٦

مدل‌سازی سیستم

تا این مرحله از بحث در رابطه با سیستمهای قدرت توانستیم مدل مداری خط انتقال را تکمیل کنیم و نگاهی نیز به‌محاسبات ولتاژ، جریان وتوان خط انتقال بیندازیم. دراین فصل به‌تهیهٔ مدل مداری برای ماشین سنکرون و ترانسفورماتور قدرت خواهیم پرداخت.

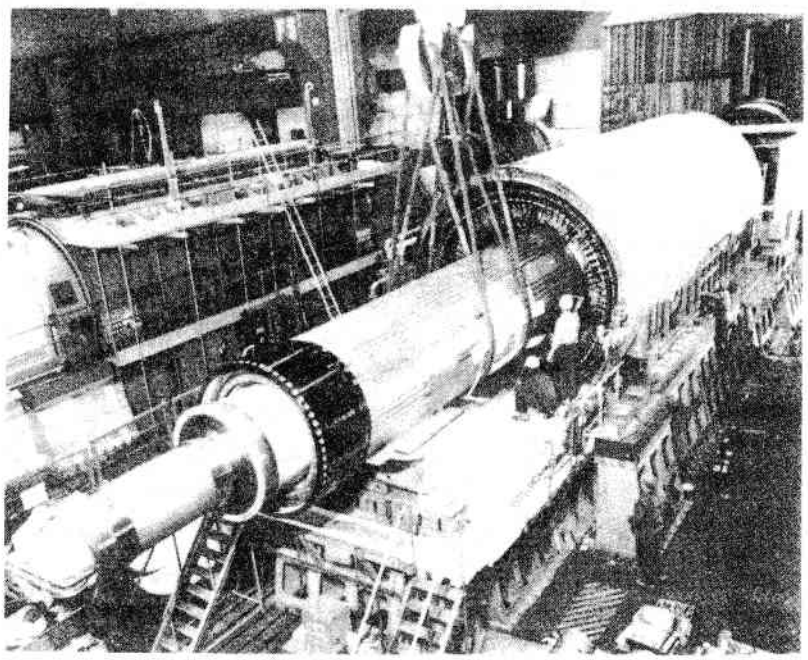
ماشین سنکرون، به‌صورت ژنراتور جریان متناوب، با توربین به حرکت درمی‌آید و انرژی مکانیکی را به‌انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. در حالی‌که به‌صورت موتور، انرژی الکتریکی را به‌انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند. در این بررسی، عمدتاً به‌ژنراتور سنکرون نظر داریم اما نگاهی نیز به‌موتور سنکرون خواهیم انداخت. موتور القایی در صنعت کاربردی بسیار گسترده‌تر ازموتورسنکرون دارد، اما پرداختن به‌آن خارج ازمحدودهٔ مطالب این کتاب است. ما دراینجا نمی‌توانیم به‌بررسی کامل ماشین سنکرون بپردازیم. اما کتابهای متعددی در زمینهٔ ماشینهای جریان متناوب موجود است که تحلیل کافی از ژنراتورها، موتورها و ترانسفورماتورها به‌دست می‌دهند. بررسی ما دربارهٔ ماشین سنکرون به‌تهیه و تکمیل مدار معادل ماشین، به‌منظور درك بهتر نقش این ماشین در بررسی سیستم قدرت و استفاده ازاین مدل مداری برای انجام محاسبات شبکه‌های انتقال محدود می‌شود.

ترانسفورماتور، نقش رابط بین ژنراتور و خط انتقال و همچنین بین خط انتقال و شبکهٔ توزیع را به‌عهده دارد. شبکهٔ توزیع نیز خود ازطریق ترانسفورماتورهای دیگری به‌مصرف‌کننده‌های سیستم‌متصل می‌شود. بررسی ما دربارهٔ ترانسفورماتور نیز، مانند ماشین سنکرون، جامع وکامل نخواهد بود. اما مدل مداری لازم برای انجام بررسیهای بعدی را دراختیار ما قرارخواهد داد.

سپس خواهیم دید که چگونه نمودار تك خطی، ترکیب مدلهای اجزای تشکیل‌دهندهٔ سیستمهای کامل را تشریح می‌کند، و در آخر نیز به بررسی بیشتر به کار گیری کمیتهای در سیکی در محاسبات سیستم خواهیم پرداخت.

۶ـ۱ ساختمان ماشین سنکرون (همزمان)

دو بخش اصلی ماشین سنکرون، سازه‌هایی فرومغناطیسی‌اند. بخش ثابت به نام استاتور یا آرمچر، استوانه‌ای است توخالی با شیارهایی طولی در جداره داخلیش برای جادادن پیچکهای سیم‌پیچ آرمچر. این سیم‌پیچ در ژنراتور سنکرون، جریان تحویلی به‌بار و در موتور سنکرون، جریان دریافتی از شبکهٔ ac را از خود عبور می‌دهد. بخش متحرك به‌نام روتور، استوانه‌ای است که برروی محور ماشین سوارشده و درفضای خالی داخل استاتور چرخانده می‌شود. سیم‌پیچ روی روتور، سیم‌پیچ تحریك نام دارد و با جریان dc تغذیه می‌شود. محرکهٔ مغناطیسی (mmf) بسیار زیادی که جریان سیم‌پیچ تحریك روتور تولید می‌کند با (mmf) ناشی ازجریان سیم‌پیچ آرمچرترکیب می‌شود. شار برآیند درضخامت شکاف هوایی بین استاتورو روتور درپیچکهای سیم‌پیچ آرمچر ولتاژ القا می‌کند. وگشتاور الکترومغناطیسی بین استاتور و روتور را فراهم‌می‌دارد. شکل ۶ـ۱، چگونگی جادادن روتور



شکل ۶ـ۱ عکسی که جادادن یك روتوراستوانه‌ای چهارقطب را در داخل استاتور یك ژنراتور ۱۵۲۵ MVA نشان می‌دهد.

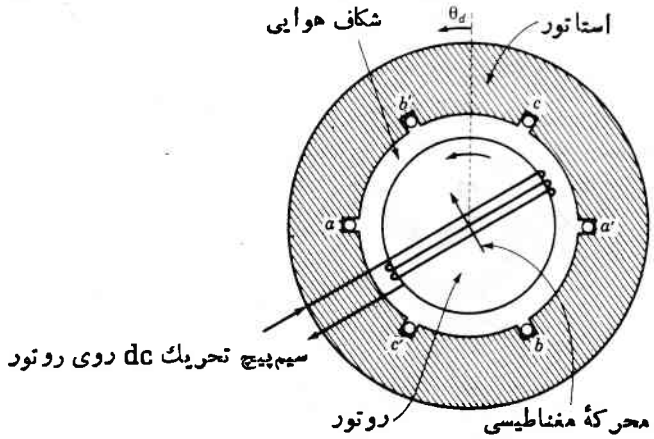
استوانه‌ای چهارقطب را در داخل استاتور یك ژنراتور ۱۵۲۵ MVA نشان می‌دهد.

جریان dc از یك تحریك گر به سیم‌پیچ تحریك داده می‌شود. ایـن تحریك‌گر یا ژنراتوری سوار برمحورماشین همزمان است. و یا منبع dc جداگانه‌ای است که ازطریق جاروهایی درتماس دائم با حلقه‌های لغزان، به‌سیم‌پیچ روتور متصل می‌شود. ژنراتورهای بزرگ جریان ـ متناوب معمولا تحریك‌کننده‌هایی دارندکه ازیك منبع ac ویکسوسازهایی الکترونیکی تشکیل می‌شوند.

اگرماشین همزمان، ژنراتور باشد، محورش راتخست‌رانه‌ای‌که معمولا یك توربین بخار یا توربین آبی است می‌چرخاند. زمانی‌که ژنراتور، توان تحویل می‌دهد، گشتاوری الکترومغناطیسی درآن پدید می‌آیدکه مجموع آن با اتلافهای آهن و مالش در ماشین، با گشتاور نخست‌رانـه مقابله می‌کند. درموتور سنکرون نیز گشتاوری الکترومغناطیسی پدید می‌آیدکه مازادش براتلافهای‌آهـن‌واصطکاك درماشین، تحویل محور می‌شود وبارمکانیکی را می‌چرخاند.

شکل ۶ـ۲ یك ژنراتور سه فـاز ساده شده‌ای را نشان می‌دهـد. سیم‌پیچ تحریك، تنها بایك پیچك نشان داده شده است. این ژنراتور، یك ماشین با قطب نابرجسته (صاف) است زیرا روتوری استوانه‌ای دارد. در ماشین واقعی، سیم‌پیچ تحریك، حلقه‌های زیادی داردکـه در شیارهای محیط روتور توزیع شده‌اند. میـدان مغناطیسی شدید تولید شده، زمانی‌که محور ماشین را نخست‌رانـه می‌چرخاند، با حلقه زدن پیچکهای استاتور ولتاژ متناوبی درسیم‌پیچ آرمچرالقا می‌کند.

شکل ۶ـ۲، برش نیمرخ استاتور را نشان می‌دهد. شیارهای a و a'، که ۱۸۰° از هم فاصله دارند، دوضلع مقابل یك پیچك استاتور راکه تقریباً به‌شکل مستطیل‌است درخود



شکل ۶ـ۲ ژنراتور ac سه‌فاز ساده شده‌ای که تصویرنیمرخ روتور استوانه‌ای دوقطب و برش استاتور را به‌نمایش می‌گذارد.

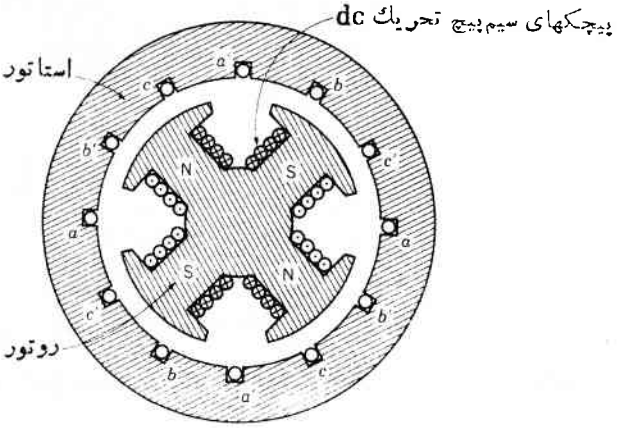
دارند. پیچکهای مشابهی درشیارهای b و b' وشیارهای c و c' قرار گرفته‌اند.ضلع پیچکهای درون شیارهای a، b و c ازهم ۱۲۰° فاصله دارند. هادیهای نمایان دراین شیارها معرف پیچکی تنها با یك دور سیم است، اما درعمل چنین پیچکی چندین دور سیم دارد و معمولا با پیچکهای مشابه شیارهای مجاور، متوالی است تا درمجموع، یك‌سیم‌پیچ راکه دوسرش با a و a' مشخص شده بسازد. سیم‌پیچهایی‌که با b و b' وبا c و c' مشخص شده‌اند از هر نظرشبیه سیم‌پیچ a-a'اند، تنها محل نصبشان درحول آرمچرمتفاوت است.

شکل۶ـ۳، ماشینی با قطب برجسته را نشان می‌دهدکه ۴ قطب دارد. اضلاع مقابل هر پیچك آرمچر ۹۰° ازهم فاصله دارند. بنابراین هرفاز دو پیچك دارد. اضلاع a، b و c پیچکهای مجاور از یکدیگر ۶۰° فاصله دارند. دو پیچك تشکیل دهندهٔ هر فاز ممکن است متوالی یا موازی به‌هم بسته شوند.

اگرچه درشکل۶ـ۳ رسم نشده است، اما ماشینهای با قطب برجسته معمولا سیم‌پیچ میراگری متشکل از میله‌های مسی اتصال کوتاه شده‌ای برروی سرقطبها دارندکه ازنظر ظاهری شبیه بخشی‌ازسیم‌پیچ «قفس سنجابی» موتورهای القایی‌است. وظیفهٔ سیم‌پیچ میراگر، کاهش دادن نوسانات مکانیکی روتور در نزدیکی سرعت سنکرون است، که چنانکه خواهیم دید به‌تعداد قطبهای ماشین و فرکانس سیستم متصل به‌ماشین بستگی دارد.

درماشین دوقطب، هردو چرخش روتور، منجر به‌تولید یك سیکل ولتاژ می‌شود. در ماشین چهارقطب، به‌ازای هر دور چرخش ماشین، در پیچك، دوسیکل ولتاژ پدید می‌آید. چون تعداد سیکلهای تولیدشده درهردور از چرخش روتور برابر با تعداد زوج قطبهاست، فرکانس ولتاژ تولیدی عبارت است از

$$f = \frac{P}{۲}\frac{N}{۶۰} \quad \text{Hz} \qquad (۱-۶)$$



شکل ۶ـ۳ برش یك استاتور ساده شده روتوری با قطب برجسته.

که در آن P، تعداد قطبها و N، سرعت روتور برحسب دور بر دقیقه (rpm) است.

چون هـر بار که یك جفت قطب از مقابل پیچکی می گذرد یك سیکل کامل ولتـاژ (۳۶۰° موج ولتاژ) تولید می‌شود، باید بین درجهٔ الکتریکی که برای بیان ولتاژ وجریان به‌کار می‌رود و درجهٔ مکانیکی که وضعیت روتور را مشخص می کند، تفاوت قـائل شد. در ماشین دوقطب، درجهٔ الکتریکی با درجهٔ مکانیکی برابراست. درماشین چهارقطب، در هر دورچرخش روتور، که معادل ۳۶۰° درجهٔ مکانیکی است، دوسیکل ولتاژ یعنی ۷۲۰درجهٔ الکتریکی تولید می‌شود. درهرماشین، تعداد درجات الکتریکی $P/2$ برابرتعداد درجات مکانیکی است.

بـا طراحی صحیح روتور وبـا توزیع مناسب سیم‌پیچ استاتور در حول آرمچر، ولتاژهای سینوسی بسیارخالصی درآرمچر تولیدخواهدشدکه ولتاژهای تولید شدهٔ بی بادی یا به‌اختصار ولتاژهای تولید شده نامیده می‌شوند. در بـررسیهای بخشهای بعـد، mmf حاصل از روتور را نیز با توزیع سینوسی فرض خواهیم کرد.

اگر یك سرسه سیم‌پیچ آرمچررا به‌هم وصل کنیم و نقطهٔ اتصال را o بنامیم، ولتاژهای تولید شده (که برای هماهنگ بودن بامطالب فصل دوم E_{ao}، E_{bo} و E_{co} نامیده می‌شوند) ۱۲۰° الکتریکی با هم اختلاف فاز خواهند داشت.

۶ـ۲ واکنش آرمچر درماشین سنکرون

اگر بارمتعادل سه‌فازی به‌یك ژنراتور سه‌فازمتصل‌شود، جریانهای سه‌فاز متعادلی ازفازهای سیم‌پیچ آرمچر خواهدگذشت. این جریانهای آرمچر نیز خود mmf های دیگری تولید می‌کنند که باید در نظرگرفت. اکنون نظری به mmf حاصل از هـریك از سه سیم‌پیچی که به فاصلهٔ ۱۲۰° از یکدیگر، بر روی یك مـاشین دو قطب مانند شکل ۶ـ۲ قرار دارند می‌اندازیم. همچنین فرض می‌کنیم کـه ماشین شکل ۶ـ۲، روتـوری استوانه‌ای دارد تـا مسیرهای شار مغناطیسی در ضخامت شکاف هوایی اساساً دارای مقاومت‌مغناطیسی برابـری باشند.

اگر فرض کنیم درلحظهٔ $t=0$، جریان i_a، ماکزیمم مقدار خود را دارد، جریانهای متعادل فازها را می‌توان چنین بیان کرد.

$$i_a = I_m \cos \omega t \qquad (۶ـ۲)$$

$$i_b = I_m \cos (\omega t - ۱۲۰°) \qquad (۶ـ۳)$$

$$i_c = I_m \cos (\omega t - ۲۴۰°) \qquad (۶ـ۴)$$

که درآنها ω برحسب درجهٔ الکتریکی برثانیه است. اما برای ماشین دوقطب، ω همـان سرعت زاویه‌ای روتور برحسب درجهٔ مکانیکی برثانیه است. جهت مثبت انتخابی بـرای جریان را درهادیهای a و b و c شکل ۶ـ۲ ازصفحهٔ کتاب به‌سمت ناظرفرض می کنیم.

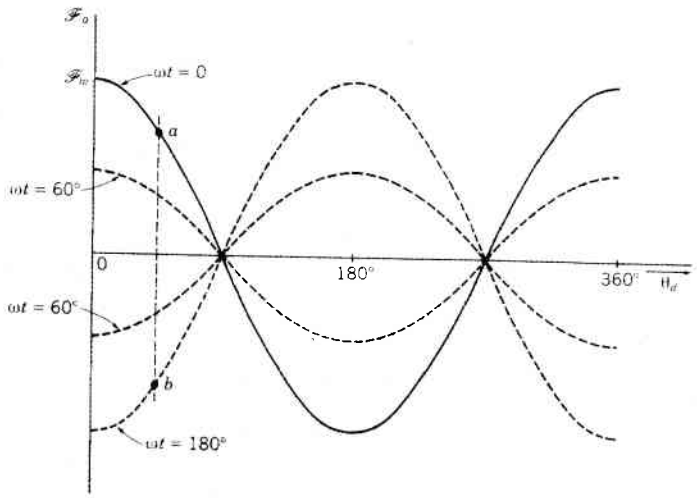
هـر نقطه ازمحیط آرمچررا مطابق شکل ۶ـ۲، با زاویهٔ وضع آن، θ_d کـه نسبت بهمحور پیچك a سنجیده می‌شود، مشخص می‌کنیم. زیرنوشت d تنها بهمنظور فرق گذاشتن بین زاویهٔ وضع θ_d و زاویهٔ θ که معمولا برای بیان اختلاف فاز بین ولتاژ وجریان به‌کار می‌رود، انتخاب شده‌است. می‌دانیم که محرکهٔ مغناطیسی تولیدشده ازجریان هرفازآرمچر باید درنقاط محیط آرمچرتابعی‌از زاویهٔ وضع θ_d و زمان t باشد. محرکهٔ مغناطیسی حاصل از جریان درفاز a را بصورت $\mathcal{F}_a(\theta_d, t)$ مشخص خواهیم کرد. ازآنجا که این mmf را جریان i_a تولید می‌کند، باید تابعی سینوسی و همفاز با جریان i_a باشد.

