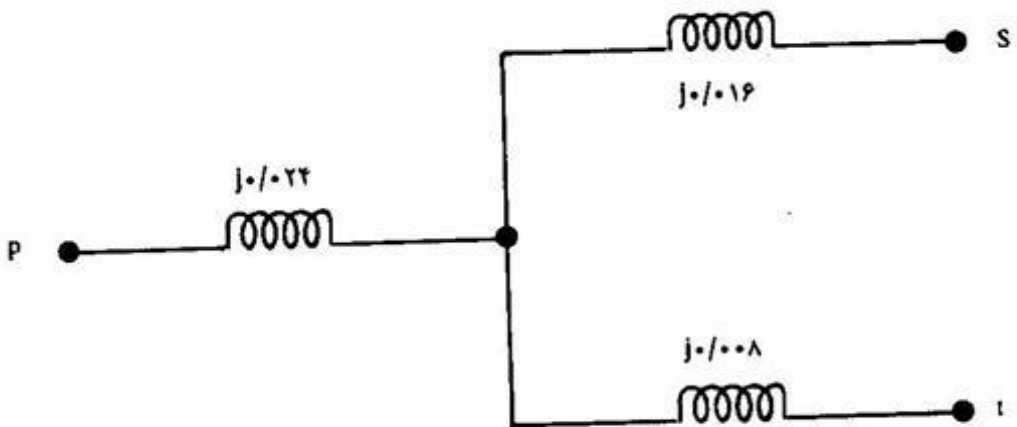
$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{1}{3} (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= \frac{1}{3} (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= \frac{1}{3} (Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned} \quad (2-66)$$

باید دقت نمود که فقط هنگامی می توان Z_{st} ، Z_{pt} ، Z_{ps} را در روابط (۲-۶۶) قرار داد که این مقادیر در قدرت مبنای یکسان برحسب PU در دسترس باشند. با استفاده از این روابط می توان Z_p ، Z_s ، Z_t را بدست آورد. معمولاً این امپدانس ها بعنوان اطلاعات یک ترانسفورماتور سه سیم پیچه برحسب PU در قدرت مبنای ۱۰۰ MVA داده می شوند و احتیاجی به محاسبه این مقادیر برحسب Z_{st} ، Z_{pt} ، Z_{ps} نمی باشد. در مثال قبل داریم:

$$Z_p = \frac{1}{3} j(0/0.4 + 0/0.32 - 0/0.24) = j0/0.24 \text{ PU}$$

$$Z_s = \frac{1}{3} j(0/0.4 + 0/0.24 - 0/0.32) = j0/0.16 \text{ PU}$$

$$Z_t = \frac{1}{3} j(0/0.24 + 0/0.32 - 0/0.4) = j0/0.08 \text{ PU}$$



شکل ۲-۲۹: مدار معادل ترانسفورماتور سه سیم پیچه در قدرت مبنای ۱۰۰ MVA

در شکل ۲-۲۹ مدار معادل ترانسفورماتور سه سیم پیچه در قدرت مبنای ۱۰۰ MVA رسم شده است و مقادیر راکتانس های Z_p ، Z_s ، Z_t برحسب PU روی آن مشخص شده است.

۱۵-۲ مدل بار

قدرت تولید شده در نیروگاهها، از طریق ترانسفورماتورها و خطوط انتقال به مصرف کننده‌ها می‌رسد. بطور کلی کلمه "بار"^(۱) به دستگاه یا ترکیبی از دستگاهها اطلاق می‌شود که از شبکه انرژی جذب می‌نماید. در عمل محدوده مصرف بارها لامپهای چند وات تا موتورهای القائی^(۲) چندین مگاوات را شامل می‌شود. روشنائی، هیترها، موتورهای الکتریکی و ... انواع بارها را تشکیل می‌دهند. بعلت پراکندگی و تنوع بارها، منظور نمودن یک یک آنها در نقاط مختلف شبکه‌های توزیع و انتقال برای محاسبات شبکه امکان‌پذیر نمی‌باشد. به این دلیل معمولاً روی هر یک از شین‌های سیستم انتقال، بارهای منطقه مربوطه را بصورت یک بار متمرکز نشان می‌دهیم. این بار متمرکز در حقیقت ترکیبی از بارهای امپدانس، موتورهای القائی، موتورهای سنکرون و غیره می‌باشد.

مشخصه اصلی یک بار توان اکتیو مصرفی آنست. مصرف کننده‌ها علاوه بر توان اکتیو دارای مصرف توان راکتیو نیز هستند که قسمت اعظم مصرف این توان بواسطه وجود موتورهای القائی در بار مرکب می‌باشد. بنابر این برای یک بار مرکب که بطور متمرکز روی یک شین منظور می‌گردد می‌توان قدرت اکتیو، ولتاژ و ضریب قدرت را مشخص نمود. در اینصورت چنانچه P نشان دهنده قدرت اکتیو مصرفی بار و $\cos\Phi$ ضریب قدرت بار باشد، قدرت راکتیو مصرفی Q از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Q = P \tan\Phi \quad (۲-۶۷)$$

و بنابر این قدرتهای اکتیو و راکتیو و ولتاژ می‌توانند مشخصات بار را تشکیل دهند. میزان قدرت مصرفی اکتیو و راکتیو بارها در ساعات مختلف شبانه روز متغیر است. همچنین هرگونه تغییری در فرکانس و ولتاژ شبکه می‌تواند توان اکتیو و راکتیو مصرفی بارها را تغییر دهد. وابستگی این توانها را نسبت به تغییرات فرکانس f و تغییرات $|V|$ می‌توان مطابق زیر بیان نمود:

$$P = P(f, |V|)$$

$$Q = Q(f, |V|)$$

بر اثر تغییرات کوچک در فرکانس Δf ، و یا تغییرات کوچک در ولتاژ $\Delta |V|$ قدرت‌های اکتیو و راکتیو تغییر می‌نمایند که میزان تغییر آنها برابر است با:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial P}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-68)$$

$$\Delta Q = \frac{\partial Q}{\partial f} \Delta f + \frac{\partial Q}{\partial |V|} \Delta |V| \quad (2-69)$$

مشتق‌های $\frac{\partial P}{\partial f}$ ، $\frac{\partial P}{\partial |V|}$ ، $\frac{\partial Q}{\partial f}$ ، $\frac{\partial Q}{\partial |V|}$ به نوع بار و درصد ترکیب بارها در یک بار مرکب بستگی دارند. این مشتق‌ها که حساسیت تغییر توان‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بارها را برحسب تغییرات فرکانس و ولتاژ نشان می‌دهند، برای هر منطقه و یا شین با توجه به درصد ترکیب بارها قابل تعیین و اندازه‌گیری هستند. در صورت مشخص بودن این کمیت‌ها، بر اثر تغییرات کوچک ولتاژ و یا فرکانس می‌توان تغییر قدرت‌های اکتیو و راکتیو مصرفی بارها را بدست آورد. چنانچه فقط فرکانس تغییر نماید و ولتاژ ثابت باشد رابطه (۲-۶۸) به این صورت نوشته می‌شود:

$$\Delta P = \frac{\partial P}{\partial f} \Delta f = D \Delta f \quad (2-70)$$

که در آن ضریب D (حساسیت توان مصرفی بار نسبت به فرکانس) بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$D = \frac{\partial P}{\partial f} \quad [PUMW/HZ] \quad (2-71)$$

در رابطه اخیر قدرت برحسب PUMW و فرکانس برحسب HZ جایگزین شده‌اند و واحد D ، PUMW/HZ می‌باشد. از این ضریب بعداً در بحث کنترل فرکانس سیستم‌های قدرت استفاده خواهیم کرد.

در یک بار مرکب نحوه تغییر قدرت‌های اکتیو و راکتیو برحسب تغییرات ولتاژ و فرکانس از روش‌های تحلیلی امکان پذیر نیست و از طرفی به نوع ترکیب و به میزان درصد عناصر تشکیل دهنده بار بستگی دارد. مثلاً برای یک بار مرکب شامل ۶۰ درصد موتورهای القائی، ۲۰ درصد موتورهای سنکرون و ۲۰ درصد جمع بارهای دیگر (مثلاً امپدانس) آزمایش نشان می‌دهد که به ازاء یک درصد افزایش ولتاژ، قدرت اکتیو یک درصد و قدرت راکتیو ۱/۳ درصد

افزایش می‌یابند. همچنین به ازاء یک درصد افزایش فرکانس، قدرت اکتیو یک درصد افزایش می‌یابد.

چنانچه روابط قدرت مصرفی برحسب فرکانس را برای یک موتور القائی و یک بار امپدانس بنویسیم، مشاهده خواهیم کرد که قدرت اکتیو مصرفی موتورهای القائی با افزایش فرکانس افزایش می‌یابد، درحالیکه دربار امپدانس افزایش فرکانس باعث کاهش قدرت اکتیو مصرفی می‌شود. مثال زیر این موضوع را در مورد بار امپدانس نشان می‌دهد. دانشجویان گرامی می‌توانند این موضوع را در مورد موتور القائی تحقیق نمایند.

مثال ۲-۵: یک بار ساده امپدانس را در نظر بگیرید. قدرت مصرفی بار P ، ولتاژ نامی آن V و ضریب قدرت آن $\cos\Phi$ می‌باشد. مدل این بار را بصورت یک امپدانس بدست آورید. معادلات P و Q بار را برحسب فرکانس و ولتاژ بدست آورده، چنانچه $\cos\Phi = 0.85$ پس فاز باشد، میزان تغییر قدرت اکتیو بار را بر اثر یک درصد تغییر در ولتاژ و همچنین یک درصد تغییر فرکانس محاسبه کنید.

حل: ابتدا قدرت ظاهری بار S را بدست می‌آوریم:

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

مدار معادل چنین باری یک امپدانس سری شامل مقاومت اهمی R و راکتانس القائی X می‌باشد بنحوی که می‌توان نوشت:

$$R + jX = \frac{|V|^2}{S} \angle\Phi = \frac{|V|^2}{S} \cos\Phi + j \frac{|V|^2}{S} \sin\Phi \quad (2-72)$$

قدرت مختلط بار برحسب R و X را می‌توان به این صورت نوشت:

$$S = P + jQ = VI^* = V\left(\frac{V}{Z}\right)^* = \frac{|V|^2}{Z^*} = \frac{|V|^2}{R - jX} = |V|^2 \frac{R + jX}{R^2 + X^2}$$

به این ترتیب P و Q بدست می‌آیند:

$$P = \frac{|V|^2 R}{R^2 + X^2} = \frac{|V|^2 R}{R^2 + (2\pi f L)^2} \quad (2-73)$$

$$Q = \frac{|V|^2 X}{R^2 + X^2} = \frac{|V|^2 2\pi fL}{R^2 + (2\pi fL)^2} \quad (2-74)$$

همانطوریکه مشاهده می شود قدرت های اکتیو و راکتیو بار امپدانس با توان دوم ولتاژ نسبت مستقیم دارند. این روابط همچنین وابستگی این دو قدرت و نوع تغییر آنها را برحسب فرکانس نشان می دهند.

برای تعیین میزان تغییر قدرت اکتیو نسبت به یک درصد تغییر ولتاژ، با استفاده از رابطه (۲-۷۳) داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta |V|} &\approx \frac{\partial P}{\partial |V|} = 2|V| \frac{R}{R^2 + X^2} = 2|V| \frac{R}{|Z|^2} = 2|V| \frac{1}{|Z|} \frac{R}{|Z|} \\ &= 2|V| \frac{S}{|V|^2} \cos\Phi = 2 \frac{1}{|V|} S \cos\Phi = \frac{2P}{|V|} \\ \frac{\Delta P}{P} &\approx 2 \frac{\Delta |V|}{|V|} \end{aligned} \quad (2-75)$$

بنابر این یک درصد تغییر ولتاژ $\frac{|\Delta V|}{|V|} = 0.01$ ، دو درصد قدرت اکتیو را تغییر می دهد. چنانچه از رابطه (۲-۷۳) برحسب f مشتق بگیریم، داریم:

$$\begin{aligned} \frac{\Delta P}{\Delta f} &\approx \frac{\partial P}{\partial f} = -|V|^2 \frac{2\pi RLX}{(R^2 + X^2)^2} = -|V|^2 \frac{2RX^2}{f(R^2 + X^2)^2} \\ &= -PR \frac{2RX^2}{f(R^2 + X^2)^2} = -P \frac{2X^2}{f(R^2 + X^2)} \end{aligned}$$

بنابر این:

$$\frac{\Delta P}{P} = -2 \frac{X^2}{R^2 + X^2} \frac{\Delta f}{f} = -2 \sin^2\Phi \frac{\Delta f}{f}$$

یعنی یک درصد تغییر فرکانس $\frac{\Delta f}{f} = 0.01$ ، قدرت اکتیو را به میزان $2 \sin^2\Phi$ درصد کاهش می دهد. در این مثال $\cos\Phi = 0.85$ و $\sin\Phi = 0.5268$ می باشند لذا داریم:

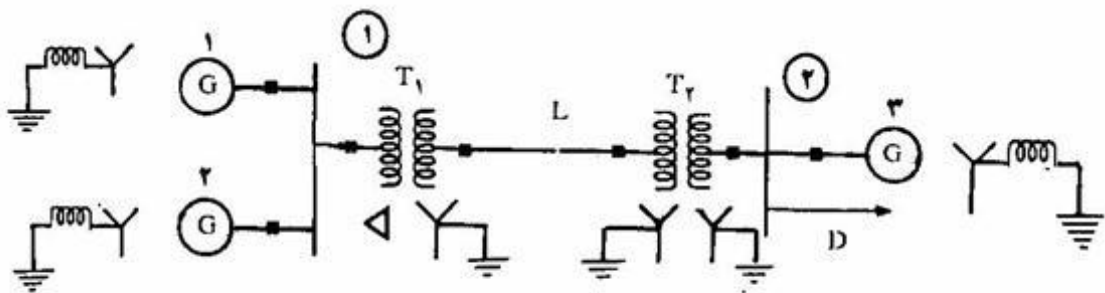
$$\frac{\Delta P}{P} = -0.555 \frac{\Delta f}{f} \quad (2-76)$$

یعنی یک درصد افزایش فرکانس تقریباً $0/555$ درصد قدرت مصرفی بار را کاهش می‌دهد.

۱۶-۲ دیاگرام امپدانس سیستم‌های قدرت

تا اینجا مدل عناصر سیستم‌های قدرت نظیر ماشینهای سنکرون، ترانسفورماتورها، خطوط انتقال و بارها را مورد بررسی قرار داده‌ایم. مدار معادل کل سیستم از اتصال مدل این عناصر بیکدیگر بدست می‌آید. این مدار معادل را دیاگرام امپدانس^(۱) می‌نامیم. دیاگرام امپدانس یک سیستم قدرت فقط برای یک فاز رسم می‌شود و رسم دو فاز دیگر اطلاعات بیشتری را در اختیار ما قرار نمی‌دهد.

در شکل (۲-۳۰) دیاگرام تک خطی^(۲) یک سیستم قدرت نشان داده شده‌است. نوع اتصال ترانسفورماتورها و همچنین ژنراتورها در روی دیاگرام تک خطی مشخص شده‌است. کلیدهای قدرت^(۳) نیز در نقاط مختلف بوسیله مربع‌های کوچکی نمایش داده شده‌اند.



شکل ۲-۳۰: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت

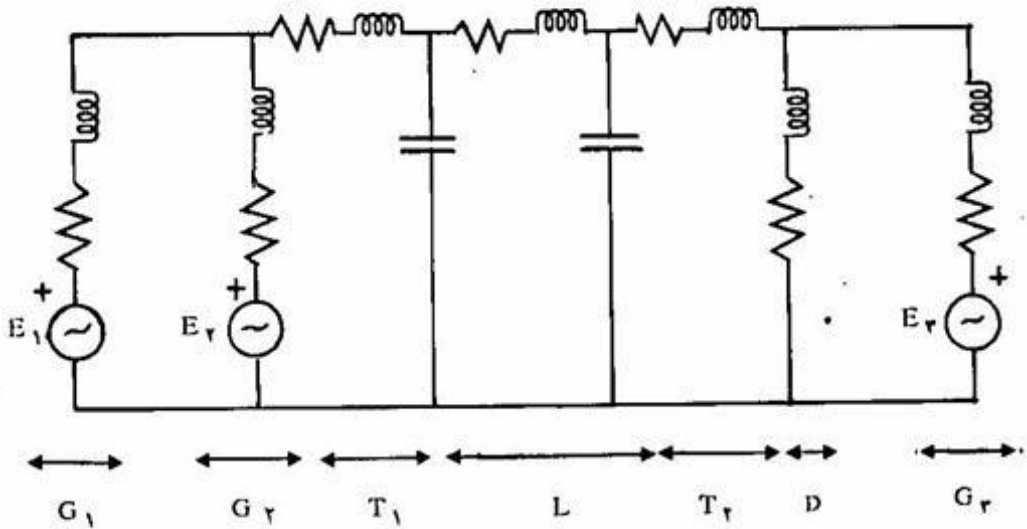
نقطه صفر بیشتر ترانسفورماتورهای موجود در سیستم‌ها مستقیماً به زمین متصل می‌گردد. همچنین نقطه صفر ژنراتورها مطابق شکل (۲-۳۰) اغلب بوسیله یک راکتانس زمین می‌شود تا بر اثر اتصال کوتاه یک فاز به زمین، ولتاژ دو فاز دیگر آن بالا نرود و در ضمن جریان اتصال کوتاه یک فاز به زمین نیز محدود گردد.