توزیع محرکهٔ مغناطیسی حاصل ازجریان آرمچردرمحیط آرمچر، دارای تغییرات سینوسی نیست. در یك ماشین واقعی، هر فاز،تعـداد معینی از شیارهای آرمچر را اشغال می‌کند وتوزیع mmf ذوزنقه‌ای است، اما دراین بررسی، ما نیزچنانکه معمول‌است تنها هارمونیك اصلی این موج ذوزنقه‌ای را درنظر می‌گیریم.

با فرض توزیع سینوسی mmf در محیط آرمچر، منحنی خط ناچیدهٔ شکل ۶ـ۴، تغییرات محرکهٔ مغناطیسی فاز a را درحول آرمچر بصورت تابعی‌از θ_d درلحظهٔ $t = 0$، یعنی هنگامی‌که i_a ماکزیمم مقدارخود را دارد، نشان می‌دهد. دراین لحظه، توزیع $\mathcal{F}_a$ در حول آرمچر چنین بیان می‌شود

$$\mathcal{F}_a(\theta_d, 0) = \mathcal{F}_m \cos\theta_d \qquad (۵-۶)$$

که در آن $\mathcal{F}_m$ مقدار ماکزیمم $\mathcal{F}_a$ است.



شکل۶ـ۴ توزیع mmf حاصل ازجریان فاز a ازمولد شکل۶ـ۲ بهدورآرمچر برای مقادیر مختلف ωt هنگامی‌که i_a با معادلهٔ (۶ـ۲) بیان می‌شود.

منحنیهای خط‌چین شکل ۶ـ۴، چگونگی توزیع $\mathcal{F}_a$ را درحول آرمچر برای مقادیری از t به‌غیراز صفر نشان می‌دهند. می‌بینیم کـه به‌ازای $\omega t = ۶۰^\circ$، ماکزیمم مقدار $\mathcal{F}_a$ از $۰٫۵\mathcal{F}_m$ تجاوز نمی‌کند، زیرا در این لحظه بـا توجه به‌معادلهٔ (۶ـ۲)، مقـدار i_a برابر $۰٫۵I_m$ است. در محل ثابت $\theta_d = ۴۵^\circ$، $\mathcal{F}_a$ بین مقادیرنشان داده شده با نقاط a و b در شکل ۶ـ۴، به‌صورت سینوسی تغییر می‌کند. در $\theta_d = ۹۰^\circ$، $\mathcal{F}_a$ همـواره صفـر اسـت. پس برای بیان تغییرات زمانی ومکانی $\mathcal{F}_a$، با توجه به‌اینکه $\mathcal{F}_a$ با i_a در زمان همفازاست، می‌توان نوشت

$$\mathcal{F}_a(\theta_d, t) = \mathcal{F}_m \times \underbrace{\cos\theta_d}_{\substack{\text{عامل}\\\text{وضعیت}\\\text{آرمچر}}} \times \underbrace{\cos\omega t}_{\substack{\text{عامل}\\\text{وضعیت}\\\text{زمانی}}} \qquad (۶ـ۶)$$

به‌همین ترتیب برای فازهای b و c

$$\mathcal{F}_b(\theta_d, t) = \mathcal{F}_m \cos(\theta_d - ۱۲۰^\circ)\cos(\omega t - ۱۲۰^\circ) \qquad (۶ـ۷)$$

و

$$\mathcal{F}_c(\theta_d, t) = \mathcal{F}_m \cos(\theta_d - ۲۴۰^\circ)\cos(\omega t - ۲۴۰^\circ) \qquad (۶ـ۸)$$

مجموع این‌سه mmf، محرکهٔ مغناطیسی برآیند $\mathcal{F}_{ar}$ است که واکنش آرمچرنامیده می‌شود. با استفاده ازاتحاد مثلثاتی

$$\cos\alpha\cos\beta = \frac{۱}{۲}\cos(\alpha-\beta) + \frac{۱}{۲}\cos(\alpha+\beta) \qquad (۶ـ۹)$$

و با دانستن اینکه مجموع سه عبارت سینوسی هم‌دامنه که نسبت به‌هم ۱۲۰° اختلاف فاز دارند درهر لحظه مساوی صفراست، درمی‌یابیم که

$$\mathcal{F}_{ar} = \mathcal{F}_a + \mathcal{F}_b + \mathcal{F}_c = \frac{۳}{۲}\mathcal{F}_m \cos(\theta_d - \omega t) \qquad (۶ـ۱۰)$$

معادلهٔ (۶ـ۱۰) بیان‌کننده یك موج محرکهٔ مغناطیسی است که درحول آرمچرو در جهت افزایش θ_d در حرکت است. این mmf از دیدگاه هرناظر سوار بر موج، مقداری است ثابت و

$$\theta_d - \omega t = \text{ثابت} \qquad (۶ـ۱۱)$$

که ازآن نتیجه می‌گیریم

$$\frac{d\theta_d}{dt} = \omega \qquad (۶ـ۱۲)$$

معادلهٔ(۶ـ۱۲)، بیان می‌دارد که محرکهٔ مغناطیسی واکنش آرمچر باسرعت زاویه‌ای ω، برابر باسرعت‌زاویه‌ای‌روتور، درمحیط آرمچرمی‌چرخد. بنابراین‌این mm نسبت به mmf حاصل ازجریان dc سیم‌پیچ روتور ساکن است. شار مغناطیسی درضخامت شکاف هوایی بیـن استاتور و روتور را برآیند این دو محرکهٔ مغناطیسی تولید می‌کند.

اگراشباع مغناطیسی را نادیده بگیریم وبه‌یاد بیاوریم که ماشین موردبحث، روتور استوانه‌ای دارد، می‌توانیم شارهای حاصل ازهریك ازاین دو mmf را جداگانه درنظر بگیریم. به‌این ترتیب، ϕ_f شار حاصل از عبور جریان dc از سیم‌پیچ روتور، و ϕ_{ar} شار حاصل از واکنش آرمچر خواهد بود. زمانی که شاری با توزیع سینوسی به‌دور آرمچر می‌چرخد، شار حلقه‌زن هر پیچك، زمانی ماکزیمم خواهد شد که محور محرکهٔ مغناطیسی پدید آورندهٔ شار و محور پیچك، همراستا باشند. دراین حالت، آهنگ تغییرشار حلقه‌زن مساوی صفراست. به‌همین ترتیب، پس از اینکه روتور، 90° بچرخد، شارحلقه‌زن صفر اما آهنگ تغییرآن ماکزیمم خواهدشد. بنابراین ولتاژ القا شده در پیچك، 90° نسبت به‌شار حلقه‌زن اختلاف فاز دارد. با بهره‌گیری ازقانون لنز و با درنظرداشتن جهت مثبت فرض شده برای جریان در پیچك و جهت مثبت محرکهٔ مغناطیسی در شکل ۶ـ۲ می‌توان نشان دادکه ولتاژ القا شده در پیچك، نسبت به mmf تأخیرفاز دارد و نه تقدم فاز.

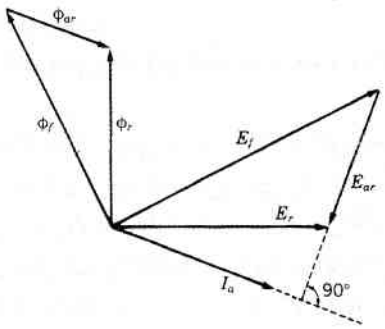
۶ـ۳ مدل مداری ماشین سنکرون

برای رسم‌کردن نمودارفازبرداری فاز a، مؤلفه‌های جداگانه شار را در محور پیچك a، یعنی جایی که θ_d برابر صفر است، درنظر می‌گیریم. شار روتور، ϕ_f تنها شاری است کـه زمانی‌که جریان آرمچرصفراست، می‌بایست درنظرگرفته شود.این شار ϕ_f، ولتاژ بی‌باری E_{ao} را که در اینجا به E_f نشان می‌دهیم تولید می‌کند. همان طورکـه مقایسهٔ معادله‌های (۶ـ۲) و (۶ـ۱۰) نشان می‌دهد، بـا توجه به‌این‌که $\cos\omega t = \cos(-\omega t)$، شار ϕ_{ar} ناشی از mmf محرکهٔ مغناطیسی واکنش آرمچر، $\mathcal{F}_{ar}$ با جریان i_a (در $\theta_d = 0$) همفاز است. مجموع ϕ_f و ϕ_{ar}، باصرف‌نظرکردن اشباع، شار برآیند ϕ_r است‌که ولتاژ E_r را در سیم‌پیچ فاز a تولید می‌کند. نمودار فازبرداری فاز a در شکل ۶ـ۵ دیـده می‌شود. ولتاژهای E_f و E_{ar} نسبت به‌شارهای ϕ_f و ϕ_{ar} کـه این ولتاژها را تولید می‌کنند 90° پس افت دارند. شار برآیند ϕ_r، شار **موجود درضخامت‌شکاف‌هوایی ماشین است و E_r را** دراستاتور تولید می‌کند. می‌توان نمودارهای مشابهی برای فازهای دیگررسم‌کرد.

درشکل ۶ـ۵ به‌ویژه می‌بینیم که E_{ar} نسبت به I_a، 90° پس‌افت دارد. اندازهٔ E_{ar} را ϕ_{ar} تعیین می‌کند که خود با توجه به‌اینکه حاصل جریان آرمچراست متناسب با $|I_a|$ است. بنابراین رئکتانس القایی X_{ar} را می‌توان چنین تعریف‌کرد

$$E_{ar} = -jI_aX_{ar} \qquad (۶ـ۱۳)$$

معادلهٔ (۶ـ۱۳)، E_{ar} را با اختلاف فاز درستی نسبت به I_a تعریف می‌کند. به‌این ترتیب



شکل ۶–۵ نمودارفازبرداری‌که‌رابطهٔ زمانی‌مؤلفه‌های‌شار درمحور پیچك a($\theta_d=0$) وولتاژها و جریانهای فاز a از ژنراتور شکل ۶–۲ را نشان می‌دهد. نمودارهای مشابهی می‌توان برای فازهای b و c رسم‌کرد و به هر ژنراتوری با روتور استوانه‌ای تعمیم داد.

ولتاژی‌که شار شکاف هوایی درفاز a تولید می‌کند E_r است، به‌طوری که

$$E_r = E_f + E_{ar} = E_f - jI_aX_{ar} \qquad (۱۴–۶)$$

ولتاژی که شار برآیند در هر فاز تولید می‌کند از ولتاژ بین سرهای فاز، V_t، در صورت نادیده‌گرفتن مقاومت، تنها به اندازهٔ افت ولتاژ ناشی از جریان آرمچر ضرب در رئکتانس نشت X_l سیم‌پیچ بیشتر است. اگرولتاژ بین سرها V_t باشد.

$$V_t = E_r - jI_aX_l \qquad (۱۵–۶)$$

حاصل‌ضرب I_aX_l بیانگرافت ولتاژ بخشی ازشار (ناشی ازجریان آرمچر) است‌که از ضخامت شکاف هوایی ماشین نمی‌گذرد. پس برطبق معادله‌های(۶–۱۴)و(۶–۱۵)، داریم

$$V_t = \underbrace{E_f} - \underbrace{jI_aX_{ar}} - \underbrace{jI_aX_l} \qquad (۱۶–۶)$$

ناشی از	ناشی از	تولید شده
رئکتانس	واکنش	درحالت
نشت‌آرمچر	آرمچر	بی‌باری

یا

$$V_t = E_f - jI_aX_s \qquad (۱۷–۶)$$

که درآن X_s، که رئکتانس سنکرون نامیده می‌شود، برابراست با $X_{ar}+X_l$. اگرمقاومت آرمچر R_a به‌حساب آورده شود، معادلهٔ (۶–۱۷) می‌شود

$$V_t = E_f - I_a(R_a + jX_s) \qquad (۱۸–۶)$$

R_a معمولا آن‌قدر از X_s کوچکتراست‌که، دراینجاکه ما بیشتر به‌بررسی کیفی نظرداریم،

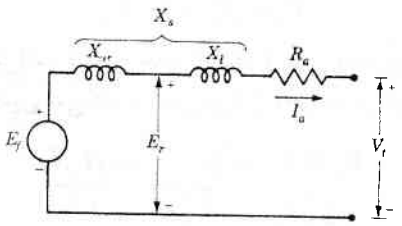
حذفش اهمیت چندانی نخواهد داشت.

معادلهٔ (۶-۱۸) به‌ما اجازه می‌دهد ژنراتور را با مدار معادل ساده اما بسیار مفید شکل ۶-۶ نمایش دهیم.

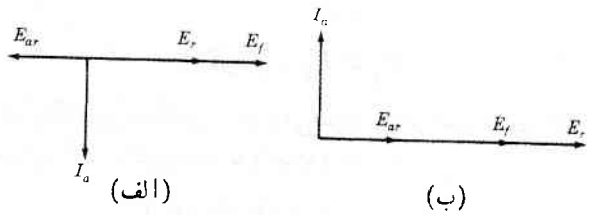
بررسی شکل ۶-۵، نکتهٔ بسیار مهمی را دربارهٔ ژنراتور سنکرون آشکار می‌سازد. زمانی کـه جریان I_a نسبت به‌ولتاژ تولید شدهٔ بی‌باری E_f به‌اندازهٔ $90°$ پس‌افت دارد، ϕ_{ar} مستقیماً از ϕ_f کم می‌شود، و ϕ_r شدیداً کاهش می‌یابد. برعکس، جریان آرمچری که $90°$ نسبت به ولتاژ بی‌باری پیش‌افت داشته باشد باعث می‌شود ϕ_{ar} مستقیماً با ϕ_f جمع شود، و ϕ_r شدیداً افزایش یابد. رابطهٔ بین E_f، E_{ar} و E_t را دراین دوحالت، شکل۶-۷ نشان می‌دهد. اگر باری شدیداً القایی به ژنراتور اعمال شود ولتاژ بین سرها بسیارکمتر از ولتاژ بی‌باری خواهد شد. در حالی‌که باری ظرفیتی باعث افزایش نمایان ولتاژ بین سرها نسبت به‌ولتاژ بی‌باری می‌شود. این نتایج به نشان دادن درستی نمودار فازبرداری ومدار معادل کمك می‌کند.

در بسط این نظریه، ماشین را دوقطب فرض کردیم. اما این نظریه برای ماشینهای چند قطب نیـز صادق است. منتهی بسط آن به‌واسطهٔ تفاوت بین درجه‌هـای الکتریکی و مکانیکی، کمی پیچیده‌تر می‌شود.

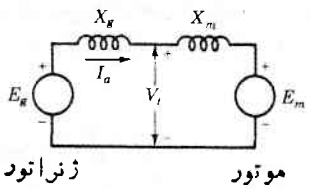
اصولی راکه مطرح کردیم می‌توان برای موتورسنکرون نیز به‌کار بست. مدارمعادل موتور، مشابه مدارمعادل ژنراتوراست. با این تفاوت که جهت جریان I_a معکوس می‌شود. ولتاژهای تولیدی ژنراتور و موتور، غالباً به‌جای E_f، با نشانه‌های تك زیرنوشتی مثـل



شکل ۶-۶ مدار معادل ژنراتور ac.



شکل ۶-۷ نمودارهـای فـازبرداری نشان دهندهٔ رابطه بین E_f و E_{ar} در زمانی کـه جریان تحویلی‌از ژنراتور (الف) $90°$ نسبت به E_f پس‌افت‌دارد، (ب) $90°$ نسبت به E_f پیش‌افت دارد.



شکل ۶-۸ نمودار مداری برای مولد وموتور. I_a، جریان تحویلی مولد بهموتور است.

E_g و E_m مشخص می‌شوند، بهویژه زمانی‌که هردو مطابق شکل ۶-۸ در یك مدار باشند. معادله‌های این حالت چنین است

$$V_t = E_g - jI_aX_g \qquad (۱۹-۶)$$

و

$$V_t = E_m + jI_aX_m \qquad (۲۰-۶)$$

X_g و X_m نیز بهترتیب رئکتانسهای سنکرون ژنراتور و موتورنـد، و از مقاومت آرمچر صرف‌نظر شده است.

زمانی‌کـه به‌بررسی اتصالیها درماشین سنکرون درفصل ۱۰ بپردازیم خواهیم دید که جریانی‌که درست درلحظهٔ پس‌ازبروز اتصال می‌گذرد بامقدار مانایش متفاوت است. در مدل سازی ماشین سنکرون برای محاسبات اتصال‌کوتاه به‌جای رئکتانس سنکرون (X_S) باید رئکتانس زیر گذرا (X''_S) و رئکتانس گذرا (X'_S) را به‌کاربرد. این رئکتانسها درچند مسئله، پیش ازبررسی آنها درفصل ۱۰، به‌کارگرفته خواهند شد.

درمورد ماشینهای با قطب برجسته باید اختلاف بین مسیرهای عبور شار در امتداد طول قطب (به‌نام محور اصلی) و در امتداد بین قطبها (به‌نام محور عرضی) را به‌حساب آورد. برای این‌کار، جریان آرمچر به‌دومؤلفه تجزیه می‌شود. یك مؤلفه باولتاژ تولیدشدهٔ بی‌باری E_f، ۹۰° اختلاف فـاز دارد و دیگری با E_f همفاز است. مؤلفـهٔ اول، محرکهٔ مغناطیسی (mmf) را تولید می‌کندکه شارحاصل ازآن،افت ولتاژاین‌جریان درباصطلاح رئکتانس سنکرون طولی X_d را پدید می‌آورد. مؤلفهٔ دیگر با E_f، همفازاست و mmf و شاری را تولید می‌کندکه افت ولتاژ ایـن جریـان در رئکتانس سنکرون عرضی X_q را تولیدمی‌کند.

جدول پ-۴ پیوست‌کتاب، مقادیـر درـیکی رئکتانسهای مختلف ماشینهای سنکرون را به‌دست می‌دهد. چنانکه این جدول نشان می‌دهد، مقادیر X_d و X_q درماشینهای روتور-استوانه‌ای اساساً با هم برابرند. از این‌رو لازم نیست‌که در بحث واکنش آرمچر، X_d و X_q را جداگانه درنظر بگیریم و یگانه رئکتانس سنکرون را X_S نامیدیم. برای ساده‌کردن‌کار بازهم همهٔ ماشینهای سنکرون را روتور-استوانه‌ای فرض خواهیم‌کرد. نظریهٔ دو واکنشی

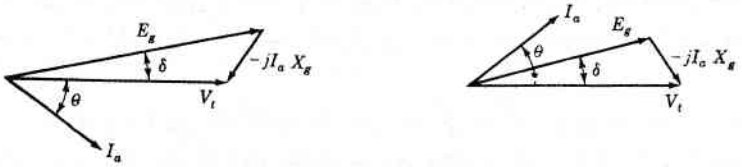
راکه به‌بحث از رئکتانسهای طولـی وعرضی می‌پردازد می‌توان در بیشتر کتابهای درسی مربوط به‌ماشینهای ac یافت. جدول پ–۴، مقادیر X'_d و X''_d را نیز به‌دست می‌دهد.

۶–۴ تأثیر تحریك ماشین سنکرون

تغییر دادن تحریك ماشینهای سنکرون عامل مهمی در تـوان واکنشی است. ابتدا به‌بررسی ژنراتوری خواهیم پرداخت که سرهایش به‌سیستم قدرت بسیار بزرگی متصل است. سیستمی آن‌قدر بزرگ که ولتاژ V_t بین سرهای ژنراتور دراثر هرگونه تغییر در تحریك ژنراتور تغییر نخواهد کرد. شینه‌ای که ژنراتور بدان متصل است گاهی شینهٔ بینهایت نامیده می‌شود، به‌این معنی که مستقل از هر تغییری کـه درتوان ورودی یا تحریك ژنراتور سنکرون متصل به‌آن صورت گیرد ولتاژش ثابت باقـی می‌ماند (تغییری درفرکانسش پدید نمی‌آید. اگر توان ورودی ازژنراتور به‌سیستم را ثابت نگه‌داریم، زمانی‌که تحریك ژنراتور را برای تغییر دادن $|E_g|$ تغییر می‌دهیم مقدار $|V_t||I_a|\cos\theta$ ثابت باقی می‌ماند. در این‌صورت شکل ۶–۹، نمودار فازبرداری ژنراتور را به‌ازای $|E_g|$ زیاد و $|E_g|$ کم نشان می‌دهد. زاویهٔ δ، زاویهٔ گشتاور یا زاویهٔ توان ماشین نامیده می‌شود. تحریك طبیعی به‌تحریکی گفته می‌شود که به‌ازای آن داشته باشیم

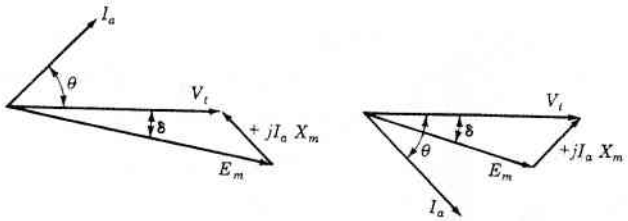
$$|E_g|\cos\delta = V_t \qquad (۶–۲۱)$$

در حالت شکل ۶–۹ (الف)، ژنراتور پرتحریك است وجریان پس‌افتی به‌سیستم می‌دهد. می‌توان نیز فرض کرد که این ماشین جریان پیش‌افتی از سیستم می‌گیرد ومانند یك خازن، توان واکنشی به‌سیستم می‌دهد. شکل ۶–۹ (ب)، حالت ژنراتور کم‌تحریك را نشان می‌دهد که جریان پیش‌افتی به‌سیستم می‌دهد، یا اینکه جریان پس‌افتی از سیستم می‌گیرد. ژنراتور کم تحریك، توان واکنشی ازسیستم می‌گیرد. این امر را می‌توان باکمك mmf واکنش آرمچر توضیح داد. بـرای مثال، هنگامی‌که ژنراتور پرتحریـك است می‌بایست جریان پس افتی تحویل بدهد چون جریان پس افتی، mmf متقابلی تولید می‌کند که پرتحریکی



(الف) مولد پرتحریك (ب) مولدکم‌تحریك

شکل ۶–۹ نمودارهای فازبرداری (الف) ژنراتور پرتحریك، و (ب) ژنراتورکم‌تحریك. I_a، جریانی است که ژنراتور تحویل می‌دهد.



(ب) موتور کم‌تحریک (الف) موتور پرتحریک

شکل ۶ـ۱۰ نمودارهای فازبرداری. (الف) موتور پرتحریک، و (ب) موتور کم‌تحریک. I_a، جریانی است که موتور می‌گیرد.

راکاهش می‌دهد.

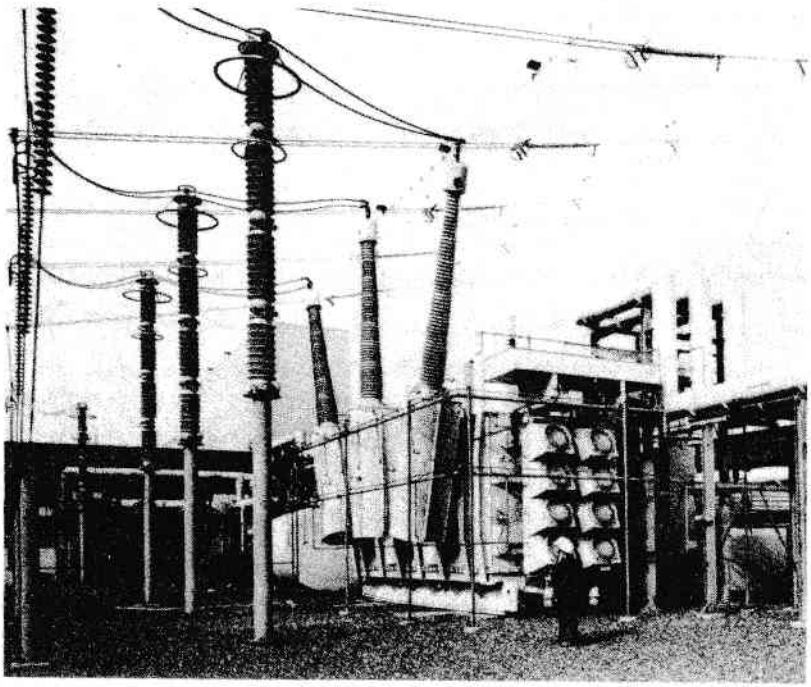
دیده می‌شود که در شکل ۶ـ۹، E_g نسبت به V_t پیش‌افت دارد. این وضع همیشه برای ژنراتور وجود دارد وشرط درست بودن معادلهٔ (۶ـ۱۹) است.

شکل ۶ـ۱۰، موتورهای سنکرون پرتحریك وکم تحریکی را نشان می‌دهدکه با ولتاژ بین سرهای برابر، توان برابری می‌گیرند. موتور پرتحریك، جریان پیش‌افتی می‌کشد واز دیدگاه شبکه‌ای‌که ازموتور، توان واکنشی می‌گیرد مانند مداری ظرفیتی عمل می‌کند. موتورکم تحریك، جریان پس‌افتی می‌کشد، توان واکنشی جذب می‌کند، و از دیدگاه شبکه، مانند مداری القایی عمل می‌کند. درشکل ۶ـ۱۰ می‌بینیم که E_m برای اینکه معادلهٔ (۶ـ۲۰) صادق باشد نسبت به V_t، پس‌افتی است، واین شرط، همیشه برای موتور سنکرون برقرار است. به‌طور خلاصه، شکلهای ۶ـ۹ و ۶ـ۱۰ به‌ما نشان می‌دهدکه ژنراتورها و موتورهای پرتحریك، توان واکنشی به‌سیستم قدرت تحویل می‌دهند. و ژنراتورها وموتورهای کم‌تحریك، توان واکنشی ازسیستم قدرت می‌گیرند.

۶ـ۵ ترانسفورماتور ایدئال

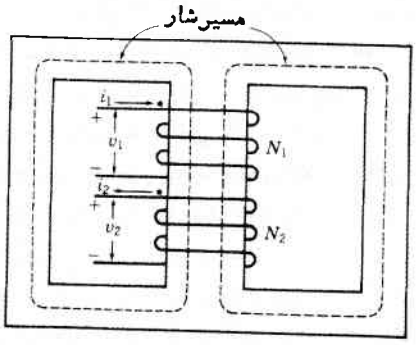
اکنون مدل خط انتقال وماشین سنکرون را در دست داریم و آماده‌ایم تا بپردازیم به‌بررسی ترانسفورماتورکه از دو یا چند پیچك تشکیل می‌شودکه طوری قرارگرفته‌اندکه با شار واحدی حلقه زده می‌شوند. درترانسفورماتور قدرت، پیچکها برروی هسته‌ای آهنی نهاده می‌شوند تا شار را طوری محدودکنندکه تقریباً همهٔ شاری‌که هرپیچك را حلقه می‌زند همهٔ پیچکهای دیگررا نیز حلقه زند. چندین پیچك ممکن‌است متوالی یاموازی باهم وصل‌شوند تا یك سیم پیچ را تشکیل دهند، پیچکهای هرسیم‌پیچ را می‌توان به تناوب با پیچکهای سیم‌پیچ با سیم‌پیچهای دیگر برروی هسته پیچید.

شکل ۶ـ۱۱، تصویر ترانسفورماتور سه‌فازی را نشان می‌دهدکه ولتاژ ژنراتوری را دریك نیروگاه اتمی تا حد ولتاژ خط انتقال، افزایش می‌دهد. اندازه‌های نامی این ترانسفورماتور ۷۵۰ MVA و ۲۲٫۸ / ۵۲۵ kV است.



شکل ۶-۱۱ تصویر ترانسفورماتور سه‌فازی با اندازه‌های نامی ۷۵۰ MVA و ۵۲۵/۲۲۸ kV.

شکل ۶-۱۲ نشان می‌دهد که چگونه دو سیم پیچ ممکن است برروی یك هستهٔ آهنی قرار گیرند تا ترانسفورماتور تکفازی از نوع به‌اصطلاح پوسته‌ای تشکیل شود. هر سیم پیچ می‌تواند دارای چندصد تا چندهزار دور باشد.



شکل ۶-۱۲ ترانسفورماتور دوسیم‌پیچه.

بررسی را با این فرض آغاز خواهیم کرد که تغییرشار درهسته، سینوسی است و ترانسفورماتور ایدئال است، به‌این معنی که تراوایی μ هسته، بینهایت ومقاومت سیم‌پیچها صفراست. با بینهایت بودن تراوایی هسته، همهٔ شار به‌هسته محدود می‌شود و درنتیجه همهٔ دورهای هردوسیم‌پیچ را حلقه می‌زند. ولتاژ e که شارمتغیردرهرسیم‌پیچ القا می‌کند همان ولتاژ بین سرهای v سیم‌پیچ نیزهست، زیرا مقاومت سیم‌پیچ مساوی صفراست.

رابطهٔ بین سیم پیچهای‌شکل۶-۱۲ نشان می‌دهدکه ولتاژهای e_1 و e_2 که شار متغیر القا می‌کند وقتی با نشانه‌های قطبداشت + و − نشان داده شده تعریف شوند، با هم همفازند. پس بنابرقانون فاراده

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad (۲۲-۶)$$

و

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\phi}{dt} \qquad (۲۳-۶)$$

که درآنها ϕ، مقدار لحظه‌ای شار و N_1 و N_2، تعداد دورهای سیم پیچهای ۱ و ۲ شکل ۶-۱۲ است. چون تغییرات شار را سینوسی فرض کرده‌ایم می‌توانیم پس ازتقسیم معادلهٔ (۶-۲۲) بر (۶-۲۳) حاصل را به‌شکل فازبرداری نشان دهیم

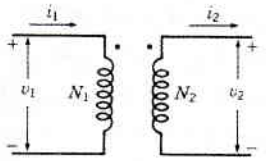
$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (۲۴-۶)$$

معمولاً ازجهت پیچیدن سیم‌پیچهای ترانسفورماتورآگاهی نداریم. یك روش‌ارائهٔ اطلاعات دربارهٔ سیم‌پیچها این است که نقطه‌ای برروی یکی از دوسرهرسیم‌پیچ بگذاریم به‌طوری که تمام سرهای نقطه‌گذاری‌شده دریك زمان مثبت باشند؛ یا به‌عبارت دیگر، افت ولتاژ از سرنقطه‌گذاری شده به‌سر بی‌علامت همهٔ سیم‌پیچها همفاز باشند. نقطه‌های روی ترانسفورماتور دوسیم‌پیچهٔ شکل ۶-۱۲ براساس همین قراردادگذارده شده‌است. همچنین درمی‌یابیم که اگر نقطه‌ها را طوری بگذاریم که جریانهای گذرندهٔ از سرنقطه‌گذاری شده به سر بدون علامت در دو سیم پیچ، محرکه‌هایی مغناطیسی تولیدکنندکه هر دو در مدار مغناطیسی دریك جهت اثرکنند، به‌نتیجهٔ مشابهی دست خواهیم یافت. شکل ۶-۱۳، نمایش طرحواره‌ای یك ترانسفورماتور است وهمان اطلاعات شکل ۶-۱۲ را به‌دست می‌دهد.

برای به‌دست آوردن رابطهٔ بین جریانهای i_1 و i_2 سیم پیچها قانون آمپر را به‌کار می‌گیریم که می‌گوید محرکهٔ مغناطیسی درحول یك مسیر بسته عبارت است از

$$\oint H \cdot ds = i \qquad (۲۵-۶)$$

که درآن i، جریان محصور درمسیر بسته‌ای است که انتگرال خطی شدت میدان H برروی



شکل ۶-۱۳ نمایش طرحواره‌ای یك ترانسفورماتور دوسیم‌پیچه.

آن حساب شده است. با اعمال قانون به‌هریك از مسیرهای بستهٔ شارکه در شکل ۶-۱۲ خط چین نشان داده شده‌اند، N_1 ، i_1 بار و N_2 ، i_2 بار حلقه‌زده می‌شود. لیکن، $N_1 i_1$ و $N_2 i_2$ محرکه های مغناطیسی دردوجهت مخالف تولید می کنند و

$$\oint H \cdot ds = N_1 i_1 - N_2 i_2 \qquad (۲۶-۶)$$

اگر جهت جریان i_2 را برعکس در نظرگرفته بودیم علامت منفی به‌مثبت تغییر می‌یافت. زمانی‌که تراوایی بینهایت باشد، انتگرال خطی شدت میدان H درحول مسیر بسته صفر است. به‌این ترتیب باتبدیل به‌شکل فازبرداری خواهیم داشت

$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = 0 \qquad (۲۷-۶)$$

یا

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} \qquad (۲۸-۶)$$

و I_1 و I_2 با هم همفازند. توجه‌کنیدکه اگر جریان را وقتی از سرنقطه‌گذاری شده یك سیم‌پیچ وارد و ازسرنقطه‌گذاری شدهٔ سیم پیچ دیگر خارج می‌شود مثبت فرض‌کنیم، I_1 و I_2 همفازمی‌شوند. اگرجهت جریان انتخاب شده برای یکی‌ازدوجریان معکوس شود باهم 180° اختلاف فاز خواهند داشت.

ازمعادلهٔ (۶-۲۸)، داریم

$$I_1 = \frac{N_2}{N_1} I_2 \qquad (۲۹-۶)$$

ودرترانسفورماتور ایدئال اگر I_2 صفرباشد I_1 هم باید صفرباشد.

سیم‌پیچی‌که امپدانس یا بار دیگری به‌دوسرش متصل شود سیم پیچ ثانویه (دومین) نامیده می‌شود. و هرعنصر مداری‌که به‌این سیم‌پیچ متصل باشدگفته می‌شودکه در طرف ثانویه ترانسفورماتوراست. به‌همین ترتیب سیم‌پیچی که درسمت منبع انرژی است سیم‌پیچ اولیه (یکمین) است و هرعنصر مداری متصل به‌آن در طرف اولیه است. در سیستم قدرت غالباً انرژی ازهردوجهت درترانسفورماتورجریان می‌یابد ودرنتیجه تعریف اولیه وثانویه

معنای خود را ازدست می‌دهد. لیکن، این اصطلاحات کاربرد عمومی دارند، و ما نیز هرجا که اشتباهی پیش نیاورد آنها را به‌کارخواهیم گرفت.

اگر امپدانس Z_2 به‌دوسرسیم‌پیچ ۲ مدار شکل ۶–۱۲ یا ۶–۱۳ متصل شود، داریم

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2} \qquad (۳۰–۶)$$

با گذاردن مقادیر V_2 و I_2 ازمعادله‌های (۶–۲۴) و (۶–۲۸)، به‌دست می‌آید

$$Z_2 = \frac{(N_2/N_1)V_1}{(N_1/N_2)I_1} \qquad (۳۱–۶)$$

وامپدانس درصورتی‌که از دوسر سیم‌پیچ اولیه اندازه‌گیری شود عبارت است از

$$Z'_2 = \frac{V_1}{I_1} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 Z_2 \qquad (۳۲–۶)$$

بنابراین امپدانس متصل به‌طرف ثانویه هرگاه در مربع نسبت ولتاژ اولیه به‌ثانویه ضرب شود به‌طرف اولیه وابرده می‌شود.