با استفاده از مدل عناصر سیستم، مدار معادل کل سیستم (دیاگرام امپدانس) بدست می‌آید. شکل (۲-۳۱) دیاگرام امپدانس مربوط به سیستم قدرت (۲-۳۰) را نشان می‌دهد.

1- Impedance Diagram

2- One-Line Diagram

3- Circuit Breaker



شکل ۲-۳۱: دیاگرام امپدانس مربوط به سیستم قدرت شکل (۲-۳۰)

در رسم دیاگرام امپدانس شکل (۲-۳۱) موارد زیر در نظر گرفته می‌شود:

۱- مدار معادل ماشینهای سنکرون (ژنراتور و موتور) با نیروی محرکه و امپدانس سنکرون آنها نمایش داده می‌شود. این مدار معادل در محاسبات حالت ماندگار سیستم مانند محاسبات پخش بار (بارداری سیستم)، پایداری و اتصال کوتاه ماندگار بکار می‌رود. در محاسبات پایداری گذرا و همچنین اتصال کوتاه در فاصله زمانی گذرا از X_d' بجای X_s استفاده می‌شود. در محاسبات اتصال کوتاه زیر گذرا نیز از راکتانس محور مستقیم زیر گذرا X_d'' بجای X_s استفاده می‌شود. ضمناً در محاسبات اتصال کوتاه اغلب اوقات از مقاومت اهمی آرمیچر صرفنظر می‌شود و مدار معادل کاملاً سلفی در نظر گرفته می‌شود.

۲- در مدار معادل رسم شده در شکل (۲-۳۱) برای ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 از جریان مغناطیس کننده صرفنظر شده است. این تقریب کاملاً قابل قبول بوده و در رسم دیاگرام امپدانس مدل ترانسفورماتور فقط با مقاومت اهمی معادل سیم پیچها R و راکتانس القایی پراکنندگی معادل X نشان داده می‌شود. در محاسبات اتصال کوتاه نیز اغلب از مقاومت اهمی در مقایسه با راکتانس پراکنندگی صرفنظر می‌گردد.

۳- در مدار معادل خطوط انتقال از مدار اسمی π استفاده می‌شود که در شکل (۲-۳۱) برای خط انتقال L نشان داده شده است، در محاسبات اتصال کوتاه از کاپاسیتانس و مقاومت اهمی خطوط صرفنظر می‌شود، لیکن در محاسبات پخش بار، و دیگر محاسبات ماندگار سیستم از مدار کامل π استفاده می‌گردد.

۴- مدار معادل بار موجود در شین ۲ بصورت یک امپدانس شامل مقاومت اهمی و راکتانس القائی رسم شده است. البته در اینجا فرض شده است که بار سیستم فاقد موتورهای الکتریکی بوده و کاملاً امپدانسی است. چنانچه بار سیستم مرکب باشد، باید مدل دقیق بار منظور گردد. در اغلب محاسبات شبکه مدل بار مرکب بصورت کمیت‌های توان اکتیو (P) و توان راکتیو (Q) در نظر گرفته می‌شود.

کلیه امپدانس‌های نشان داده شده در شکل (۲-۳۱) باید برحسب PU و در قدرت مبنای یکسان مشخص گردد. برای این کار باید در نظر داشت که امپدانس هر یک از عناصر در ولتاژ مبنای و قدرت مبنای مشخصی معلوم است. حال برای کل شبکه یک قدرت مبنای یکسان انتخاب می‌کنیم. این مقدار مبنای در اغلب سیستم‌ها ۱۰۰ MVA انتخاب می‌شود. سپس ولتاژ مبنای را در یک نقطه دلخواه از سیستم انتخاب می‌کنیم. ولتاژ مبنای نقاط دیگر اجباراً با استفاده از نسبت تبدیل ترانسفورماتورها بدست می‌آیند. پس از انتخاب قدرت مبنای و ولتاژهای مبنای، اگر ولتاژ نامی و قدرت نامی هر یک از عناصر شبکه با مقادیر مبنای انتخاب شده متفاوت باشند در اینصورت باید امپدانس آن عنصر برحسب PU را طبق رابطه (۲-۴۳) به مبنای جدید تبدیل نمود.

مثال ۲-۶: در سیستم قدرت شکل (۲-۳۰) مشخصات عناصر سیستم بشرح زیر است:

$$\begin{aligned} \text{ژنراتور } G_1 &: 20 \text{ MVA} , 6/6 \text{ KV} , X''_d = 25\% \text{ و} \\ \text{ژنراتور } G_2 &: 30 \text{ MVA} , 6/6 \text{ KV} , X''_d = 25\% \text{ و} \\ \text{ژنراتور } G_3 &: 30 \text{ MVA} , 3/11 \text{ KV} , X''_d = 20\% \text{ و} \\ \text{ژنراتور } T_1 &: 50 \text{ MVA} , 66/6/3 \text{ KV} , X = 10\% \text{ و} \end{aligned}$$

ترانسفورماتور T_1 از سه ترانسفورماتور یکفاز با مشخصات زیر تشکیل شده است:

$$\begin{aligned} X &= 12\% \text{ و} \quad 36/4/2/2 \text{ KV} , \quad 10 \text{ MVA} \\ \text{خط انتقال } L &: X = 9/56 \Omega \end{aligned}$$

$$\text{بار } D : 60 \text{ MW} , 3/11 \text{ KV} , \text{ و } \cos\phi = 0/8 \text{ پس فاز}$$

دیگرام امپدانس سیستم را در قدرت مبنای ۵۰ MVA رسم نمائید و مقادیر راکتانس‌ها را برحسب PU روی آن مشخص نمائید. ولتاژ مبنای در شین ۱ را ۶/۶ KV در نظر بگیرید.

۶۳

حل: ترانسفورماتور T_1 از سه ترانسفورماتور یکفاز تشکیل شده است. برای اینکه اطلاعات ترانسفورماتور سه فاز T_1 بدست آید، باید قدرت سه فاز و ولتاژهای خطی آنرا تعیین کنیم. قدرت سه فاز این ترانسفورماتور سه برابر قدرت ترانسفورماتوریکفاز است و این مقدار برابر است با:

$$S = 3 \times 10 = 30 \text{ MVA}$$

ولتاژهای خطی ترانسفورماتور سه فاز T_1 با توجه به اتصال سیم پیچ های فشار قوی و فشار ضعیف آن که هر دو ستاره هستند، عبارتست از:

$$36/\sqrt{3} / 2/\sqrt{3} = 63/3/81 \text{ KV}$$

بنابر این ترانسفورماتور T_1 دارای اطلاعات زیر می باشد:

$$X = 12\% \quad \text{و} \quad 63/3/81 \text{ KV} \quad , \quad 30 \text{ MVA}$$

ولتاژها در نقاط مختلف سیستم بترتیب زیر بدست می آیند:

$$V_b = 6/6 \text{ KV} \quad \text{در شین ۱}$$

$$= 6/6 \times \frac{66}{6/3} = 69/14 \quad \text{در خط انتقال}$$

$$= 69/14 \times \frac{3/81}{63} = 4/18 \quad \text{در شین ۲}$$

حال راکتانس زیرگذرای ژنراتورها در مبنای انتخاب شده را بدست می آوریم:

$$G_1 : \quad X''_d = 0/25 \times \frac{50}{20} = 0/625 \text{ PU}$$

$$G_2 : \quad X''_d = 0/25 \times \frac{50}{30} = 0/4167 \text{ PU}$$

$$G_3 : \quad X''_d = 0/2 \times \frac{50}{30} \times \left(\frac{3/81}{4/18}\right)^2 = 0/277 \text{ PU}$$

بهمین ترتیب راکتانس پراکندگی ترانسفورماتورها را تعیین می‌کنیم:

$$T_1: \quad X = 0.1 \times \left(\frac{6/3}{6/6}\right)^2 = 0.0911 \text{ PU}$$

$$T_2: \quad X = 0.12 \times \frac{50}{30} \times \left(\frac{3/81}{4/18}\right)^2 = 0.166 \text{ PU}$$

امپدانس مبنای خط انتقال و راکتانس آن برحسب PU نیز بترتیب زیر محاسبه می‌شود:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{69/14^2}{50} = 95/6 \Omega$$

$$X = \frac{9/56}{95/6} = 0.1 \text{ PU}$$

اگر مدار معادل بار را امپدانس معادل $R + jX$ در نظر بگیریم داریم:

$$S = \frac{P}{\cos\Phi} = \frac{60}{0.8} = 75 \text{ MVA}$$

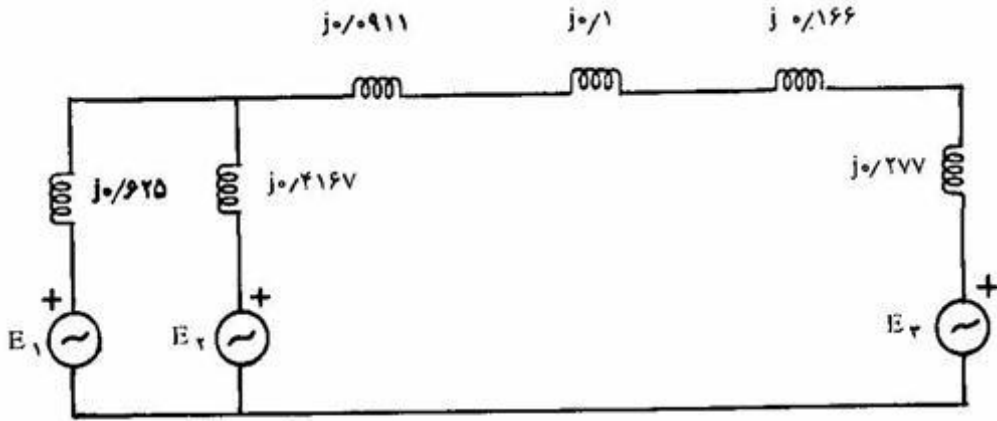
$$|Z| = \frac{V^2}{S} = \frac{3/81^2}{75} = 0.1935 \Omega$$

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{4/18^2}{50} = 0.349 \Omega$$

$$|Z| = \frac{0.1935}{0.349} = 0.555 \text{ PU}$$

$$Z = |Z| \angle \Phi = 0.555 \angle \cos^{-1} 0.8 = 0.244 + j0.333 \text{ PU}$$

با توجه به مقادیر بدست آمده، دیاگرام امپدانس سیستم قدرت در شکل (۲-۳۲) رسم شده است. مقادیر نوشته شده روی راکتانس‌ها برحسب پریونیت می‌باشند. همانطوریکه مشاهده می‌شود از مقاومت‌های اهمی ژنراتورها، ترانسفورماتورها و خط انتقال و همچنین از کاپاسیتانس خط انتقال در رسم این دیاگرام صرف‌نظر شده است. مدار معادل بار نیز در این شکل رسم نشده است. بنابر این دیاگرام رسم شده می‌تواند برای محاسبات اتصال کوتاه مفید و مورد نظر باشد.



شکل ۲-۳۲: دیاگرام امپدانس سیستم قدرت شکل (۲-۳۰) در قدرت ۵۰ MVA

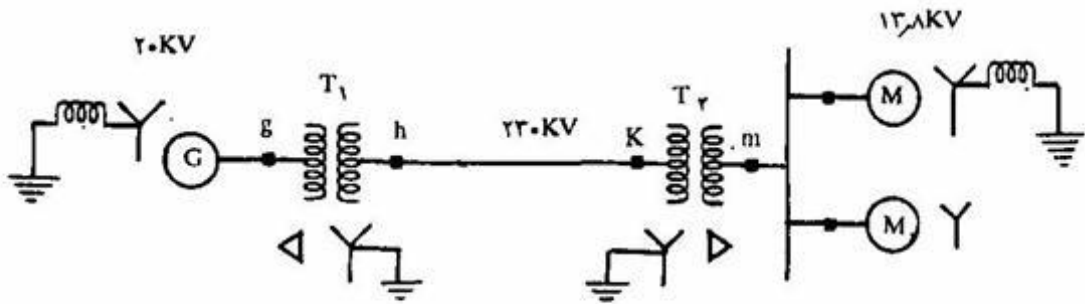
مثال ۲-۷ دیاگرام تک خطی سیستم قدرتی در شکل (۲-۳۳) نشان داده شده است. مشخصات این سیستم بشرح زیر است:

- ژنراتور سنکرون G_1 : ۳۰۰ MVA ، ۲۰ KV ، $X''_d = \%20$ و
- موتور سنکرون M_1 : ۲۰۰ MVA ، ۱۳/۲ KV ، $X''_d = \%20$ و
- موتور سنکرون M_2 : ۱۰۰ MVA ، ۱۳/۲ KV ، $X''_d = \%20$ و
- ترانسفورماتور T_1 : ۳۵۰ MVA ، ۲۳۰/۲۰ KV ، $X = \%10$ و

ترانسفورماتور T_1 از سه ترانسفورماتور یکفاز با قدرت ۱۰۰ MVA ، ولتاژهای ۱۲۷/۱۳/۲ KV و راکتانس پراکندگی ۱۰ درصد تشکیل شده است. راکتانس سری خط انتقال ۳۲۵Ω است.

اولاً - دیاگرام امپدانس این سیستم را در قدرت مبنای ۳۰۰ MVA رسم کنید. ولتاژ مبنا در مدار ژنراتور را ۲۰ KV در نظر بگیرید.

ثانیاً - اگر موتورهای M_1 و M_2 بترتیب ۱۲۰ و ۶۰ مگاوات در ولتاژ ۱۳/۲ KV و ضریب قدرت یک مصرف نمایند ولتاژ ترمینالهای خروجی ژنراتور را محاسبه کنید. همچنین قدرت های اکتیو و راکتیو تولدی ژنراتور را بدست آورید.



شکل ۲-۳۳: دیاگرام تک خطی سیستم قدرت مربوطه به مثال (۲-۷)

حل: اولاً - قدرت نامی ترانسفورماتور سه فاز T_2 برابر است با:

$$S = 3 \times 100 = 300 \text{ MVA}$$

و ولتاژهای خطی آن نیز عبارتند از:

$$\sqrt{3} \times 127 / 13/2 = 220 / 13/2 \text{ KV}$$

در اینجا باید دقت نمود که چون طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور T_2 دارای اتصال مثلث است، ولتاژ هر فاز آن (13/2 KV) در ضریب $\sqrt{3}$ ضرب نشده است. ولتاژ مبنا در نقاط مختلف سیستم به قرار زیر است:

$$V_b = 20 \text{ KV} \quad \text{در مدار ژنراتور}$$

$$= 230 \text{ KV} \quad \text{در خط انتقال}$$

$$= 230 \times \frac{13/2}{220} = 13/8 \quad \text{در مدار موتور}$$

ولتاژهای مبنا در دیاگرام تک خطی شکل (۲-۳۳) در داخل پرانتز نشان داده شده‌اند. راکتانس ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 در مبنای انتخاب شده عبارتند از:

$$T_1: \quad X = 0.1 \times \frac{300}{250} = 0.12 \text{ PU}$$

$$T_r: X = 0.1 \times \left(\frac{13/2}{13/8}\right)^2 = 0.0915 \text{ PU}$$

راکتانس خط انتقال برحسب PU را بترتیب زیر محاسبه می‌کنیم:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} = \frac{230^2}{300} = 176/3 \Omega$$

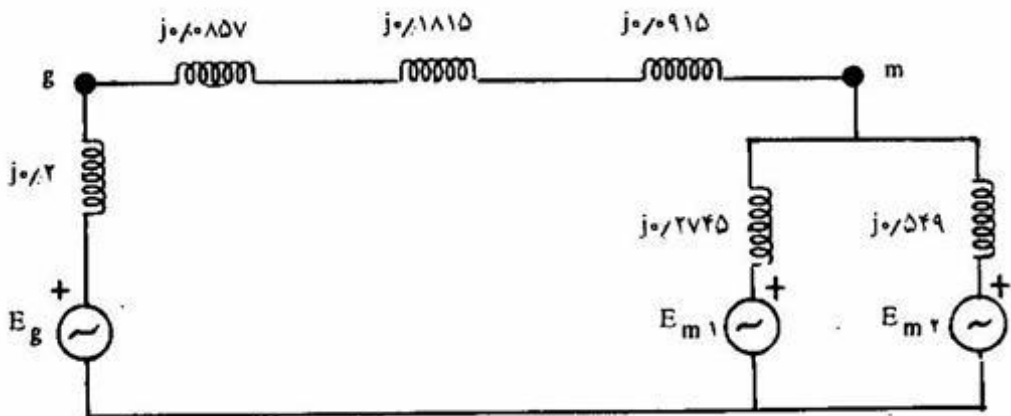
$$X = \frac{32}{176/3} = 0.1815 \text{ PU}$$

ولتاژ نامی و قدرت نامی ژنراتور همان مقادیر مبنای انتخاب شده هستند لذا راکتانس ژنراتور ۰/۲PU می‌باشد. حال راکتانس موتورهای سنکرون را محاسبه می‌کنیم:

$$M_1: X = 0.2 \times \frac{300}{200} \times \left(\frac{13/2}{13/8}\right)^2 = 0.2745 \text{ PU}$$

$$M_r: X = 0.2 \times \frac{300}{100} \times \left(\frac{13/2}{13/8}\right)^2 = 0.549 \text{ PU}$$

با توجه به مقادیر بدست آمده، دیاگرام امپدانس در شکل (۲-۳۴) رسم شده است:



شکل ۲-۳۴: دیاگرام امپدانس مربوط به سیستم قدرت شکل (۲-۳۳)

ثانیاً - موتورهای سنکرون \$M_1\$ و \$M_r\$ جمعاً قدرت ۱۸۰ مگاوات جذب می‌نمایند که برحسب پریونیت برابر است با:

$$P = \frac{180}{300} = 0.6 \text{ PU}$$

بنابر این داریم:

$$|V| |I| = 0.6 \text{ PU}$$

که در این رابطه $|V|$ و $|I|$ ولتاژ و جریان جمع موتورها برحسب PU می‌باشند.