همچنین بایدتوجه‌کنیم که V_1I_1 و V_2I_2 همان‌طورکه معادلهٔ زیر، بازهم با بهره‌گیری ازمعادله‌های (۶–۲۴) و (۶–۲۸)، نشان می‌دهد باهم برابرند

$$V_1I_1 = \frac{N_1}{N_2}V_2 \times \frac{N_2}{N_1}I_2 = V_2I_2 \qquad (۳۳–۶)$$

و به‌همین ترتیب، داریم

$$V_1I_1^* = V_2I_2^* \qquad (۳۴–۶)$$

بنابراین، چون ترانسفورماتور را ایدئال فرض‌کرده‌ایم، ولت آمپر وتوان مختلط ورودی به‌سیم‌پیچ اولیه با همین کمیتها درسیم‌پیچ ثانویه برابرند.

مثال ۶–۱ اگر درمدار شکل ۶–۱۳، $N_1 = ۲۰۰۰$ و $N_2 = ۵۰۰$ و درحالی‌که امپدانس Z_2 به‌دوسر سیم‌پیچ ۲ متصل‌است $V_1 = ۱۲۰۰ \angle ۰^\circ \text{ V}$ و $I_1 = ۵ \angle -۳۰^\circ \text{ A}$ باشد، مقادیر V_2 و I_2 و Z_2 وامپدانس Z'_2 راکه به‌صورت مقدار وابردهٔ Z_2 به‌طرف اولیهٔ ترانسفورماتور تعریف می‌شود به‌دست آورید.

حل:

$$V_2 = \frac{۵۰۰}{۲۰۰۰}(۱۲۰۰ \angle ۰^\circ) = ۳۰۰ \angle ۰^\circ \text{ V}$$

$$I_2 = \frac{۲۰۰۰}{۵۰۰}(۵ \angle -۳۰^\circ) = ۲۰ \angle -۳۰^\circ \text{ A}$$

$$Z_2 = \frac{300\angle 0^\circ}{20\angle -30^\circ} = 15\angle 30^\circ\,\Omega$$

$$Z_2' = (15\angle 30^\circ)\left(\frac{2000}{500}\right)^2 = 240\angle 30^\circ\,\Omega$$

یا اینکه

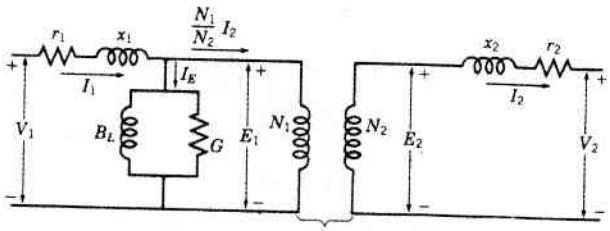
$$Z_2' = \frac{1200\angle 0^\circ}{5\angle -30^\circ} = 240\angle 30^\circ\,\Omega$$ □

۶-۶ مدار معادل ترانسفورماتور واقعی

ترانسفورماتور ایدئال نخستین گام در بررسی ترانسفورماتور واقعی است که در آن (۱) تراوایی بینهایت نیست، (۲) سیم‌پیچها مقاومت دارند، (۳) بر اثر تغییر متناوب جهت شار، اتلاف در هستهٔ آهنی پدید می‌آید، و (۴) همهٔ شار حلقه زنندهٔ یك سیم‌پیچ، سیم‌پیچهای دیگر را حلقه نمی‌زند.

زمانی که ولتاژی سینوسی به سیم‌پیچ اولیهٔ ترانسفورماتوری که هستهٔ آهنی دارد و سیم‌پیچ ثانویه‌اش بازاست اعمال می‌شود، جریان کوچکی از مدار اولیه خواهد گذشت. به‌طوری که در ترانسفورماتورخوب طراحی شده، چگالی شارماکزیمم B_m درمحل‌زانوی منحنی B-H، یا منحنی اشباع ترانسفورماتور، پدید می‌آید. این جریان جریان مغناطنده (مغناطیسی کننده) نامیده می‌شود. اتلاف در هستهٔ آهنی، اولا، به این علت پدید می‌آید که تغییر متناوب جهت شار در آهن نیاز بـه انرژی دارد که به‌صورت گـرما تلف می‌شود و اتلاف پسماند نام دارد. اتلاف دوم به این علت است که شار متغیر جریانهای گردشی در هستهٔ آهنی القا می‌کند که تولید اتلاف $|I|^2R$ به‌نام اتلاف جریان‌گردابی می‌کنند، اتلاف پسماند با به‌کارگیری فولادهای آلیاژ ویژه درساخت هسته کاهش می‌یابد. اتلاف جـریان گردابی باساختن هسته از ورقه‌های فولادی کاهش می‌یابد. مدار اولیهٔ ترانسفورماتور، در حالی که طرف ثانویه باز است، به علت وجود هستهٔ آهنی، مـداری است با اندوکتانس بسیار زیاد. جریان نسبت به‌ولتاژ اعمال شده کمی کمتر از 90° پس‌افت دارد، ومؤلفه‌ای از جریان که با ولتاژ همفاز است اتلاف انرژی درهسته را به‌حساب می‌آورد. درمدارمعادل، جـریان مغناطنده I_E با افزودن سوسپتانس القایی B_L بـه موازات رسانایی G در مـدار به‌حساب می‌آید.

درترانسفورماتور واقعی دوسیم‌پیچه، بخشی ازشار حلقه‌زن سیم‌پیچ اولیه، سیم‌پیچ ثانویه را حلقه نمی‌زند. این شار متناسب‌است باجریان اولیه وباعث افت ولتاژی می‌شود کـه با افزودن رئکتانس القایی x_1، بـه نام رئکتانس نشت، متوالـی با سیم پیچ اولیـه ترانسفورماتورایدئال به‌حساب می‌آید. رئکتانس نشت مشابهی (x_2) باید به‌سیم‌پیچ ثانویه



شکل ۶ـ۱۴ مدار معادل ترانسفورماتور با بهره‌گیری ازمفهوم ترانسفورماتور ایدئال.

افزوده شود تا ولتاژ ناشی‌از شاری‌که سیم‌پیچ ثانویه را حلقه می‌زند اما سیم‌پیچ اولیه را حلقه نمی‌زند، به‌حساب آید. زمانی‌که مقاومتهای r_1 و r_2 سیم‌پیچهارا نیز به‌حساب‌آوریم به‌مدل ترانسفورماتور شکل ۶ـ۱۴ می‌رسیم. دراین مـدل، ترانسفورماتور ایدئال رابط بین پارامترهای مداری r_1، x_1، G و B_L اضافه شده به‌طرف اولیه ترانسفورماتور و r_2 و x_2 اضافه شده به‌طرف ثانویه است.

اگر کلیهٔ کمیتهارا به‌یکی از دوطرف فشار قوی‌یا فشار ضعیف ترانسفورماتور ببریم، می‌توان ترانسفورماتور ایدئال را ازمدار معادل حذف‌کرد. برای مثال، اگرهمهٔ ولتاژها، جریانها، و امپدانسهای مدار شکل ۶ـ۱۴ را به‌مدار اولیه ترانسفورماتورکـه N_1 دور دارد ببریم، و برای‌سادگی فرض‌کنیم $a = N_1/N_2$، به‌مدار شکل۶ـ۱۵ می‌رسیم. اغلب، ازجریان مغناطنده، به‌علت اینکه درمقایسه باجریانهای بار، بسیارکوچك است صرف‌نظر می‌شود. برای بازهم ساده‌ترکردن مدار فرض می‌کنیم

$$R_1 = r_1 + a^2 r_2 \qquad (۳۵-۶)$$

و

$$X_1 = x_1 + a^2 x_2 \qquad (۳۶-۶)$$

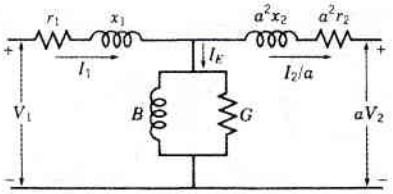
تا مدار معادل شکل ۶ـ۱۶ به‌دست‌آید. اکنون همهٔ امپدانسها و ولتاژهای بخشی از مدار راکه به‌سرهای ثانویه متصل است باید به‌طرف اولیه برد.

مثال ۶ـ۲ ترانسفورماتور تکفازی ۲۰۰۰ دور در سیم‌پیچ اولیه و ۵۰۰ دور در سیم‌پیچ ثانویه دارد. مقاومت سیم‌پیچها $r_1 = ۲٫۰ \Omega$ و $r_2 = ۰٫۱۲۵ \Omega$. رئکتانسهای‌نشت $x_1 = ۸٫۰ \Omega$ و $x_2 = ۰٫۵۰ \Omega$. بار Z_2، مقاومتی و معادل ۱۲Ω است. اگر ولتاژاعمالی بین سرهای سیم‌پیچ اولیه $۱۲۰۰ V$ باشد، V_2 ومقدار افت ولتاژ را به‌دست‌آوریـد. از جریان مغناطنده صرف‌نظرکنید.

حل:

$$a = \frac{N_1}{N_2} = \frac{۲۰۰۰}{۵۰۰} = ۴$$

$$R_1 = ۲ + ۰٫۱۲۵(۴)^2 = ۴٫۰ \Omega$$



شکل ۶-۱۵ مدار معادل ترانسفورماتور با مسیر عبور جریان مغناطنده.

$$X_1 = 8 + 0.5(4)^2 = 16\ \Omega$$

$$Z_2' = 12 \times (4)^2 = 192\ \Omega$$

مدار معادل در شکل ۶-۱۷ دیده می‌شود.

$$I_1 = \frac{1200}{192 + 4 + j16} = 6.10 \angle -4.67^\circ\ \text{A}$$

$$aV_2 = 6.10 \angle -4.67^\circ \times 192 = 1171.6 \angle -4.67^\circ\ \text{V}$$

$$V_2 = \frac{1171.6 \angle -4.67^\circ}{4} = 292.9 \angle -4.67^\circ\ \text{V}$$

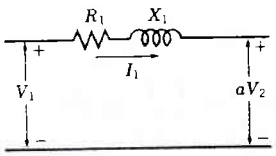
$$\text{افت ولتاژ} = \frac{1200/4 - 292.9}{292.9} = 0.0242 \text{ یا } 2.42\%$$

□

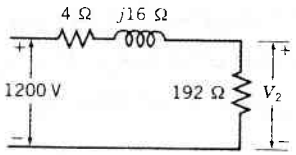
اگرچه مانند مثال ۶-۲ برای بیشتر محاسبات سیستم قدرت می‌توان از جریان مغناطنده صرف‌نظر کرد، G و B_L مدار معادل را می‌توان باکمك آزمایش مدار باز به‌دست آورد. ولتاژ نامی در حالی که سیم‌پیچ ثانویه باز است به‌سیم‌پیچ اولیه اعمال می‌شود. امپدانس اندازه‌گیری شده در دوسر این سیم‌پیچ که مقاومت و رئکتانس نشت آن r_1 و x_1 است عبارت است از

$$Z = r_1 + jx_1 + \frac{1}{G + jB_L} \qquad (۶-۳۷)$$

وچون r_1 و x_1 درمقایسه با امپدانس‌اندازه‌گیری شده بسیار کوچك‌اند، G و B_L را می‌توان



شکل ۶-۱۶ مدار معادل ترانسفورماتور باصرف‌نظر کردن ازجریان مغناطنده.



شکل ۶ـ۱۷ مدار مثال ۶ـ۲.

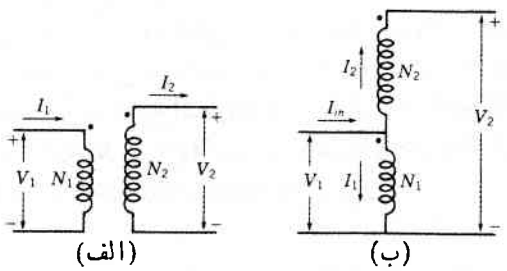
به‌این ترتیب تعیین کرد.

پارامترهای R و X ترانسفورماتور دوسیم‌پیچه با کمك آزمایش اتصال‌کوتاه تعیین می‌شوند، که در آن امپدانس دوسر یك سیم‌پیچ درحالی‌که سیم‌پیچ دیگر اتصال‌کوتاه شده است اندازه‌گیری می‌شود. ولتاژ تنها به میزانی اعمال می‌شود که جریان نامی از سیم‌پیچ عبور کند. چون ولتاژ موردنیاز بسیار کم است جریان مغناطنده کاملا ناچیز خواهد بود و امپدانس اندازه‌گیری شده اساساً با $R+jX$ برابر است.

۶ـ۷ اتوترانسفورماتور

تفاوت اتوترانسفورماتور با ترانسفورماتور معمولی این است که سیم‌پیچهای اتوترانسفورماتور علاوه براینکه توسط شار متقابل به‌هم تزویج شده‌اند از نظر الکتریکی هم به‌هم متصل‌اند. ما با وصل‌کردن سیم‌پیچهای یك ترانسفورماتور ایدئال به‌هم به‌مطالعهٔ اتوترانسفورماتور خواهیم پرداخت. شکل ۶ـ۱۸ (الف)، نمودار طرحواره‌ای ترانسفورماتور ایدئال است، وشکل ۶ـ۱۸ (ب) نشان می‌دهدکه چگونهٔ سیم‌پیچها ازنظر الکتریکی به‌هم وصل شده و تشکیل یك اتوترانسفورماتور داده‌اند. در اینجا سیم‌پیچها طوری نشان داده شده‌اند که ولتاژهایشان باهم جمع می‌شوند، اگرچه می‌شد طوری وصل شوندکه در تقابل با یکدیگر باشند. عیب بزرگ اتوترانسفورماتور این است‌که جدایی سیم‌پیچهارا ازدست می‌دهد، اما مثال زیر افزایش توان نامی را درآن به‌نمایش می‌گذارد.

مثال ۶ـ۳ یك ترانسفورماتور تکفاز ۳۰ kVA باولتاژهای نامی ۲۴۰/۱۲۰ V



شکل ۶ـ۱۸ نمودار طرحواره‌ای یك ترانسفورماتور ایدئال بسته شده (الف) به صورت معمول، (ب) به‌صورت اتوترانسفورماتور.

مطابق شکل ۶–۱۸ (ب) به‌صورت اتوترانسفورماتور بسته شده است. ولتاژ نامی به سیم‌پیچ فشارضعیف ترانسفورماتور اعمال می‌شود. فرض کنید ترانسفورماتور ایدئال است وجریانهای نامی $|I_1|$ و $|I_2|$ از سیم‌پیچها می‌گذرد. $|V_2|$ و کیلوولت آمپر نامی اتوترانسفورماتور را تعیین کنید.

حل:

$$|I_1| = \frac{۳۰۰۰۰}{۱۲۰} = ۲۵۰\ \text{A}$$

$$|I_2| = \frac{۳۰۰۰۰}{۲۴۰} = ۱۲۵\ \text{A}$$

$$|V_2| = ۲۴۰ + ۱۲۰ = ۳۶۰\ \text{V}$$

جهتهای انتخاب شده برای جریان مثبت در تعریف کردن I_1 و I_2 در ارتباط با سرهای نقطه‌گذاری‌شده نشان می‌دهد که جریانها همفازند. بنابراین جریان ورودی عبارت است از

$$|I_{in}| \angle\theta = |I_1| \angle\theta + |I_2| \angle\theta$$

$$|I_{in}| = ۲۵۰ + ۱۲۵ = ۳۷۵\ \text{A}$$

kVA ورودی عبارت است از

$$۳۷۵ \times ۱۲۰ \times ۱۰^{-۳} = ۴۵\ \text{kVA}$$

kVA خروجی عبارت است از

$$۱۲۵ \times ۳۶۰ \times ۱۰^{-۳} = ۴۵\ \text{kVA}$$ □

از این مثال برمی‌آید که اتوترانسفورماتور در مقایسه با ترانسفورماتور معمولی، نسبت ولتاژ بالاتری به‌دست داده وکیلوولت آمپر بیشتری بین دوطرف ترانسفورماتور انتقال داده است. بنابراین اتوترانسفورماتور برای همان قیمت، اندازه‌های نامی بالاتری به‌دست می‌دهد. اتوترانسفورماتور در ضمن، بازدهی بیشتری دارد زیرا اتلافها به‌همان میزان ترانسفورماتور معمولی باقی می‌ماند. لیکن، از بین رفتن جدایی الکتریکی بین طرفهای فشارقوی وفشار ضعیف اتوترانسفورماتور معمولا عامل تعیین‌کنندهٔ انتخاب اتصال معمولی ترانسفورماتور برای اکثرکاربردهاست. درسیستمهای قدرت اتوترانسفورماتورهای سه‌فاز غالباً برای تنظیمهای کوچك ولتاژ شینه‌ها به‌کار می‌رود.

۶–۸ امپدانس در یکی درمدارهای دارای ترانسفورماتور تکفاز

مقادیر اهمی مقاومت و رئکتانس نشت ترانسفورماتور بستگی به‌این دارد که در طرف

فشار قوی ترانسفورماتور اندازه‌گیری شده‌اند یـا در طرف فشارضعیف. اگر این مقادیر برحسب در-یك بیان شوند، کیلوولت آمپرمبنا را همان‌کیلوولت‌آمپر نامی ترانسفورماتور درنظر می‌گیرند. ولتاژ مبنا را درصورتی‌که مقادیراهمی مقاومت و رئکتانس نشت به‌طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور وابرده شوند ولتاژ نامی طرف فشار ضعیف، و اگـر به‌طرف فشار قوی ترانسفورماتور وابرده شوند ولتاژ نامی طرف فشارقوی می‌گیرند. همان‌طور که مثال زیرنشان می‌دهد، امپدانس در-یکی ترانسفورماتور چه ازمقادیراهمی وابرده به‌طرف فشارقوی تعیین شود وچه از مقادیروابرده به‌طرف فشارضعیف فرقی نخواهدکرد.