از آنجائیکه:

$$V = \frac{13/2}{13/8} = 0.9565 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

بنابر این خواهیم داشت:

$$|I| = \frac{0.6}{0.9565} = 0.6273 \angle 0^\circ \text{ PU}$$

ولتاژ ترمینالهای ژنراتور به این ترتیب محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} V_g &= V_m + j(0.0915 + 0.1815 + 0.0857) I \\ &= 0.9565 + j0.3587 \times 0.6273 = 0.9565 + j0.225 \\ &= 0.9826 \angle 13/2^\circ \text{ PU} \end{aligned}$$

$$|V_g| = 0.9826 \times 20 = 19.65 \text{ KV}$$

قدرت‌های اکتیو و راکتیو تولید شده توسط ژنراتور بترتیب زیر بدست می‌آیند:

$$\begin{aligned} S_g &= P_g + jQ_g = V_g I^* = 0.9826 \angle 13/2^\circ \times 0.6273 \\ &= 0.6 + j0.1408 \text{ PU} \end{aligned}$$

$$P_g = 0.6 \text{ PU} = 0.6 \times 300 = 180 \text{ MW}$$

$$Q_g = 0.1408 \times 300 = 42.24 \text{ MVar}$$

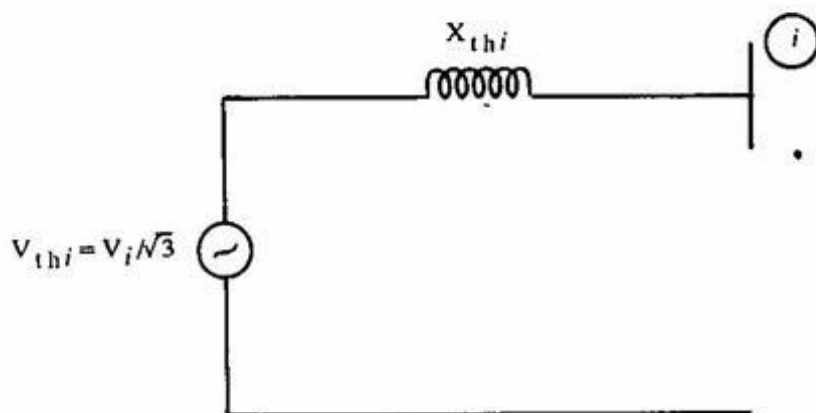
۱۷-۲ مدار معادل تونن سیستم قدرت

یک سیستم قدرت را از دیدگاه هر یک از شین‌های آن می‌توان با یک مدار معادل تونن نشان داد. مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه شین شماره i مطابق شکل (۲-۳۵) شامل ولتاژ مدار باز V_i و امپدانس تونن Z_{th_i} می‌باشد. اگر V_i ولتاژ خطی شین i باشد $V_i / \sqrt{3}$ ولتاژ معادل فاز i است. مقدار این ولتاژ از محاسبه پخش بار سیستم بدست آمده است (نحوه محاسبه در فصل چهارم مورد مطالعه قرار خواهد گرفت). امپدانس تونن X_{th_i} نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_{th_i} = \frac{V_i / \sqrt{3}}{I_{sc_i}} \quad (2-77)$$

که در آن I_{sc_i} جریان اتصال کوتاه در شین i می‌باشد. نحوه محاسبه این جریان نیز در فصل هفتم مورد مطالعه قرار خواهد گرفت. قدرت اتصال کوتاه در شین i برحسب این جریان برابر است با:

$$S_{sc_i} = \sqrt{3} V_i I_{sc_i} \quad (2-78)$$



شکل ۲-۳۵: مدار معادل تونن سیستم قدرت از دیدگاه شین i

با جایگزینی I_{sc_i} در رابطه (۲-۷۷) داریم:

$$X_{th_i} = \frac{V_i / \sqrt{3}}{S_{sc_i} / \sqrt{3} V_i} = \frac{V_i^2}{S_{sc_i}} \quad [\Omega] \quad (2-79)$$

در اینجا V_i ولتاژ خطی شین i برحسب KV و S_{sc_i} قدرت اتصال کوتاه این شین برحسب MVA

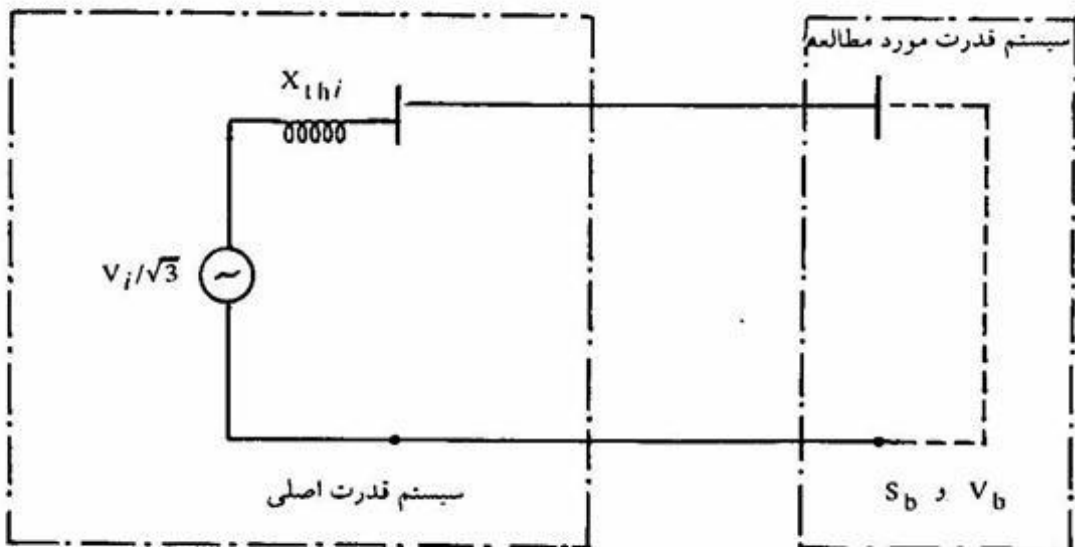
است. اگر V_i و S_{sc_i} برحسب PU در این رابطه قرار داده شوند مقدار X_{th_i} نیز برحسب PU بدست می‌آید.

۱۸-۲ مفهوم شین بی‌نهایت (۱)

در بسیاری از محاسبات سیستم‌های قدرت، هنگامی که محاسبات فقط مربوط به تغییرات در یک شین می‌شود، رسم مدار معادل تونن و مطالعه آن کافی است و نیازی به رسم و مطالعه کل سیستم قدرت نمی‌باشد.

در شکل (۲-۳۶) مدار معادل تونن سیستم قدرت اصلی از دیدگاه شین i دیده می‌شود. این سیستم در محل شین i به سیستم قدرت مورد مطالعه متصل شده است. سیستم قدرت مورد مطالعه می‌تواند در حالت کلی شامل یک بار، یک خازن یا راکتور، یک ژنراتور و نظائر آنها باشد و یا می‌تواند یک سیستم قدرت شامل عناصر مختلف باشد. قدرت مینا و ولتاژ مینا در سیستم قدرت مورد مطالعه بترتیب S_b و V_b می‌باشند. بنابر این امپدانس مینای این سیستم قدرت در محل اتصال به سیستم قدرت اصلی برابر است با:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$



شکل ۲-۳۶: بررسی تغییرات در محل یک شین از سیستم قدرت

امپدانس تونن سیستم قدرت اصلی X_{th_i} برحسب PU در مبنای مقادیر نامی سیستم مورد مطالعه عبارتست از:

$$X_{th_i} = \frac{\frac{V_i^2}{S_{sc_i}}}{Z_b} = \frac{V_i^2 / S_{sc_i}}{V_b^2 / S_b}$$

$$X_{th_i} = \left(\frac{V_i}{V_b}\right)^2 \left(\frac{S_b}{S_{sc_i}}\right) \quad [PU] \quad (2-80)$$

که در آن S_b و V_b مقادیر مبنای سیستم قدرت مورد مطالعه در محل اتصال به سیستم اصلی، و S_{sc_i} و V_i قدرت اتصال کوتاه و ولتاژ شین i سیستم قدرت اصلی می‌باشند. اگر در محل اتصال ولتاژ دو سیستم را برابر فرض کنیم، خواهیم داشت:

$$X_{th_i} = \frac{S_b}{S_{sc_i}} \quad (2-81)$$

اگر سیستم قدرت اصلی در مقایسه با سیستم قدرت مورد مطالعه خیلی بزرگ باشد، در اینصورت قدرت مبنای سیستم مورد مطالعه S_b در مقایسه با قدرت اتصال کوتاه سیستم بزرگ S_{sc_i} ناچیز بوده و X_{th_i} بسیار کوچک و تقریباً صفر می‌گردد. در این حالت مدار معادل تونن سیستم قدرت بزرگ فقط شامل یک منبع ولتاژ می‌باشد و تغییرات در سیستم قدرت مورد مطالعه تأثیری در ولتاژ شین i نخواهد داشت. در این صورت شین شماره i یک شین بی‌نهایت نامیده می‌شود. شبکه‌ای که شین i به آن متعلق است نیز در مقایسه با شبکه مورد مطالعه یک شبکه بی‌نهایت تلقی می‌شود. مشخصه دیگر یک شین بی‌نهایت، فرکانس ثابت آن می‌باشد. به این معنی که هرگونه تغییر تدریجی (نظیر تغییر بار) در سیستم مورد مطالعه نمی‌تواند در فرکانس شین i و شبکه بزرگ تغییری ایجاد کند.