مثال ۶-۴ اندازه‌های ترانسفورماتورتکفازی ۱۱۰/۴۴۰V و ۲ر۵kVA است. رئکتانس نشت انـدازه‌گیری شده درطرف فشارضعیف ۰ر۰۶Ω است رئکتانس نشت را برحسب در-یك به‌دست آورید.

حل :

$$\text{امپدانس مبنای طرف فشارضعیف} = \frac{۱۱۰ر۰^۲ \times ۱۰۰۰}{۲ر۵} = ۴ر۸۴\,\Omega$$

برحسب در-یك

$$X = \frac{۰ر۰۶}{۴ر۸۴} = ۰ر۰۱۲۴ \text{ در-یك}$$

اگر رئکتانس نشت درطرف فشارقوی اندازه‌گیری می‌شد، مقدارش چنین به‌دست می‌آمد

$$X = ۰ر۰۶ \left(\frac{۴۴۰}{۱۱۰}\right)^۲ = ۰ر۹۶\,\Omega$$

$$\text{امپدانس مبنای طرف فشارقوی} = \frac{۴۴۰ر۰^۲ \times ۱۰۰۰}{۲ر۵} = ۷۷ر۵\,\Omega$$

برحسب در-یك

$$X = \frac{۰ر۹۶}{۷۷ر۵} = ۰ر۰۱۲۴ \text{ در-یك}$$

□

انتخاب صحیح مبناهای مختلف برای مـدارهای متصل به‌دو طرف ترانسفورماتور، مزیت بزرگ انجام محاسبات به‌صورت در-یکی است. برای بهره‌گیری ازاین مزیت در سیستم تکفاز، نسبت ولتاژهای مبنای مدارهای متصل به‌دوطرف ترانسفورماتور باید برابر بـا نسبت دورهای سیم‌پیچهای ترانسفورماتور بـاشد.بـاانتخاب چنین ولتاژهـای مبنا و کیلوولت‌آمپرمبنای یکسان، مقدار در-یکی هر امپدانس چه برحسب مبنای انتخاب شده برای همان طرف ترانسفور ماتور بیان شود و چه به طرف دیگر وابرده شود و برحسب مبنای انتخاب‌شده این طرف بیان شود یکی خواهد بود.

بنابراین، زمانی کـه از جریان مغناطنده صرف‌نظر شود، ترانسفورماتور در سیستم در-یکی کاملا تنها باکمك امپدانس $(R+jX)$ خود به‌نمایش درمی‌آید. وقتی این سیستم به‌کار رود هیچ تبدیل‌ولتاژ در-یکی انجام نمی‌گیرد، وهر گاه ازجریان مغناطنده صرف‌نظر شود، جریان نیز در دوطرف ترانسفورماتور همان مقدار در-یکی را خواهد داشت.

مثال ۶-۵ A و B و C، سه بخش یك سیستم الکتریکی تکفاز را مشخص می‌کنند. و چنانکه شکل ۶-۱۹ نشان می‌دهـد از طریق دو ترانسفورماتور بههـم وصل شده‌انـد. اندازه‌های نامی ترانسفورماتورها بهشرح زیراست

A–B ۱۰۰۰۰ kVA, ۱۳۸/۱۳٫۸ kV, رئکتانس نشت ۱۰٪

B–C ۱۰۰۰۰ kVA, ۱۳۸/۶۹ kV, رئکتانس نشت ۸٪

اگرمبنا در مدار B را ۱۰۰۰۰ kVA و ۱۳۸ kV انتخاب‌کنیم، امپدانس در-یکی بـار ۳۰۰ اهمی در مـدار C را وقتی به‌مدار C، B یا A برده شود به‌دست آورید. نمودار امپدانسهای مدار را با صرف‌نظرکردن از جریان مغناطنده، مقاومتهای ترانسفورماتورها، وامپدانسهای‌خط رسم‌کنید. افت ولتاژ را درصورتی‌که ولتاژ بار ۶۶ kV باشد، بافرض اینکه ولتاژ ورودی به‌مدار A ثابت باقی می‌ماند، تعیین‌کنید.

حل :

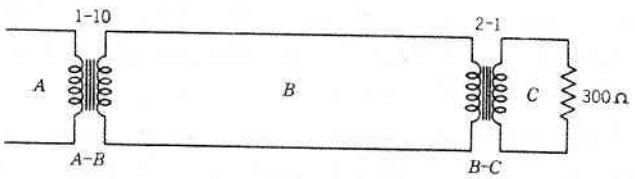
$$\text{ولتاژ مبنا برای مدار } A = ۱۳۸ \times ۰٫۱ = ۱۳٫۸ \text{ kV}$$

$$\text{ولتاژ مبنا برای مدار } C = ۱۳۸ \times ۰٫۵ = ۶۹ \text{ kV}$$

$$\text{امپدانس مبنای مدار } C = \frac{۶۹^۲ \times ۱۰۰۰}{۱۰۰۰۰} = ۴۷۶\ \Omega$$

$$\text{امپدانس در-یکی بار در مدار } C = \frac{۳۰۰}{۴۷۶} = ۰٫۶۳ \quad \text{در-یك}$$

چـون مبنا در بخشهای مختلف سیستم براساس نسبتهای تبدیـل ترانسفورماتورها انتخاب شده، امپدانس در-یکی وابرده به هر بخش سیستم یك مقدار پیدا می‌کند درستی این امر را می‌توان به‌صورت زیرتأییدکرد



شکل ۶-۱۹ مدارمثال ۶-۵.

$$\text{امپدانس مبنای مدار } B = \frac{۱۳۸^۲ \times ۱۰۰۰}{۱۰۰۰۰} = ۱۹۰۰\,\Omega$$

$$\text{امپدانس بار وابرده بهمدار } B = ۳۰۰ \times ۲^۲ = ۱۲۰۰\,\Omega$$

$$\text{امپدانس در-یکی بار وابرده بهمدار } B = \frac{۱۲۰۰}{۱۹۰۰} = ۰ر۶۳ \quad \text{در-یك}$$

$$\text{امپدانس مبنای مدار } A = \frac{۱۳ر۸^۲ \times ۱۰۰۰}{۱۰۰۰۰} = ۱۹\,\Omega$$

$$\text{امپدانس بار وابرده بهمدار } A = ۳۰۰ \times ۲^۲ \times ۰ر۱^۲ = ۱۲\,\Omega$$

$$\text{امپدانس در-یکی بار وابرده بهمدار } A = \frac{۱۲}{۱۹} = ۰ر۶۳ \quad \text{در-یك}$$

شکل۶-۲۰،نمودارامپدانسهای خواسته شده را با امپدانسهای در-یکی نشان می‌دهد. محاسبهٔ افت ولتاژ بهصورت زیراست:

$$\text{ولتاژ بین سرهای بار} = \frac{۶۶}{۶۹} = ۰ر۹۵۷ + j۰ \quad \text{در-یك}$$

$$\text{جریان بار} = \frac{۰ر۹۵۷ + j۰}{۰ر۶۳ + j۰} = ۱ر۵۲ + j۰ \quad \text{در-یك}$$

$$\text{ولتاژ ورودی} = ۰ر۹۵۷ + (۰ر۰۸ + j۰ر۱۰)(j۰)(۱ر۵۲ + j۰) =$$

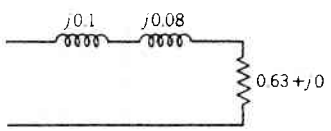
$$= ۰ر۹۵۷ + j۰ر۲۷۴ = ۰ر۹۹۵ \quad \text{در-یك}$$

ولتاژ بین سرهای بار زمانی‌که بار برداشته شود = ولتاژ ورودی

بنابراین

$$\text{افت ولتاژ} = \frac{۰ر۹۹۵ - ۰ر۹۵۷}{۰ر۹۵۷} \times ۱۰۰ = ٪۳ر۹۷ \qquad \square$$

بهعلت مزیتی کـه قبلا بهآن اشاره شد، اصلی‌که در مثال بالا دربارهٔ انتخاب مبناها



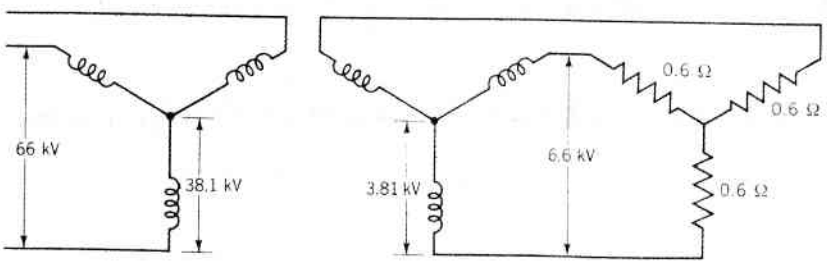
شکل ۶-۲۰ نمودارامپدانسهای‌مثال ۶-۵. امپدانسها برحسب در-یك داده شده‌اند.

برای بخشهای مختلف سیستم رعایت شد همیشه در انجام محاسبات در-یکی یـا درصدی دنبال می‌شود. کیلوولت‌آمپر مبنا باید درهمهٔ بخشهای سیستم یکی باشد وانتخاب کیلوولت مبنا در یك بخش از سیستم، کیلوولت مبنای بخشهای دیگر سیستم را با توجه به‌نسبتهای تبدیل ترانسفورماتورها تعیین خواهدکرد. دنبال کردن این روش انتخاب کیلوولتهای مبنا به‌ما امکان می‌دهد که امپدانسهای در-یکی تعیین شده در بخشهای مختلف سیستم را در یك نمودار امپدانس با هم ترکیب کنیم.

۶-۹ ترانسفورماتورهای سه‌فاز

سه ترانسفورماتور تکفاز مشابه را می‌توان به‌هم طوری وصل کـرد که سه سیم‌پیچ دارای ولتاژ نامی برابر به‌صورت Δ (مثلثی) وسه سیم‌پیچ هم‌ولتاژ دیگر به‌صورت Y (ستاره‌ای) به‌هم متصل شوند و تشکیل یك ترانسفورماتور سه فاز را بدهند. به‌چنین ترانسفورماتوری ستاره-مثلثی یامثلث-ستاره‌ای گفته می‌شود. اتصالات ممکن‌دیگر ستاره-ستاره‌ای و مثلث-مثلثی است. اگرسه ترانسفورماتور تکفازدارای سه سیم‌پیچ باشند (سیم‌پیچ اولیه، ثانویه و سوم)، دو دسته ازسیم‌پیچها ممکن است به‌صورت Y ویك‌دسته به‌صورت Δ یا دو دسته به‌صورت Δ ویك دسته به‌صورت Y به‌هم وصل‌شوند. به‌جای‌بهره‌گیری ازسه ترانسفورماتورتکفاز یکسان معمولتراست‌که از یك ترانسفورماتور سه فاز استفاده شود که هرسه فازش برروی سازهٔ آهنی واحدی قراردارند. تئوری ترانسفورماتور به‌اینکه یك واحد سه فاز باشد و یا یك‌گروه مرکب ازسه واحد تکفاز، بستگی ندارد.

بیاییم بـه بررسی مثالی عددی در مـورد یك ترانسفورماتور Y-Y متشکل از سه ترانسفورماتورتکفازهریك با اندازه‌های نامی ۲۵MVA و۸۱ر۳/۱ر۳۸kV بپردازیم. به این ترتیب، اندازه‌های نامی‌به‌صورت ترانسفورماتور سه‌فاز عبارت از ۷۵MVA، و ۶ر۶/۶۶(۶۶=۱ر۳۸×$\sqrt{۳}$)kV است. شکل ۶-۲۱، ترانسفورماتور را با بارسه فاز متعادل ۰ر۶Ω برفاز درطرف فشارضعیف نشان می‌دهد. و درآن هردو سیم‌پیچ اولیه وثانویه موازی باهم، مربوط به‌یك ترانسفورماتورتکفازند. چون مدارمتعادل است وفرض می‌کنیم‌که ولتاژهای سه فاز هم متعادل‌اند، نقطهٔ خنثای بار و نقطهٔ خنثای طرف فشارضعیف

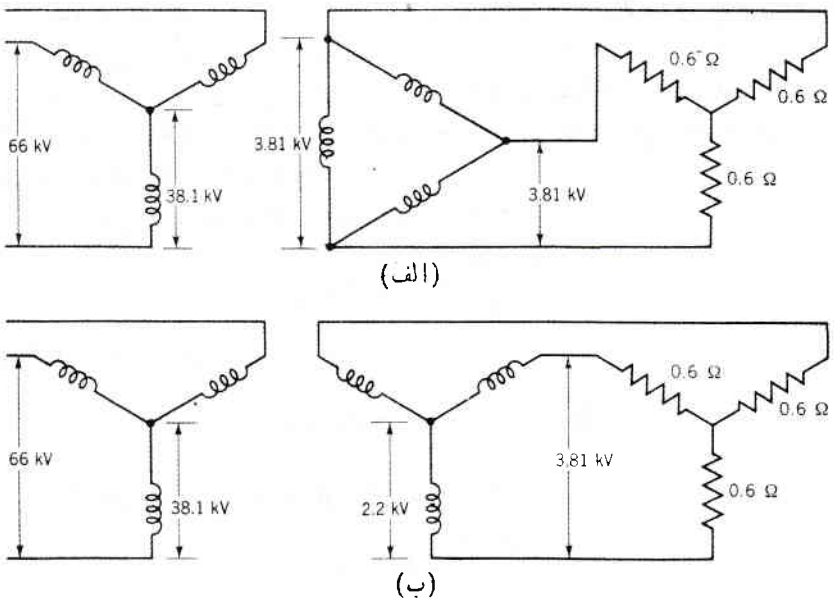


شکل ۶-۲۱ ترانسفورماتور Y-Y با ولتاژ نامی ۶ر۶/۶۶kV.

هم پتانسیل‌اند. در نتیجه چه نقطه‌های خنثی به‌هم متصل باشند و چه نباشند، می‌توان فرض کرد که هر مقاومت ۰٫۶ اهمی مستقیماً به‌دو سر یك سیم‌پیچ ۳٫۸۱ kV متصل است. در طرف فشارقوی، امپدانس اندازه‌گیری شده ازخط به‌خنثی عبارت است از

$$۰٫۶ \left(\frac{۳۸٫۱}{۳٫۸۱}\right)^۲ = ۰٫۶ \left(\frac{۶۶}{۶٫۶}\right)^۲ = ۶۰\,\Omega$$

شکل ۶ـ۲۲ (الف)، همان سه ترانسفورماتور راکه به‌صورت ستاره ـ مثلثی به‌همان بار ۰٫۶ Ω برفاز وصل شده‌اند، نشان می‌دهد. تا آنجایی‌که به‌اندازهٔ ولتاژ بین سرهای فشار ضعیف مربوط می‌شود به‌جـای ترانسفورماتور ستاره ـ مثلثی می‌توان یك گـروه ترانسفورماتور Y-Y کـه نسبت تبدیل هر ترانسفورماتورش (یا برای هر جفت سیم‌پیچ فاز یك ترانسفورماتور سه‌فاز) ۳۸٫۱/۲٫۲ kV است، مطابق شکل ۶ـ۲۲(ب)، نشاند. ترانسفورماتورهای شکل ۶ـ۲۲ (الف) و (ب) اگر به‌اختلاف فازها توجه نداشته باشیم باهم معادل‌اند. چنانکه درفصل ۱۱ خواهیم‌دید، اختلاف فازی بین‌دوطرف ترانسفورماتور ستاره ـ مثلثی وجود داردکه دراینجا نیازی به‌درنظرگرفتن ندارد. شکل ۶ـ۲۲(ب) نشان می‌دهدکه، مقاومت هرفاز بار از دیدگاه طرف فشارقوی عبارت است از



شکل ۶ـ۲۲ ترانسفورمـاتور شکل ۶ـ۲۱. (الف) با اتصال ستاره‌ـمثلثی و (ب) جانشین شده با یك ترانسفورمـاتور Y-Y دارای نسبت تبدیل ولتاژهای خط به‌خطی برابر با حالت ستاره‌ـمثلثی.

$$۰ر۶\left(\frac{۳۸ر۱}{۲ر۲}\right)^۲ = ۰ر۶\left(\frac{۶۶}{۳ر۸۱}\right)^۲ = ۱۸۰\,\Omega$$

دراینجا عامل ضرب،مربع نسبت ولتاژهای خط به‌خط است ونه مربع نسبت دورهای تك‌تك سیم‌پیچهای ترانسفورماتور ستاره-مثلثی.

ازاین بحث به‌این نتیجه می‌رسیم که برای انتقال مقدار اهمی امپدانس ازسطح ولتاژ یك طرف ترانسفورماتور سه فاز به‌سطح ولتاژ طرف دیگر، عامل ضرب عبارت از مربع نسبت ولتاژهای خط‌به‌خط است، چه اتصال ترانسفورماتور Y-Y باشد وچه ستاره-مثلثی. بنابراین در محاسبات در-یکی دربرگیرندهٔ ترانسفورماتورهای سه فاز، همان اصلی را که درمورد ترانسفورماتورهای تکفاز به‌دست آمد دنبال می‌کنیم ولازم است نسبت ولتاژهای مبنای دوطرف ترانسفورماتورهمان نسبت ولتاژهای نامی خط‌به‌خط‌دوطرف ترانسفورماتور را داشته باشد. مبنای kVA در هردوطرف یکی است.