اگر سیستم قدرت مورد مطالعه بجای اینکه به یک سیستم قدرت دیگر وصل شود به یک امپدانس متصل گردد، این امپدانس می‌تواند یک بار امپدانس، خازن و یا راکتور باشد در اینصورت در محل اتصال این امپدانس به سیستم قدرت مورد مطالعه، امپدانس مبنا برابر است با:

$$Z_b = \frac{V_b^2}{S_b} \quad \Omega$$

اندازه امپدانس عنصر وصل شده برحسب اهم نیز برابر است با:

$$|Z_L| = \frac{V^2}{S}$$

که در آن V و S به ترتیب ولتاژ نامی و قدرت نامی امپدانس مذکور می باشد. از آنجائیکه $V=V_b$ ، لذا داریم:

$$|Z_L| = \frac{|Z_L|}{Z_b} = \frac{V^2 / S}{V_b^2 / S_b} = \frac{S_b}{S} \text{ PU}$$

$$Z = \frac{S_b}{S} \angle \Phi \text{ PU} \quad (2-82)$$

در اینجا Φ زاویه ضریب قدرت عنصر امپدانسی است که برای امپدانس القایی مثبت و برای امپدانس خازنی منفی می باشد.

مثال ۸-۲ دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل (۲-۳۷) نشان داده شده است. شین ۳ به یک شین از سیستم قدرتی با ولتاژ ۲۳۰KV و قدرت اتصال کوتاه ۲۰۰۰MVA متصل است. شین ۲ نیز به یک خازن با مقادیر نامی ۲۵MVar و ۳/۸۱KV وصل شده است. بقیه مشخصات سیستم بقرار زیر است:

خط انتقال L : $X = 0.05 \text{ PU}$ ، در قدرت مبنای ۱۰۰MVA و ولتاژ ۱۳۲KV

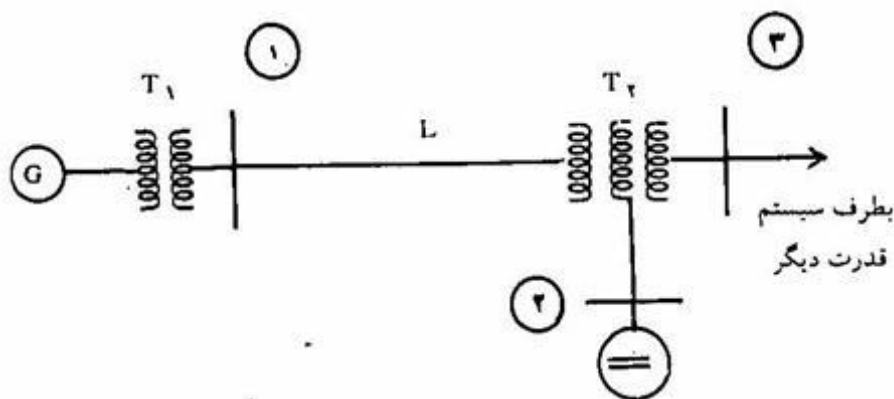
ژنراتور G : ۱۰۰MVA ، ۲۰KV و $X_d'' = 0.20$

ترانسفورماتور T_1 : ۱۵۰MVA ، ۱۳۲/۲۰KV و $X = 0.12$

ترانسفورماتور T_2 : ۱۵۰/۱۲۵/۲۵MVA ، ۲۳۰/۱۳۲/۳/۸۱KV

$X_{ps} = 0.10$ $X_{pt} = 0.08$ $X_{st} = 0.06$

راکتانس های فوق در مبنای ۱۰۰MVA داده شده اند. دیاگرام امپدانس این سیستم را در قدرت مبنای ۱۰۰MVA رسم نمایید.



شکل ۲-۳۷: دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت مربوط به مثال (۲-۸)

حل: قدرت مبنای در سیستم $S_b = 100 \text{ MVA}$ بوده و ولتاژ مبنای نیز بترتیب زیر انتخاب می‌گردد:

$V_b = 20 \text{ KV}$	در مدار ژنراتور
$= 132 \text{ KV}$	در خط انتقال
$= 230 \text{ KV}$	در شین ۳
$= 3/81 \text{ KV}$	در شین ۲

راکتانس ترانسفورماتور T_1 با توجه به مبنای انتخاب شده برابر است با:

$$X = 0.12 \times \frac{100}{150} = 0.08 \text{ PU}$$

راکتانس‌های ترانسفورماتور T_2 با توجه به روابط (۲-۶۶) این چنین محاسبه می‌گردند:

$$X_p = \frac{1}{2} (0.1 + 0.08 - 0.06) = 0.06 \text{ PU}$$

$$X_s = \frac{1}{2} (0.1 + 0.06 - 0.08) = 0.04 \text{ PU}$$

$$X_t = \frac{1}{2} (0.08 + 0.06 - 0.1) = 0.02 \text{ PU}$$

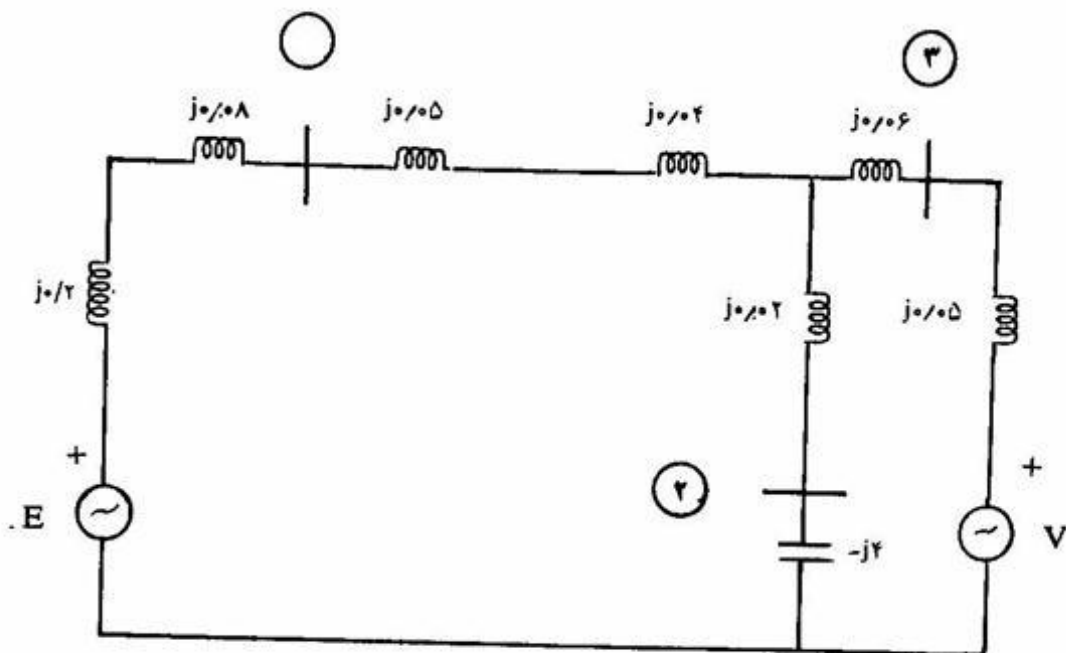
امپدانس تونن سیستم قدرت متصله به شین شماره ۳ عبارتست از:

$$X_{th} = \frac{S_b}{S_{sc}} = \frac{100}{2000} = 0.05 \text{ PU}$$

همچنین امپدانس خازن وصل شده به شین ۲ برابر است با:

$$Z = -jX_c = -j \frac{S_b}{S} = -j \frac{100}{25} = -j4 \text{ PU}$$

دیاگرام امپدانس سیستم قدرت در شکل (۲-۳۸) رسم شده است. کلیه مقادیر امپدانسها بر روی این دیاگرام برحسب PU مشخص شده اند.



شکل ۲-۳۸: دیاگرام امپدانس مربوط به سیستم قدرت شکل (۲-۳۷)

مسائل فصل دوم

۲-۱ یک ژنراتور ۱۲۰ MVA، ۱۹/۵ KV دارای راکتانس سنکرون $X_s = ۱/۵$ PU، به یک ترانسفورماتور با مشخصات نامی ۱۵۰ MVA، ۱۸ KV/۲۳۰ و $X = ۰/۱$ PU متصل است. اگر مبنای انتخاب شده برای سیستم قدرت مربوطه ۱۰۰ MVA، ۲۳۰ KV باشد مقادیر راکتانس های ژنراتور و ترانسفورماتور را در این مبنا بدست آورید.

۲-۲ در شکل (۲-۳۹) مدار معادل بار انتهایی خط انتقال را بصورت امپدانس $R+jX$ نشان دهید. ولتاژ مبنا در محل بار را ۱۳/۲ KV و قدرت مبنای سیستم را ۱۰ MVA انتخاب نمایید.

اولاً - دیاگرام امپدانس این سیستم را رسم نمایید و مقادیر امپدانس ها را برحسب پروینیت روی آن نشان دهید. مشخصات عناصر سیستم بشرح زیر است:

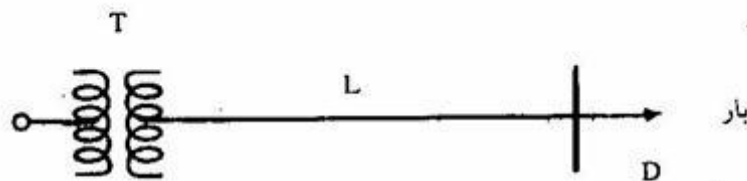
ترانسفورماتور : ۱۰ MVA ، ۱۳/۲ KV / ۱۳/۲ KV و $Z = ۰/۰۱ + j۰/۱$ PU

خط انتقال : $Z = ۰/۵۲ + j۲/۶۱$ Ω

بار : ۸ MW ، ۱۳/۲ KV و $\cos\phi = ۰/۸۵$ پس فاز

ثانیاً - اگر در هر دو حالت بی باری و بار داری کامل این سیستم، ولتاژ طرف فشار قوی در

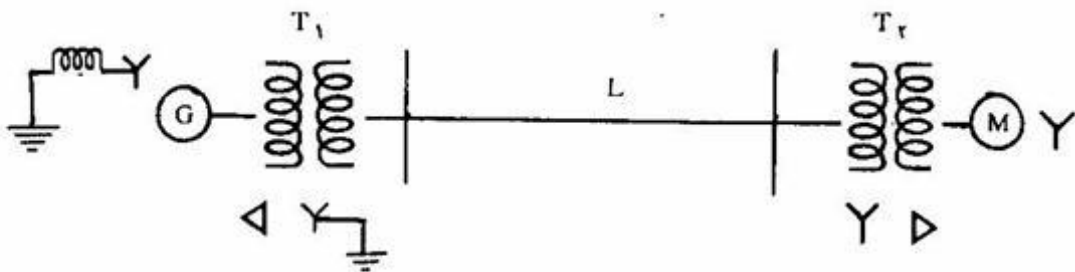
مقدار ۱۳۲ KV ثابت نگه داشته شود، درصد تنظیم ولتاژ خط انتقال $\times ۱۰۰ \frac{V_r^0 - V_r}{V_r}$ را محاسبه کنید (V_r ولتاژ انتهایی خط انتقال است).



شکل ۲-۳۹: مربوط به مسأله (۲-۲)

۲-۳ دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل (۲-۴۰) نشان داده شده است. دیاگرام امپدانس این سیستم را رسم کنید و مقادیر راکتانس‌ها را برحسب PU مشخص نمایید. قدرت مینا را ۳۰ MVA و ولتاژ مینا در مدار ژنراتور را ۱۳/۸ KV در نظر بگیرید. مشخصات عناصر سیستم بقرار زیر است:

ژنراتور	G	:	۱۳/۸ KV ، ۳۰ MVA	و	$X_s = 1 \text{ PU}$
موتور	M	:	۱۳/۸ KV ، ۲۵ MVA	و	$X_s = 0.8 \text{ PU}$
ترانسفورماتور	T_1	:	۱۳۲/۱۳/۲ KV ، ۲۵ MVA	و	$X = 10\%$
ترانسفورماتور	T_2	:	۱۳۸/۱۳/۸ KV ، ۲۰ MVA	و	$X = 8\%$
خط انتقال	L	:	$Z = 12/7 + j63/48 \Omega$		



شکل ۲-۴۰: مربوط به مسأله (۲-۳)

۲-۴ اگر در مسأله (۲-۳) موتور سنکرون قدرت ۱۸ MW در ولتاژ نامی (۱۳/۸ KV) و ضریب قدرت ۰/۹ پیش‌فاز جذب کند، جریانهای موتور و خط انتقال و ژنراتور را برحسب PU و آمپر محاسبه کنید. همچنین ولتاژ ترمینالهای خروجی ژنراتور و ولتاژ ابتدای خط انتقال را برحسب PU و KV بدست آورید.

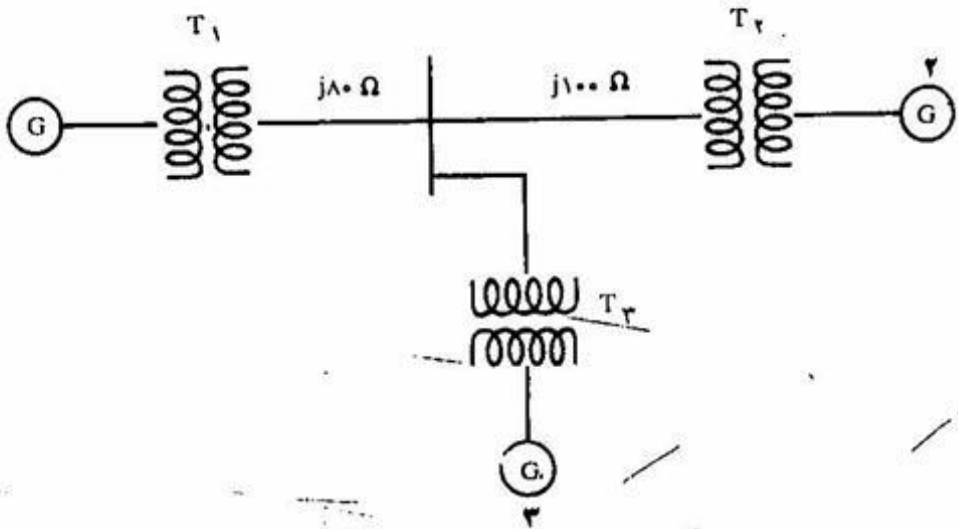
۲-۵ چنانچه در مسأله (۲-۳) بحای موتور سنکرون، بار امپدانس با مشخصات ۲۰ MVA، $\cos\Phi = 0.8$ و ۱۳/۲ KV پس فاز قرار گرفته باشد:

اولاً - دیاگرام امپدانس سیستم را برحسب امپدانس‌های PU رسم نمایید و به ازاء بار مذکور جریانهای بار، خط انتقال و ژنراتور را برحسب PU و آمپر بدست آورید.
ثانیاً - قدرتهای اکتیو تولیدی ژنراتور را برحسب PU، MW و MVar محاسبه کنید.

۲-۶ دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت بدون بار در شکل (۲-۴۱) نشان داده شده است. راکتانس های خطوط انتقال بر روی آنها برحسب اهم مشخص شده اند. مقادیر نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورها عبارتند از:

- ژنراتور ۱ : $X_d'' = 20\%$ و $13/8KV, 20MVA$
- ژنراتور ۲ : $X_d'' = 20\%$ و $18KV, 30MVA$
- ژنراتور ۳ : $X_d'' = 20\%$ و $20KV, 30MVA$
- ترانسفورماتور T_1 : $X = 10\%$ و $220/13/8KV, 25MVA$
- ترانسفورماتور T_2 : واحدهای تک فاز هر کدام $127/18KV, 10MVA$ و $X = 10\%$
- ترانسفورماتور T_3 : $X = 10\%$ و $220/22KV, 35MVA$

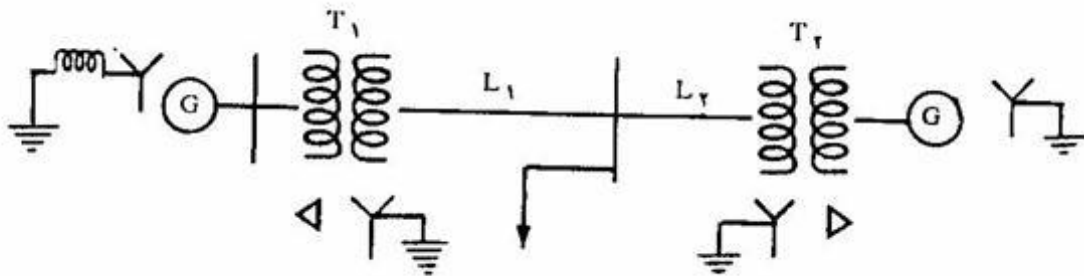
دیاگرام امپدانس این سیستم را رسم نموده و مقادیر راکتانس ها را روی آن برحسب PU نشان دهید. قدرت مینا را $50MVA$ و ولتاژ مینادر مدار ژنراتور ۱ را $13/8KV$ انتخاب نمایید.