مثال ۶-۶ سه ترانسفورماتور با اندازه‌های‌نامی ۲۵MVA، و ۳۸ر۱/۳ر۸۱ kV مطابق شکل ۶-۲۲ (الف) به‌صورت ستاره-مثلثی بسته شده‌اند وسه بارمقاومتی ۰ر۶ اهمی با اتصال Y دارند. مبنایی برابر ۷۵ MVA و ۶۶ kV برای طرف فشارقوی انتخاب کنید ومبنای طرف فشار ضعیف را به‌دست آورید. مقدار در-یکی مقاومت بار را درمبنای طرف فشار ضعیف تعیین‌کنید. سپس مقدار واحدهٔ مقاومت بار R_L را در طرف فشارقوی ومقدار در-یکی این مقاومت را درمبنای انتخاب شده بیابید.

حل: اندازه‌های نامی ترانسفورماتور به صورت‌گروه سه فاز عبارت است از ۷۵MVA، و ۶۶ Y/۳ر۸۱ Δ kV. بنابراین مبنا برای طرف فشار ضعیف عبارت است‌از ۷۵ MVA و ۳ر۸۱ kV.

امپدانس مبنا درطرف فشار ضعیف عبارت است‌از

$$\frac{(۳ر۸۱)^۲}{۷۵} = ۰ر۱۹۳۵\,\Omega$$

و درطرف فشار ضعیف

$$R_L = \frac{۰ر۶}{۰ر۱۹۳۵} = ۳ر۱۰ \text{ در-یك}$$

امپدانس مبنا درطرف فشارقوی عبارت‌است از

$$\frac{(۶۶)^۲}{۷۵} = ۵۸ر۱\,\Omega$$

و می‌دانیم که مقاومت واحدهٔ هرفاز درطرف فشارقوی ۱۸۰ Ω است. بنابراین

$$R_L = \frac{۱۸۰}{۵۸ر۱} = ۳ر۱۰ \quad \text{در-یك}$$

□

مقاومت R و رئکتانس نشت X ترانسفورماتور سه فاز، همچنانکه برای ترانسفورماتورهای تکفاز گفتیم با کمك آزمایش اتصال کوتاه اندازه‌گیری می‌شود، و مدار معادل سه فاز، R و X درهرخط به‌ترانسفورماتور سه فاز ایدئالی متصل‌اند. می‌دانیم که اگرهمهٔ کمیتهای مدار با انتخاب مبنای مناسب به‌صورت در-یکی بیان شوند R و X، چه درطرف فشارقوی وچه درطرف فشارضعیف، یك مقدار در-یکی خواهند داشت و مدار معادل تکفاز ترانسفورماتور با $R+jX$ برحسب در-یك بدون نیاز به نشان دادن ترانسفورماتور ایدئال بیانگر ترانسفورماتور کامل خواهد بود.

جدول پ-۵ پیوست کتاب،مقادیر نمونه‌وار امپدانسهای ترانسفورماتورها رابه‌دست می‌دهدکه اساساً همان رئکتانس نشت است. زیرا مقاومت معمولا کوچکتر از ۰٫۱ در-یك است.

مثال ۶-۷ ترانسفورماتور سه‌فازی دارای اندازه‌های نامی ۴۰۰ MVA و ۲۲۰Y/۲۲Δ kV است. امپدانس اتصال‌کوتاه اندازه‌گیری شده درطرف فشارضعیف ترانسفورماتور ۰٫۱۲۱ Ω است. و به‌علت کوچك بودن مقاومت، این مقدار را می‌توان برابر با رئکتانس نشت فرض‌کرد. رئکتانس در-یکی ترانسفورماتور را تعیین‌کنید. این رئکتانس اگر مبنا در طرف فشارقوی ترانسفورماتور ۱۰۰ MVA و ۲۳۰ kV باشد چقدر می‌شود.

حل : رئکتانس ترانسفورماتور درمبنای خودش عبارت است از

$$\text{در-یك} \quad \frac{۰٫۱۲۱}{(۲۲)^۲/۴۰۰} = ۰٫۱۰$$

درمبنای انتخاب شده این رئکتانس می‌شود

$$\text{در-یك} \quad ۰٫۱ \left(\frac{۲۲۰}{۲۳۰}\right)^۲ \frac{۱۰۰}{۴۰۰} = ۰٫۰۲۲۸$$

□

۶-۱۰ امپدانسهای در-یکی ترانسفورماتورهای سه سیم‌پیچه

سیم‌پیچهای اولیه و ثانویهٔ ترانسفورماتور دو سیم‌پیچه، یك‌کیلوولت آمپرنامی دارند، اما سه سیم‌پیچ ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه ممکن است‌کیلوولت‌آمپرهای نامی متفاوتی داشته باشند. امپدانس هر سیم‌پیچ ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه را می‌توان برحسب درصد یا در-یك بامبنای اندازه‌های نامی همان سیم‌پیچ بیان کرد، یا اینکه می‌توان از راه آزمایش امپدانسها را به‌دست آورد. لیکن، درهرمورد همهٔ امپدانسهای در-یکی درنمودارامپدانسها باید بایك مبنای‌کیلوولت‌آمپر بیان شوند.

سه امپدانس را می‌توان از راه آزمایش استاندارد اتصال‌کوتاه اندازه‌گیری‌کرد:

Z_{ps} = امپدانس نشت اندازه‌گیری‌شده دراولیه با ثانویه اتصال‌کوتاه شده و سیم‌پیچ سوم مدار باز

Z_{pt} = امپدانس نشت اندازه‌گیری شده دراولیه با سیم‌پیچ سوم اتصال‌کوتاه شده وثانویهٔ مدار باز

Z_{st} = امپدانس نشت اندازه‌گیری شده درثانویه با سیم‌پیچ سوم اتصال‌کوتاه شده واولیهٔ مدار باز

این سه امپدانس اندازه‌گیری شده، با امپدانس سه سیم‌پیچ اگـر همگی به‌طرف یکی از سیم‌پیچها وابرده شوند به‌صورت زیرمرتبط خواهند بود:

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned} \qquad (۳۸-۶)$$

که در آنها Z_p، Z_s و Z_t امپدانس سیم‌پیچهای اولیه، ثانویه وسوم هستندکه به‌مدار اولیه وابرده شده‌اند، اگر Z_{ps}، Z_{pt} و Z_{st} امپدانـسهای اندازه‌گیری شدهٔ وابرده به مدار اولیه باشند. حل سیستم معادله‌های (۶-۳۸) نتیجه می‌دهد.

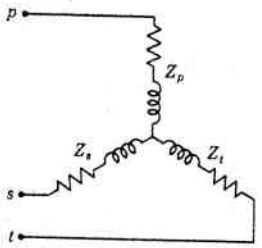
$$\begin{aligned} Z_p &= \frac{۱}{۲}(Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s &= \frac{۱}{۲}(Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t &= \frac{۱}{۲}(Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{aligned} \qquad (۳۹-۶)$$

امپدانس سیم‌پیچها، ستاره‌ای بسته شده‌اند تا مطابق شکل ۶-۲۳، بیانگرمدارمعادل تکفاز ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه بـا جریان مغناطندهٔ صرف‌نظرشده باشند. نقطهٔ مشترک، فرضی است وارتباطی با نقطهٔ خنثای سیستم ندارد. نقاط p، s و t درنمودار امپـدانسها محل پیوند ترانسفورماتور به‌امپدانس معادل بخشهایی از سیستم است کـه به سیم‌پیچهای اولیه، ثانویه وسوم متصل‌اند. چون مقداراهمی امپدانسها باید به‌ولتاژبرابری وابرده‌شوند، نتیجه می‌گیریم‌که در تبدیل به‌امپدانس در-یکی، مبنای کیلوولت‌آمپر برابری برای هرسه مداروبه‌سه مبنای ولتاژ در سه مدار نیازمندیم‌که نسبتهایشان به‌هم برابرنسبتهای ولتاژهای نامی خط به‌خط سه مدار ترانسفورماتور به‌هم باشد.

مثال ۶-۸ اندازه‌های نامی یك ترانسفورماتور سه فاز سه سیم‌پیچه عبارت‌اند از

اولیه اتصال ستاره‌ای، ۶۶ kV، ۱۵ MVA

ثانویه اتصال ستاره‌ای، ۱۳٫۲ kV، ۱۵٫۰ MVA



شکل ۶-۲۳ مدارمعادل ترانسفورماتور سه سیم‌پیچه که درنقاط p، s و t به‌مدارمعادل بخشهایی ازسیستم که به‌سیم‌پیچهای اولیه، ثانویه وسوم ترانسفورماتور متصل‌اند پیوند می‌یابد.

سیم‌پیچ سوم اتصال مثلثی، ۲ر۳ kV، ۵ MVA
امپدانسهای نشت، با صرف‌نظرکردن ازمقاومت، عبارت‌اند از

$$Z_{ps} = \%۷ \text{ با مبنای } ۱۵\,\text{MVA} \text{ و } ۶۶\,\text{kV}$$

$$Z_{pt} = \%۹ \text{ با مبنای } ۱۵\,\text{MVA} \text{ و } ۶۶\,\text{kV}$$

$$Z_{st} = \%۸ \text{ با مبنای } ۱۰ر۰\,\text{MVA} \text{ و } ۱۳ر۲\,\text{kV}$$

امپدانسهای در-یکی مدار معادل اتصال-ستاره‌ای را بـا مبنای ۱۵ MVA و ۶۶ kV در مدار اولیه به‌دست آورید.

حل : بامبنای ۱۵MVA و۶۶kV درمدار اولیه، مبناهای مناسب برای امپدانسهای در-یکی مدار معادل عبارت از ۱۵MVA و۶۶ kV برای کمیتهای مداراولیه، ۱۵MVA و ۱۳ر۲ kV برای کمیتهای مدار ثانویه، و ۱۵ MVA و ۲ر۳ kV برای کمیتهای مـدار سیم‌پیچ سوم است.

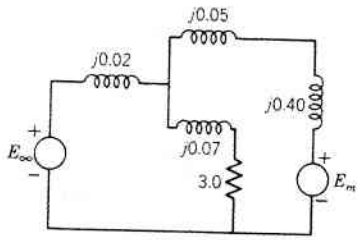
Z_{ps} و Z_{pt}، در مدار یکمین اندازه‌گیری شده‌اند و بنابراین با مبنای مناسب مدار معادل بیان شده‌اند. Z_{st}، به‌تغییرمبنای ولتاژ نیازندارد و تنها نیازمند به‌تغییرمبنای kVA است:

$$Z_{st} = \%۸ \times ۱۵/۱۰ = \%۱۲$$

برحسب در-یك درمبنای مشخص شده

$$Z_p = \frac{۱}{۲}(j۰ر۰۷ + j۰ر۰۹ - j۰ر۱۲) = j۰ر۰۲ \quad \text{در-یك}$$

$$Z_s = \frac{۱}{۲}(j۰ر۰۷ + j۰ر۱۲ - j۰ر۰۹) = j۰ر۰۵ \quad \text{در-یك}$$



شکل ۶ـ۲۴ نمودار امپدانسهای مثال ۶ـ۹.

□ $Z_t = \frac{۱}{۲}(j۰٫۰۹ + j۰٫۱۲ - j۰٫۰۷) = j۰٫۰۷$ در ـ یك

مثال ۶ـ۹ منبع ولتاژ ثابتی (شینه بینهایت)، یك بـار کاملا مقاومتی ۵ MW و ۲٫۳ kV و یك موتـور سنکرون ۷٫۵ MVA و ۱۳٫۲ kV بـا رئکتانس زیر گذرای $X'' = ٪۲۰$ را تغذیه می‌کند. منبع ولتاژ به اولیهٔ ترانسفورماتور سه سیم‌پیچهٔ مثال ۶ـ۸ متصل است. موتور و بـار مقاومتی به‌سیم‌پیچهای ثانویه وسوم ترانسفورماتور متصل‌اند. نمودار امپدانسهای سیستم را رسم کنید و امپدانس در ـ یکی را در مدار اولیه با مبنای ۶۶ kV و ۱۵ MVA به‌دست آورید.

حل : منبع ولتاژ ثابت را می‌توان به‌صورت ژنراتوری بی هیچ امپدانس داخلـی نشان داد.

مقاومت بار در مدار سیم‌پیچ سوم با مبنای ۵ MVA و ۲٫۳ kV، معادل ۱٫۰ در ـ یك است. مقاومت بار با مبنای ۱۵ MVA و ۲٫۳ kV عبارت است از

$$R = ۱٫۰ \times \frac{۱۵}{۵} = ۳٫۰ \quad \text{در ـ یك}$$

رئکتانس موتور با مبنای ۱۵ MVA و ۱۳٫۲ kV چنین است

$$X'' = ۰٫۲۰ \frac{۱۵}{۷٫۵} = ۰٫۴۰ \quad \text{در ـ یك}$$

شکل ۶ـ۲۴، نمودار امپدانسهای مورد نظر است.

۶ـ۱۱ نمودار تك خطی

اکنون مدلهای مداری خطوط انتقال، ماشینهای سنکرون، و ترانسفورماتورها را در دست داریم. پس ازاین خواهیم دیدکه چگونه مجموعهٔ این اجزاء را درکنارهم بگذاریم تامدل مداری یك سیستم کامل به‌دست آید. چون حل هر سیستم سه فاز متعادل همیشه با حل یك

مدار تکفاز متشکل از یکی از سه خط و سیم خنثای برگشت انجام می‌شود، به‌ندرت نیاز داریم برای رسم نمودار مدار، بیش‌از یك فاز و سیم خنثای برگشت را به‌نمایش بگذاریم. غالباً با حذف‌کردن سیم خنثای برگشت و نشان دادن اجزای مدار با نمادهای استاندارد و نه با مدارهای معادلشان این نمودار باز هم ساده‌تر می‌شود. پارامترهای مدار نشان داده نمی‌شود، وخط انتقال باخط تکی بین دوسرش نمایش‌داده می‌شود. چنین نمودارساده شدهٔ سیستم الکتریکی، نمودار تك خطی نامیده می‌شودکه با کمك یك خط‌ونمادهای‌استاندارد، خط انتقال وتجهیزات مربوط به سیستم الکتریکی را نشان می‌دهد.

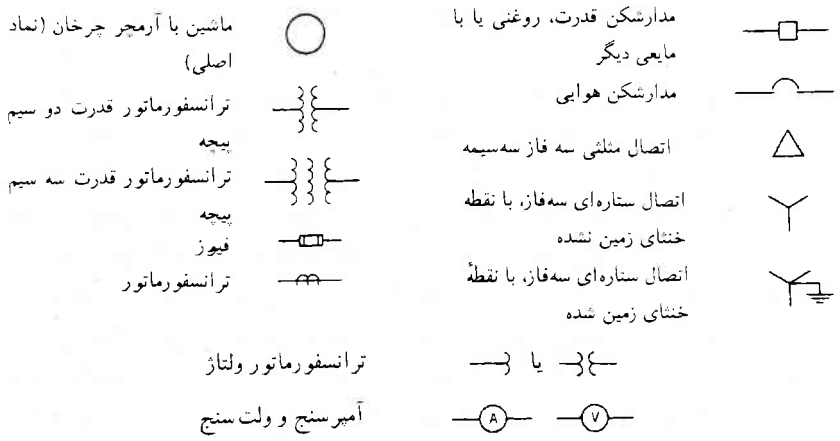
هدف از نمودارتك‌خطی ارائه اطلاعات مهم دربارهٔ سیستم به‌اجمال است. اهمیت ویژگیهای مختلف هرسیستم بسته به‌مسئلهٔ موردبحث تغییرمی‌کند، ومقداراطلاعات گنجانده درنمودارتك‌خطی بستگی به‌کاربردی داردکه نمودار برای‌آن رسم شده‌است. برای مثال، در هنگام بررسی بار، محل مدارشکنها و رله‌ها اهمیتی ندارد. اگر هدف اصلی نمودار ارائه اطلاعات برای انجام چنین بررسی باشد، مدارشکنها و رله‌ها نشان داده‌نمی‌شوند. در صورتی که، بررسی پایداری سیستم در حالت گذرای ناشی از بروز اتصالی، بستگی به‌سرعت عمل رله‌ها و مدارشکنها درمجزاکردن قسمت عیب‌دار از بقیهٔ سیستم دارد. پس دراین‌حالت، اطلاعات مربوط به‌مدارشکنها ممکن‌است بسیارمهم باشد. گاهی نمودارهای تك خطی شامل اطلاعاتی دربارهٔ ترانسفورماتورهای جریان و ولتاژی هستند که رله‌ها را به‌سیستم وصل می‌کنند و یا به‌منظور اندازه‌گیری نصب شده‌اند. می‌توان انتظار داشت که اطلاعات گنجانده درهرنمودار تك‌خطی بسته به‌مسئلهٔ مورد بررسی و بسته به‌روش‌کار نهاد خاصی که نمودار را تهیه‌کرده است متفاوت باشد.

مؤسسه‌استانداردملی‌امریکا (ANSI) ومؤسسه مهندسان برق والکترونیك (IEEE) مجموعهٔ نمادهای استاندارد برای نمودارهای الکتریکی را منتشرکرده‌اند.* بعضی مؤلفان گاهی‌این‌نمادها رابه‌کارنمی‌برند، به‌ویژه برای نشان دادن ترانسفورماتورها. شکل۶ـ۲۵، تعدادی از نمادها را که معمولا به‌کار می‌روند نشان می‌دهد. نماد اصلی برای ماشینهای الکتریکی باآرمچرهای چرخان، یك دایره است، اماجرح وتعدیلهای زیادی برنماداصلی انجام می‌گیرد تابتوان همهٔ ماشینهای الکتریکی چرخان متداول را نشان داد. برای‌کسانی که مدام با نمودارهای تك‌خطی کار نمی‌کنند بهتراست هرماشین خاص را با کمك نماد اصلی همراه با اطلاعات لازم درمورد نوع واندازه‌های نامیش نشان داد.

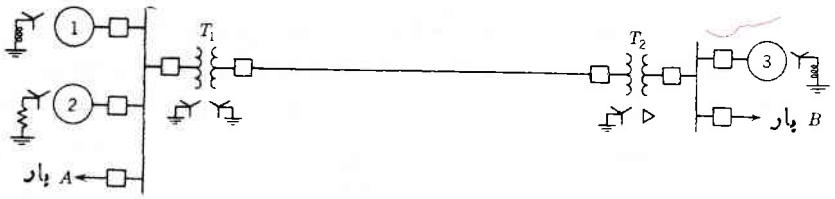
دانستن محل نقاطی‌که سیستم به‌زمین متصل شده است برای محاسبهٔ مقدار جریانی که در زمان بروز یك اتصالی نامتقارن به‌زمین جاری می‌شود از اهمیت برخورداراست. نماد استاندارد برای مشخص‌کردن اتصال Y سه فازی‌که نقطهٔ خنثایش مستقیماً زمین شده درشکل۶ـ۲۵ دیده می‌شود. اگر مقاومت یا رئکتانسی بین نقطهٔ خنثی و زمین‌گذارده شده باشد تا میزان جریان اتصال زمین را محدودکند، می‌توان نماد مربوط به‌مقاومت یا

---

* نمادهای گرافیك برای نمودارهای الکتریکی و الکترونیکی، استاندارد IEEE شمارهٔ ۳۱۵ـ۱۹۷۵.



شکل ۶ـ۲۵ نمادهای تجهیزات.



شکل ۶ـ۲۶ نمودار تك خطی یك سیستم الکتریکی.

اندوکتانس را به‌نماد استاندارد اتصال Y زمین شده افزود. در بیشتر ترانسفورماتورهای سیستمهای انتقال، نقطه خنثی مستقیماً زمین می‌شود. نقاط خنثای ژنراتورها معمولا ازطریق مقاومتهای بسیار بالا وگاهی ازطریق پیچکهای اندوکتانس زمین می‌شوند.

شکل ۶ـ۲۶، نمودار تك‌خطی سیستم قدرت بسیارساده‌ای است. دو ژنراتور، که یکی ازطریق یك رئکتانس ودیگری از طریق یك مقاومت زمین شده‌اند، به‌یك شینه و از طریق ترانسفورماتوری افزاینده، به‌یك خط انتقال وصل شده‌اند. ژنراتور دیگری، که از طریق یك رئکتانس زمین شده است، به یك شینه و از طریق ترانسفورماتوری به سر مقابل خط انتقال وصل شده است. یك بارهم به هر شینه وصل شده است. اطلاعات دربارهٔ بارها، اندازه‌های نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورها، رئکتانسهای اجزای مختلف مدار غالباً برروی نمودار تك خطی داده می‌شود.

۶ـ۱۲ نمودارهای امپدانسها و رئکتانسها

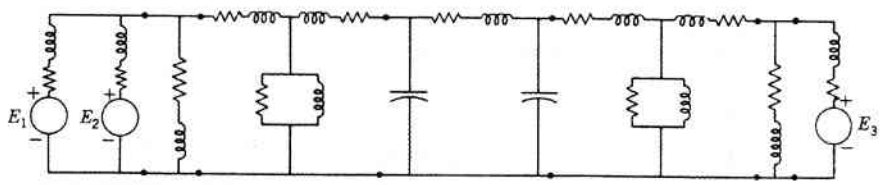
برای محاسبهٔ کار سیستم در بارداری یا هنگام بروز اتصالی، نمودار تك خطی برای رسم

مدار تکفازمعادل سیستم به‌کارمی‌رود. شکل ۶ـ۲۷ باترکیب‌کردن مدارهای معادل اجزای مختلف شکل ۶ـ۲۶ نمودار امپدانسهای سیستم را تشکیل می‌دهد. اگر قرار باشد بررسی بار صورت گیرد، بارهای پس افتی A و B به‌کمك یك مقاومت متوالی با رئکتانس القایی نمایانده می‌شوند. نمودار امپدانسها، امپدانسهای محدودکنندهٔ جریان درنمودار تك خطی بین نقاط خنثای ژنراتورها و زمین را شامل نمی‌شود زیرا دروضع متعادل، هیچ جریانی به‌زمین نمی‌گذرد و نقـاط خنثای ژنراتورها بـا نقطهٔ خنثای سیستم، هم پتانسیل‌اند. چون جریان مغناطندهٔ ترانسفورماتور معمولا درمقایسه بـا جریان بارکامل ناچیز است، معمولا ادمیتانس موازی ازمدار معادل ترانسفورماتور حذف می‌شود.

چنانکه پیشترگفته شد، درهنگام انجام محاسبات اتصال‌کوتاه حتی باکمك کامپیوترهای رقمی، مقاومتها حذف می‌شوند. البته، حذف مقاومتها مقداری خط وارد کار می‌کند، امـا چون رئکتانس القایی سیستم بسیار بزرگترازمقاومتش است نتایج محاسبات رضایت‌بخش خواهد بود. مقاومت و رئکتانس القایی مستقیماً باهم جمع نمی‌شوند، و در صورت کوچك بودن مقاومت، امپدانس، اختلاف چندانی بـا رئکتانس القایـی ندارد. بارهـای بدون ماشینهای چرخان، تأثیربسیارکمی برروی جریان کل خط درهنگام بروز اتصالی دارند و معمولا حذف می‌شوند لیکن، بارهـای از نـوع موتور سنکرون همیشه در هنگام انجـام محاسبات اتصال‌کوتاه به‌حساب می‌آیند زیرا محرکه‌های الکتریکی آنها درایجاد جریان اتصال‌کوتاه سهیم است. اگـر نمودار برای تعیین جریان، درست در لحظهٔ بعد از بروز اتصال‌کوتاه به‌کار می‌رود، موتورهای القایی نیز باید به‌صورت یك emf متوالی بـا یك رئکتانس القایی درنمودار به‌حساب آیند. درانجام محاسبهٔ جریان چندسیکل پس از وقوع اتصال‌کوتاه ازموتورهای القایی صرف‌نظر می‌شود، زیرا سهم موتورالقایی درجریان، پس ازاتصال‌کوتاه شدن موتور، بسیارسریع ازبین می‌رود.

اگربخواهیم محاسبات جریان اتصال‌کوتاه را باحذف‌کردن همهٔ بارهای استاتیك، همهٔ مقاومتها، جریـان مغناطندهٔ ترانسفورمـاتور، و ظرفیت خط انتقال ساده‌کنیم، نمودار امپدانسها به‌نمودار رئکتانسهای شکـل ۶ـ۲۸ تبدیل می‌شود. این ساده‌کردنها تنها در محاسبات اتصال‌کوتاه، ونه در بررسیهای بخش بارکه موضوع فصل ۸ است، به‌کارمی‌آید. اگرکامپیوتر در دسترس باشد، به‌چنین ساده‌کردنهایی نیاز نیست.

نمودارهای امپدانـها و رئکتانسهایی راکـه در اینجا مطرح است‌گاهی نمودارهای



شکل ۶ـ۲۷ نمودار امپدانسهای مربوط به‌نمودار تك خطی شکل ۶ـ۲۶.

توالی مثبت می‌گویند. زیرا امپدانسهایی راکه درسیستمهای سه‌فازمتقارن دربرابرجریانهای متعادل قراردارند نشان می‌دهند. اهمیت این نامگذاری بامطالعهٔ فصل ۱۱ آشکار می‌شود.

اگر داده‌های نمودارتك‌خطی داده شده بود می‌توانستیم مقادیر رئکتانسها را برروی شکل ۶–۲۸ نشان دهیم. اگرقراربود مقادیر اهمی نشان داده شود می‌بایست همگی به‌یك سطح ولتاژ مانند ولتاژ طرفی ازترانسفورماتورکه شامل خط انتقال است وابرده می‌شدند. لیکن، چنانکه می‌دانیم اگر میناهای بخشهای مختلف مدارکه به‌وسیلهٔ ترانسفورماتور به‌هم متصل شده‌اند به‌درستی مشخص شوند، مقداردر-یکی‌هرامپدانس وقتی دربخش خود تعیین شود از دیدگاه هربخش دیگرهمان مقدار را دارد. بنابراین کافی است هرامپدانس را با مبنای بخش خودش محاسبه‌کنیم. مـزیت بزرگ به‌کار بردن مقادیر در-یکی این است‌که برای وابردن یك امپدانس از یـك طرف ترانسفورماتور به‌طرف دیگر، هیـچ محاسبه‌ای لازم نیست.

نکات زیر باید به‌خاطر سپرده شود:

۱. کیلوولت مبنا وکیلوولت‌آمپر مبنا در یك بخش از سیستم انتخاب می‌شود. مراد از مقادیرمبنای سیستم سه‌فاز،کیلوولت خط به‌خط وکیلوولت آمپریا مگاولت آمپر سه‌فازاست.

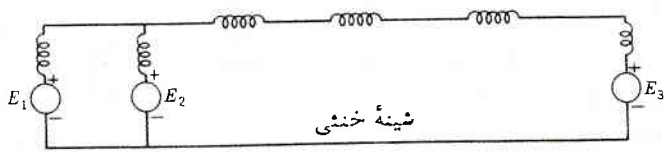
۲. برای بخشهای دیگر سیستم، یعنی طرفهای دیگر ترانسفورماتورها، کیلوولت مبنای هر بخش برحسب نسبتهـای ولتاژ خط به‌خط ترانسفورماتورهـا تعیین می‌شود،کیلوولت آمپرمبنای همهٔ بخشهای سیستم یك مقدار دارد. ذکرکیلوولت آمپرمبنای هربخش از سیستم برروی نمودار تك‌خطی می‌تواند مفید باشد.

۳. اطلاعات امپدانسی موجود برای ترانسفورماتورهای سه‌فاز معمولا به‌صورت در-یك یا درصد بامبنایی است‌که ازاندازه‌های نامی تعیین می‌شود.

۴. در مورد سه ترانسفورماتور تکفاز یـك واحـد سه فاز، اندازه‌های نامی سه‌فـاز از روی اندازه‌های نامی هردستگاه تکفاز بـه دست می‌آیـد. امپدانس برحسب درصد برای گروه سه‌فاز با امپدانس هریك ازترانسفورماتورها برابر است.

۵. امپدانس در-یکی داده شده هربخش با مبنایی غیراز مبنایی‌که بـرای آن بخش از سیستم تعیین شده‌است باید به‌کمك معادلهٔ (۲–۵۲) به‌مبنای مناسب تبدیل شود.

مثال ۶–۱۰ یك ژنراتور سه فـاز ۳۰۰ MVA و ۲۰ kV رئکتانس زیرگذرایی معادل۲۰٪دارد. این ژنراتور، چند موتورسنکرون را از طریق خط انتقالی به‌طول ۶۴ km



شکل ۶–۲۸ نمودار رئکتانسهای حاصل از شکل ۶–۲۷ بـا حذف همهٔ بارها، مقاومتها، و ادمیتانسهای موازی.

(۴۰ mi) که مطابق شکل ۶-۲۹ از دو طرف به ترانسفورماتورهایی متصل است تغذیه می‌کند. موتورها، که همگی ولتاژ نامی ۱۳٫۲ kV دارند با تنها دوموتور معادل نشان داده شده‌اند. نقطهٔ خنثایی یک موتور (M_1) از طریق رئکتانس، زمین شده است. نقطهٔ خنثای موتور دوم (M_2) زمین نشده است (حالتی غیرعادی). ورودی نامی موتورها عبارت از ۲۰۰ MVA و ۱۰۰ MVA به ترتیب برای M_1 و M_2 است و در هر موتور $X'' = 20\%$. اندازه‌های نامی ترانسفورماتور T_1، ۳۵۰ MVA و ۲۳۰/۲۰ kV با رئکتانس نشت ۱۰٪ است. ترانسفورماتور T_2 از سه ترانسفورماتور تکفاز هریک با اندازه‌های نامی ۱۲۷/۱۳٫۲ kV و ۱۰۰ MVA با رئکتانس نشت ۱۰٪ تشکیل شده است. رئکتانس متوالی خط انتقال، ۰٫۵ Ω/km است. نمودار رئکتانس‌های سیستم را با مقادیر در-یکی رسم کنید. اندازه‌های نامی ژنراتور را به‌عنوان مبنا درمدار ژنراتور انتخاب کنید.

حل: توان نامی سه فاز ترانسفورماتور T_2 عبارت است از

$$۳ \times ۱۰۰ = ۳۰۰ \text{ kVA}$$

ونسبت ولتاژهای خط به‌خط آن عبارت است از

$$\sqrt{۳} \times ۱۲۷/۱۳٫۲ = ۲۲۰/۱۳٫۲ \text{ kV}$$

مبنای ۳۰۰ MVA و ۲۰ kV درمدار ژنراتور، به‌مبنای ۳۰۰ MVA در همهٔ بخشهای سیستم و به‌مبناهای ولتاژ زیر نیاز دارد:

(چون T_1، ولتاژهای نامی ۲۳۰/۲۰ kV دارد) ۲۳۰ kV: درخط انتقال

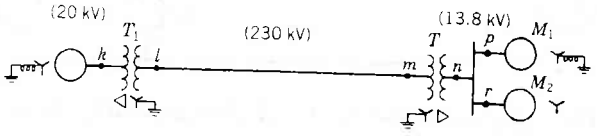
$$۲۳۰ \times \frac{۱۳٫۲}{۲۲۰} = ۱۳٫۸ \text{ kV}$$: درمدار موتورها

این مبناها بر روی نمودار تك خطی شکل (۶-۲۹) درون پرانتز نشان داده شده است.

رئکتانسهای ترانسفورماتورها پس از تبدیل به مبنای مناسب عبارت‌انداز:

$$X = ۰٫۱ \times \frac{۳۰۰}{۳۵۰} = ۰٫۰۸۵۷ \text{ در-یك}$$: ترانسفورماتور T_1

$$X = ۰٫۱ \left(\frac{۱۳٫۲}{۱۳٫۸}\right)^۲ = ۰٫۰۹۱۵ \text{ در-یك}$$: ترانسفورماتور T_2



شکل ۶-۲۹ نمودار تك خطی مثال ۶-۱۰.

امپدانس مبنای خط انتقال عبارت است از

$$\frac{(۲۳۰)^۲}{۳۰۰} = ۱۷۶٫۳\ \Omega$$

و رئکتانس خط عبارت است از

$$\frac{۰٫۵ \times ۶۴}{۱۷۶٫۳} = ۰٫۱۸۱۵ \text{ در-یك}$$

$$\text{رئکتانس موتور } M_۱ = ۰٫۲ \left(\frac{۳۰۰}{۲۰۰}\right)\left(\frac{۱۳٫۲}{۱۳٫۸}\right)^۲ = ۰٫۲۷۴۵ \text{ در-یك}$$

$$\text{رئکتانس موتور } M_۲ = ۰٫۲ \left(\frac{۳۰۰}{۱۰۰}\right)\left(\frac{۱۳٫۲}{۱۳٫۸}\right)^۲ = ۰٫۵۴۹۰ \text{ در-یك} \qquad \square$$

شکل ۶ـ۳۰ نمودار رئکتانسهای خواسته شده است.

مثال ۶ـ۱۱ اگر موتورهای $M_۱$ و $M_۲$ مثال ۶ـ۱۰ به‌ترتیب ورودیهای ۱۲۰ و ۶۰ مگاوات را با ولتاژ ۱۳٫۲ kV داشته باشند، و هردو با ضریب توان یك کار کنند، ولتاژ بین سرهای ژنراتور را به‌دست آورید.

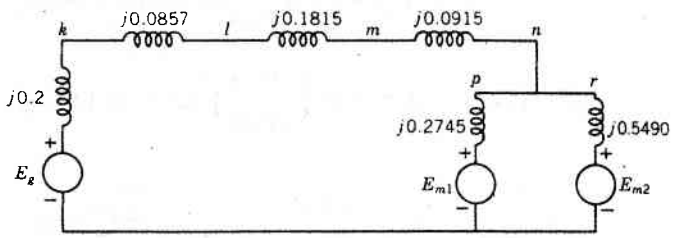
حل: موتورها باهم ۱۸۰ MW مصرف دارند، یا

$$\frac{۱۸۰}{۳۰۰} = ۰٫۶ \text{ در-یك}$$

درنتیجه با V و I درسرهای موتورها برحسب در-یك

$$|V| \cdot |I| = ۰٫۶ \text{ در-یك}$$

و چون



شکل ۶ـ۳۰ نمودار رئکتانسهای مثال ۶ـ۱۰. رئکتانسهای در-یکی دارای مبناهای مشخص شده‌اند.

$$V=\frac{۱۳٫۲}{۱۳٫۸}=۰٫۹۵۶۵ \angle ۰^\circ \text{ در-یك}$$

$$I=\frac{۰٫۶}{۰٫۹۵۶۵}=۰٫۶۲۷۳ \angle ۰^\circ \text{ در-یك}$$

بین سرهای ژنراتور

$$V=۰٫۹۵۶۵+(۰٫۰۹۱۵+j۰٫۱۸۱۵+j۰٫۰۸۵۷)۰٫۶۲۷۳$$

$$=۰٫۹۵۶۵+j۰٫۲۲۵۰=۰٫۹۸۲۶ \angle ۱۳٫۲^\circ \text{ در-یك}$$

ولتاژ بین سرهای ژنراتور عبارت است از

$$۰٫۹۸۲۶\times ۲۰=۱۹٫۶۵\,\text{kV} \qquad \square$$

۱۳-۶ مزیتهای محاسبات در-یکی

انجام محاسبات سیستمهای الکتریکی برحسب مقادیر در-یکی، کار را بسیار ساده می‌کند. برآورد واقعی ارزش روش در-یکی از راه تجربه دست می‌آید. بعضی از مزیتهای این روش به‌اجمال در زیر می‌آید.