شکل ۲-۴۱: مربوط به مسأله (۲-۶)

۲-۷ دیاگرام تک خطی یک سیستم قدرت در شکل (۲-۴۲) نمایش داده شده است. دیاگرام امپدانس این سیستم را در قدرت مینای $50MVA$ رسم کنید. ولتاژ مینا در مدار ژنراتور ۱، $13/2KV$ انتخاب شود. مشخصات این سیستم بشرح زیر است:

- ژنراتور G_1 : $۱۳/۲KV, ۳۰MVA$ و $X''_d = \%۲۰$
 ژنراتور G_2 : $۲۱KV, ۲۰MVA$ و $X''_d = \%۲۰$
 ترانسفورماتور T_1 : $۲۳۰/۱۳/۲KV, ۳۵MVA$ و $X = \%۱۰$
 ترانسفورماتور T_2 : واحدهای تک فاز هر کدام $۱۲۷/۲۲KV, ۸MVA$ و $X = \%۱۰$
 هر یک از خطوط انتقال : $X = ۵۲/۹ \Omega$



$S_{sc} = ۱۰۰۰MVA$

$V = ۲۳۰KV$

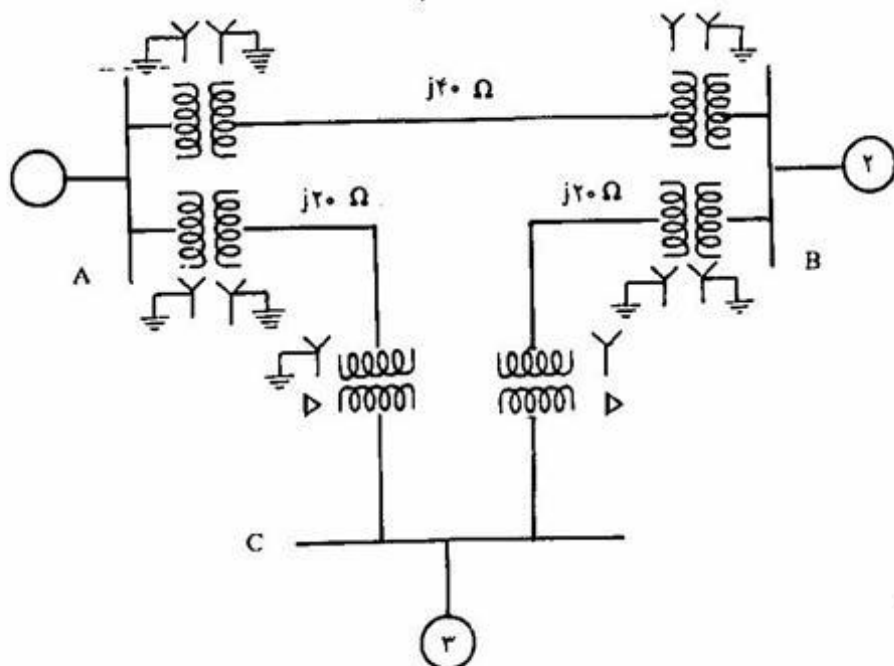
بطرف سیستم قدرت

شکل ۲-۴۲: مربوط به مسأله (۲-۷)

۲-۸ دیاگرام امپدانس سیستم قدرت شکل (۲-۴۳) را رسم نموده و مقادیر راکتانس‌ها را برحسب PU روی آن مشخص نمایید. قدرت مبنا را $۵۰MVA$ و ولتاژ مبنا در خط انتقال $۴۰KV$ اهمی را $۱۳۸KV$ انتخاب کنید. مقادیر نامی ژنراتورها، موتور سنکرون و ترانسفورماتورها بقرار زیر است:

- ژنراتور ۱ : $۱۸KV, ۲۰MVA$ و $X''_d = \%۲۰$
 ژنراتور ۲ : $۱۸KV, ۲۰MVA$ و $X''_d = \%۲۰$
 موتور سنکرون ۳ : $۱۳/۸KV, ۳۰MVA$ و $X''_d = \%۲۰$
 ترانسفورماتورهای Y-Y : $۱۳۸/۲۰KV, ۲۰MVA$ و $X = \%۱۰$
 ترانسفورماتورهای Y- Δ : $۱۳۸/۱۳/۸KV, ۱۵MVA$ و $X = \%۱۰$

۲-۹ اگر موتور سنکرون مسأله (۲-۸) در شرایط بارداری قدرت $۲۴MW$ در ولتاژ $۱۳/۲KV$ و ضریب قدرت $۰/۸$ پیش فاز جذب نماید. ولتاژ شین‌های A و B را محاسبه کنید. با توجه به تقارن شکل جریانهای دو ژنراتور را مساوی فرض کنید.



شکل ۲-۴۳: مربوط به مسأله (۲-۸)

۲-۱۰ در مسأله (۲-۸) چنانچه ژنراتور ۱ قطع شود، موتور سنکرون قدرت ۱۲ MW در ولتاژ ۱۳/۲ KV و ضریب قدرت ۰/۸ پیش فاز جذب می نماید، ولتاژ شین های A و B را محاسبه نمایید.

۲-۱۱ سیستم قدرت نشان داده شده در شکل (۲-۴۴) از سمت چپ به یک شین بی نهایت با ولتاژ ۴۰۰ KV متصل است. طرف سوم ترانسفورماتور سه سیم پیچه T_1 نیز به راکتوری با مقادیر نامی $Q = 50 \text{ MVar}$ و $V = 20 \text{ KV}$ وصل شده است. ترانسفورماتور T_1 دارای مشخصات نامی زیر است:

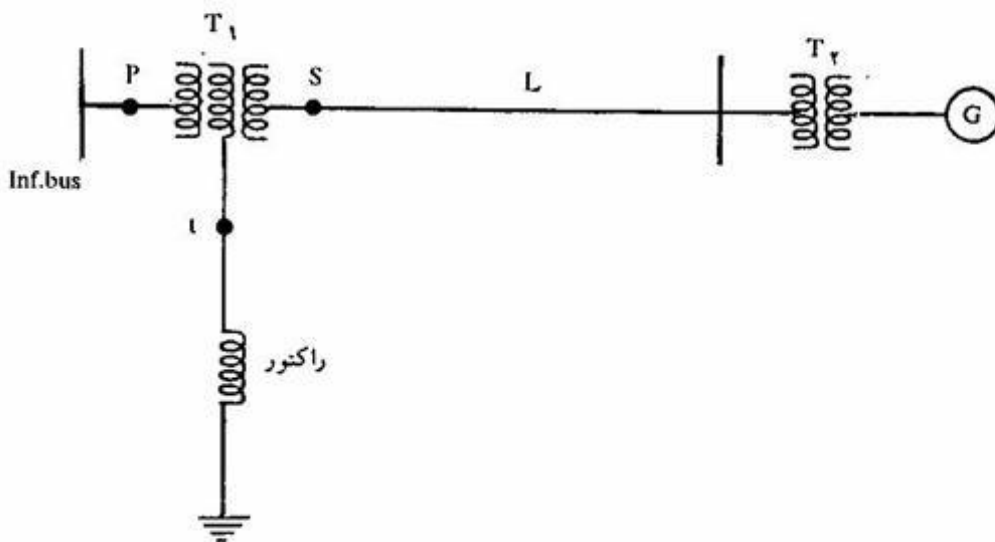
$$400/230/20 \text{ KV} , 200/150/50 \text{ MVA}$$

$$X_{ps} = 160 \Omega , X_{p1} = 128 \Omega , X_{st} = 31/7 \Omega$$

مشخصات بقیه عناصر بشرح زیر است:

ژنراتور G : ۲۱KV، ۱۵۰MVA و $X_d^* = 20\%$
 ترانسفورماتور T_1 : ۲۳۰/۲۰KV، ۱۵۰MVA و $X = 10\%$
 خطوط انتقال L : $X = 26/4 \Omega$

دیاگرام امپدانس این سیستم را رسم نموده و مقادیر راکتانسها را برحسب PU نشان دهید.
 قدرت مینا را ۱۰۰MVA و ولتاژ مینا در خطوط انتقال را ۲۳۰KV انتخاب کنید.



شکل ۲-۴۴: مربوط به مسأله (۲-۱۱)