۱. تولیدکنندگان معمولا امپدانس هر وسیله را برحسب درصد یا در-یك با مبنای اندازه‌های نامی (پلاك آن) ارائه می‌کنند.

۲. امپدانسهای در-یکی ماشینهای هم‌نوعی‌که اندازه‌های نامی بسیار متفاوت دارند معمولا بسیار به‌هم نزدیك است، اگرچه مقدار اهمی آنها درماشینهای با اندازه‌های نامی متفاوت باهم اختلاف زیادی دارند. از این‌رو، هنگامی‌که امپدانس به‌طور قطع معلوم نیست، معمولا می‌توان از روی مقدار متوسط جدولها امپدانس در-یکی را با دقت کافی انتخاب‌کرد. تجربه کار با مقادیر در-یکی باعث آشنایی بامقادیر مناسب امپدانس در-یکی انواع مختلف وسایل می‌شود.

۳. زمانی‌که دریك مدارمعادل، امپدانسها برحسب‌اهم مشخص شده‌اند، هرامپدانس برای وابردن به‌این مدار باید درمربع نسبت ولتاژهای نامی دوطرف ترانسفورماتوروصل کنندهٔ مدار مرجع به مدار شامل امپدانس ضرب شود. امپدانس در-یکی، درصورتی‌که با مبنای مناسب به‌دست‌آمده باشد، مقدارواردهٔ برابری درهردوطرف ترانسفورماتور دارد.

۴. نوع‌اتصال ترانسفورماتورها درمدارهای سه‌فاز، تأثیری برامپدانسهای در-یکی مدارمعادل ندارد، اگرچه‌این نوع‌اتصال، رابطهٔ بین مبنای ولتاژ دوطرف ترانسفورماتور را تعیین می‌کند.

۶-۱۴ خلاصه

معرفی مدار معادل ساده شده برای ژنراتور سنکرون وترانسفورماتور در این فصل برای بحثهای آینده از اهمیت زیادی برخوردار است.

دیدیم که ژنراتور سنکرون با افزودن تحریکش مقدار توان واکنشی فزاینده‌ای به‌سیستم متصل به خود تحویل می‌دهد. برعکس، با کاستن تحریکش مقدار توان واکنشی تحویلی کاهش می‌یابد و زمانی که کم تحریک باشد از سیستم، توان واکنشی می‌گیرد. این تحلیل براساس این فرض انجام شد که ژنراتور به آن چنان سیستم بزرگی متصل است که ولتاژ بین سرهایش همواره ثابت می‌ماند. این تحلیل درفصل ۸ به‌مولدی تعمیم می‌یابد که سیستمی را که بامدار معادل تونن خود به‌نمایش درآمده تغذیه می‌کند.

در طول فصلهای آینده تقریباً همواره از محاسبات در-یکی استفاده خواهد شد. دیدیم که با استفاده‌ازمحاسبات در-یکی چگونه ترانسفورماتور از مدارمعادل حذف می‌شود. باید دانست که ضریب $\sqrt{3}$ که ارتباط ولتاژ خط به‌خط مبنا را به ولتاژ خط به خنثای مبنا تصریح می‌کند درمحاسبات در-یکی دخالت نمی‌کند.

دررسیدن به‌مدارمعادل‌ازروی نمودارتك خطی، انتخاب مبنای مناسب برای بخشهای مختلف مدار متضمن ترانسفورماتور و محاسبهٔ پارامترهای هر بخش برحسب در-یك با مبنای مشخص شده برای آن بخش، اساس کار را تشکیل می‌دهد.

مسائل

۶-۱ با جمع کردن mmf بیان شده درمعادله‌های (۶-۶) تا (۶-۸)، موج روندهٔ mmf داده شده درمعادلهٔ (۶-۱۰) را به‌دست آورید.

۶-۲ بیشترین سرعت چرخش دو مولد سوار به‌یك محور را طوری به دست آورید که فرکانس یکی ۶۰ Hz و فرکانس دیگری ۲۵ Hz شود. هریك ازماشینها چند قطب دارد؟

۶-۳ رئکتانس سنکرون ژنراتوری p u ۱٫۰، و رئکتانس نشت آرمچر آن p u ۰٫۱ است. ولتاژ نسبت به خنثای فاز a در شینه‌ای از یك سیستم بزرگ متصل به ژنراتور $I_a = 1{,}0 \angle -30^\circ$ p u است، و ژنراتور جریان $1{,}0 \angle 0^\circ$ p u را تحویل می‌دهد. ازمقاومت سیم‌پیچ صرف‌نظر کنید و (الف) افت ولتاژ داخلی ماشین براثر واکنش آرمچر را به‌دست آورید، (ب) ولتاژ بی‌باری E_g فاز a از ژنراتور نسبت به خنثی را بیابید، (ج) مقادیر در-یکی P و Q تحویلی به شینه را تعیین کنید.

۶-۴ بخشهای (ب) و (ج) مسئلهٔ ۶-۳ را به ازای $I_a = 1{,}0 \angle 30^\circ$ p u حل کنید و نتایج این دومسئله را باهم بسنجید.

۶-۵ به‌ازای جریان آرمچر معینی دریك ژنراتورسنکرون، mmf ناشی‌ازجریان تحریك

دوبرابر mmf ناشی از واکنش آرمچر است. با صرف‌نظرکردن از اشباع، نسبت ولتاژ E_r ناشی از شار شکاف هوایی به ولتاژ بی‌باری ژنراتور را هنگامی به‌دست آورید که (الف) I_a با E_r همفاز است، (ب) I_a نسبت به E_r، ۹۰° پس‌افت دارد، و (ج) I_a نسبت به E_r، ۹۰° پیش‌افت دارد.

۶-۶ اندازه‌های نامی ترانسفورماتور تکفازی ۴۴۰/۲۲۰ V و ۵٫۰ kVA است. زمانی که طرف فشار ضعیف اتصال‌کوتاه شود و ۳۵ V به طرف فشار قوی اعمال شود جریان نامی از سیم پیچها می‌گذرد وتوان ورودی، ۱۰۰ W است. اگر اتلاف توان و نسبت رئکتانس به‌مقاومت دوسیم‌پیچ برابرباشد، مقاومت ورئکتانس سیم‌پیچهای فشارقوی و فشار ضعیف را به‌دست آورید.

۶-۷ ترانسفورماتورتکفازی با اندازه‌های نامی ۳۰ kVA و ۱۲۰۰/۱۲۰ V به‌صورت اتوترانسفورماتور بسته شده است تا ولتاژی معادل ۱۳۲۰ V را از شینه‌ای به ولتاژ ۱۲۰۰ V تأمین کند. (الف) نمودار اتصالات ترانسفورماتور را با نشان دادن نشانه‌های قطبداشت سیم‌پیچها وجهت مثبت انتخابی برای جریان سیم‌پیچها به‌طوری که جریانها باهم همفاز باشند رسم کنید. (ب) بر روی نمودار، مقادیر جریان نامی را در سیم‌پیچها و در ورودی و خروجی نشان دهید. (ج) کیلو ولت آمپر نامی دستگاه را به صورت اتوترانسفورماتور تعیین کنید. (د) اگر بازدهی ترانسفورماتور با اتصال ۱۲۰۰/۱۲۰ V در بار نامی با ضریب توان یك، ۹۷٪ باشد، بازدهی آن را به‌شکل اتوترانسفورماتور با جریان نامی درسیم‌پیچها وکار با ولتاژ نامی برای تغذیه باری باضریب توان یك به‌دست آورید.

۶-۸ مسئلهٔ ۶-۷ را در حالتی که ترانسفورماتور، ولتاژی معادل ۱۰۸۰ V را از شینهٔ ۱۲۰۰ V تأمین می‌کند حل کنید.

۶-۹ یك باراهمی ۸۰۰۰ kW بااتصال مثلثی به‌طرف مثلثی‌فشارضعیف ترانسفورماتوری Δ-Y با اندازه‌های نامی ۱۰۰۰۰ kVA و ۱۳۸/۱۳٫۸ kV متصل شده است. مقدار مقاومت بار را برحسب اهم در هر فاز به‌صورتی که از فاز به‌خنثی در طرف فشار قوی ترانسفورماتور اندازه‌گیری می‌شود به‌دست آورید. ازامپدانس ترانسفورماتور صرف‌نظر کنید وفرض کنید ولتاژ نامی به‌اولیهٔ ترانسفورماتور اعمال شود.

۶-۱۰ مسئله ۶-۹ را درحالتی که همان مقاومتها به‌صورت ستاره‌ای بسته شوند حل کنید.

۶-۱۱ سه ترانسفورماتور که هرکدام اندازه‌های نامی طرف ثانویه‌شان ۵ kVA و ۲۲۰ V است به‌صورت Δ-Δ بسته شده‌اند و بار مقاومتی خالصی معادل ۱۵ kW را با ولتاژ ۲۲۰ V تغذیه می‌کرده‌اند. بارمقاومتی‌خالص به ۱۰ kW کاهش می‌یابد. با برداشتن یك سوم بار می‌توان یکی از ترانسفورماتورها را برداشت و سیستم را به‌صورت مثلث

باز به‌کار واداشت. بازهم ولتاژهای متعادل به بار داده خواهد شد زیرا دوتا از ولتاژهای خط (و درنتیجه سومی) بدون تغییر باقی می‌مانند.

برای بررسی بیشتر این اتصال

(الف) جریان هرخط (اندازه و زاویه) را با بار ۱۰ kW با برداشتن ترانسفورماتور بین a و c به فرض $V_{ab} = ۲۲۰ \angle 0^\circ$ V و توالی‌فاز abc تعیین کنید.

(ب) کیلوولت آمپری راکه هرکدام از ترانسفورماتورهای باقیمانده فراهم می‌کنند به‌دست آورید.

(ج) برای کار به‌صورت مثلث باز با این ترانسفورماتورها چه محدودیتی باید بر روی بار اعمال شود؟ (د) چرا کیلو ولت آمپرهای تک تک ترانسفورماتورها زمانی‌که بار کاملا

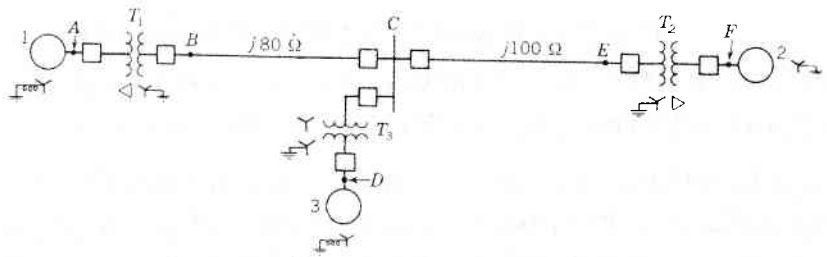
د) چرا کیلوولت آمپرهای تک‌تک ترانسفورماتورها زمانی که بار کاملا مقاومتی است مؤلفهٔ واکنشی دارد.

۱۲-۶ ترانسفورماتوری با اندازه‌های نامی ۲۰۰ MVA و ۲۰٫۵ Δ kV / ۳۴۵ Y kV باری را با اندازه‌های نامی ۱۸۰ MVA، ۲۲٫۵ kV وضریب توان پس‌افتی ۰٫۸، به‌یك خط‌انتقال متصل می‌کند. (الف) اندازه‌های نامی هریك ازسه ترانسفورماتور تکفازی را تعیین کنیدکه با اتصال مناسب، معادل ترانسفورماتور سه فاز بالا باشد (ب) امپدانس مختلط‌در-یکی بار را درنمودار امپدانسها اگر مبنا درخط‌انتقال، ۱۰۰MVA و۳۴۵kV باشد به‌دست آورید.

۱۳-۶ یك ژنراتوری ۱۲۰ MVA و ۱۹٫۵ kV با $X_s = ۱٫۵$ pu از طریق ترانسفورماتوری با اندازه‌های نامی ۱۵۰ MVA و ۲۳۰ Y / ۱۸ Δ kV به‌یك خط انتقال وصل شده است. اگر مبنای به‌کار رفته درمحاسبات را ۱۰۰ MVA و ۲۳۰ kV برای خط انتقال بگیریم مقادیردر-یکی رئکتانسهای ترانسفورماتور و ژنراتور را به‌دست آورید.

۱۴-۶ اندازه‌های نامی سه فاز ترانسفورماتوری ۵۰۰۰ kVA و ۱۱۵/۱۳٫۲ kV و امپدانس آن ۰٫۰۷۵ + ۰٫۰۰۷ j در-یك است. این ترانسفورماتور به‌خط انتقال کوتاهی که امپدانسش ۰٫۱۰ + ۰٫۰۲ j در-یك با مبنای ۱۰ MVA و ۱۳٫۲ kV است وصل شده.این خط، بارسه‌فازی با اندازه‌های نامی ۳۴۰۰ kW ۱۳٫۲ kV را با ضریب توان پس‌افتی ۰٫۸۵ تغذیه می‌کند. اگر با حذف بار در ته خط، ولتاژ طرف فشارقوی در ۱۱۵ kV ثابت بماند، افت ولتاژ را در محل بار به‌دست آورید. محاسبات را به‌صورت در-یکی با انتخاب مبنای ۱۰ MVA و ۱۳٫۲ kV درمحل بار، انجام دهید.

۱۵-۶ نمودار تک‌خطی سیستم‌قدرت بدون باری در شکل ۶-۳۱ دیده می‌شود. رئکتانسهای دو بخش خط انتقال برروی نمودار نشان داده شده است. اندازه‌های نامی ژنراتورها و ترانسفورماتورها به شرح زیراست:



شکل ۶-۳۱ نمودار تك خطی مسئلهٔ ۶-۱۵.

ژنراتور ۱: $X''=$ ۰٫۲۰ pu، ۱۳٫۸ kV، ۲۰ MVA

ژنراتور ۲: $X''=$ ۰٫۲۰ pu، ۱۸ kV، ۳۰ MVA

ژنراتور ۳: $X''=$ ۰٫۲۰ pu، ۲۰ kV، ۳۰ MVA

ترانسفورماتور ۱: $X=$ ٪۱۰، ۲۲۰Y/۱۳٫۸Δ kV، ۲۵ MVA

ترانسفورماتور ۲: سه‌واحد تکفازهریك ۱۰MVA، ۱۲۷/۱۸ kV، $X=$ ٪۱۰

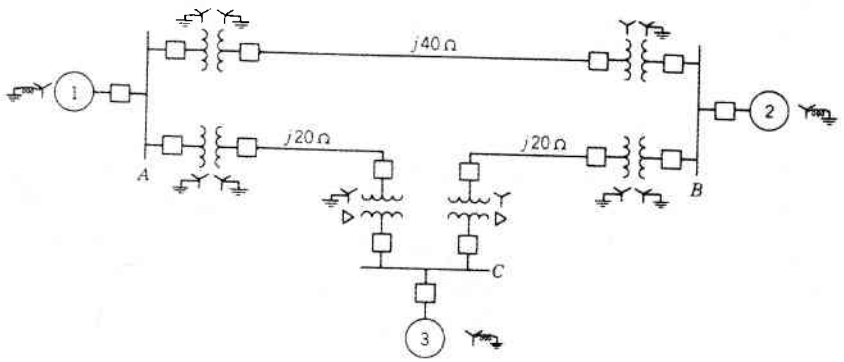
ترانسفورماتور ۳: $X=$ ٪۱۰، ۲۲۰Y/۲۲Y kV، ۳۵ MVA

نمودار امپدانسهای سیستم را با همهٔ رئکتانسها برحسب درـیك و با حروفی‌که نشان دهندهٔ نقاط مربوط به‌نمودار تك‌خطی است رسم‌کنید. مبنا را ۵۰ MVA و ۱۳٫۸ kV درمدار ژنراتور ۱ انتخاب‌کنید.

۶-۱۶ نمودار امپدانسهای سیستم قدرت شکل۶-۳۲ را رسم‌کنید. امپدانسها را برحسب درـیك نشان دهید. ازمقاومت صرف‌نظرکنید ومبنا را ۵۰kVA و۱۳۸kV درخط ۴۰Ω انتخاب‌کنید. اندازه‌های نامی ژنراتورها، موتورها، و ترانسفورماتورها عبارت‌اند از

ژنراتور ۱: $X''=$ ٪۲۰، ۱۸ kV، ۲۰ MVA

ژنراتور ۲: $X''=$ ٪۲۰، ۱۸ kV، ۲۰ MVA



شکل ۶-۳۲ نمودار تك‌خطی مسئلهٔ ۶-۱۶.

موتور سنکرون ۳: $X''=\%۲۰$ ، ۱۳٫۸ kV ، ۳۰ MVA

ترانسفورماتور سه‌فاز Y-Y: $X=\%۱۰$ ، ۱۳۸ Y/۲۰ Y kV ، ۲۰ MVA

ترانسفورماتور سه‌فاز Δ-Y: $X=\%۱۰$ ، ۱۳۸ Y/۱۳٫۸ Δ kV ، ۱۵ MVA

۶-۱۷ اگر ولتاژ شینهٔ C در مسئلهٔ ۶-۱۶ زمانی‌که موتور، ۲۴ MW با ضریب توان پیش‌افتی ۰٫۸ می‌کشد ۱۳٫۲ kV باشد، ولتاژشینه‌های B و A را حساب کنید. فرض کنید که دو ژنراتور بار را به‌تساوی بین خود تقسیم می‌کنند. پاسخ را برحسب ولت و برحسب درـیك با مبنای انتخابی مسئلهٔ ۶-۱۶ بدهید. ولتاژ شینه‌های B و A را زمانی‌که مدارشکن متصل‌کنندهٔ ژنراتور ۱ به‌شینهٔ A باز وسایر مدارشکنها بسته است وموتور، ۱۲ MW با ولتاژ ۱۳٫۲ kV وضریب توان پیش‌افتی ۰٫۸ می‌کشد به‌دست آورید.