

اتصالیهای سه فاز متقارن

وقتی در يك شبکه قدرت، اتصالی رخ می دهد جریان گذرنده را محرکه های الکتریکی (emfهای داخلی) ماشینهای شبکه، امپدانس ماشینها و امپدانسهای بین ماشینها و اتصالی تعیین می کنند. جریان گذرنده از ماشین سنکرون بلافاصله بعد از وقوع اتصالی، با جریان چند سیکل پس از آن، با جریان مانا یا ماندگار اتصالی بسیار فرق دارد. این به علت تأثیر جریان آرمچر بر شاری است که ولتاژ را در ماشین تولید می کند. جریان نسبتاً به آهستگی از مقدار ابتدایی تا مقدار مانای خود تغییر می کند. این بخش به بحث درباره محاسبه جریان اتصالی در دوره زمانهای مختلف می پردازد و تغییر ریکتانس و ولتاژ داخلی ماشین سنکرون را به هنگام تغییر جریان از مقدار ابتدایی - هنگام وقوع اتصالی - تا مقدار حالت مانا شرح می دهد. توصیف برنامه کامپیوتری محاسبه جریانهای اتصالی، تا پایان بحث اتصالیهای نامتقارن به تعویق می افتد زیرا برنامه ها مختص اتصالیهای سه فاز نیستند.*

۱-۱۰ حالت گذر در مدارهای متوالی RL

انتخاب مدار شکن برای سیستم قدرت، بستگی به این سه عامل دارد ۱) جریانی که مدار شکن

* برای آشنایی بیشتر با عیبهات و اتصالیها به کتاب زیر رجوع شود،

P. M. Anderson, *Analysis of Faulted Power Systems*, Iowa State University Press, Ames Iowa, 1973.

باید در شرایط کار عادی حمل کند؛ ۲) حداکثر جریانی که ممکن است مجبور شود موقتاً حمل کند و ۳) جریانی که باید در ولتاژ خط قطع کند.

برای آشنایی با مسئله محاسبه جریان ابتدایی در هنگام اتصال کوتاه شدن ژنراتور سنکرون، به آنچه در موقع اعمال ولتاژ ac به مداری شامل یک مقاومت و یک اندوکتانس ثابت رخ می دهد، توجه کنید. فرض کنید ولتاژ اعمالی $V_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$ و t در لحظه اعمال ولتاژ صفر باشد. پس α اندازه ولتاژ را وقتی که مدار بسته می شود تعیین می کند. اگر ولتاژ در لحظه ابتدایی صفر باشد و به هنگام اعمال آن - با بستن یک کلید - در جهت مثبت زیاد شود، α صفر است. اگر ولتاژ ابتدایی در ماکزیمم مقدار لحظه ای مثبت خود باشد، α مساوی $\pi/2$ است. معادله دیفرانسیل به صورت زیر نوشته می شود:

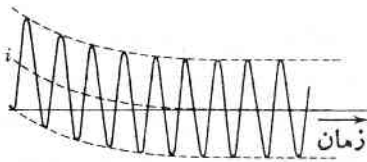
$$V_{\max} \sin(\omega t + \alpha) = Ri + L \frac{di}{dt} \quad (1-10)$$

پاسخ این معادله عبارت است از

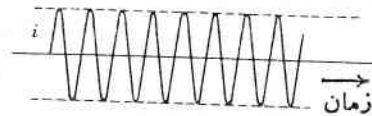
$$i = \frac{V_{\max}}{|Z|} [\sin(\omega t + \alpha - \theta) - e^{-Rt/L} \sin(\alpha - \theta)] \quad (2-10)$$

که در آن $|Z|$ ، مساوی $\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$ و θ برابر $\tan^{-1}(\omega L/R)$ است. اولین جمله معادله (۲-۱۰) به طور سینوسی با زمان تغییر می کند. دومین جمله، متناوب نیست و به طور نمایی با ثابت زمانی L/R کاهش می یابد. این جمله نامتناوب، مؤلفه dc جریان نامیده می شود. جمله سینوسی را مقدار مانای جریان در مدار RL - به ازای ولتاژ اعمالی داده شده - می نامند. اگر مقدار جمله حالت مانا در لحظه $t=0$ صفر نباشد، مؤلفه dc در پاسخ ظاهر می شود تا شرط فیزیکی جریان صفر را در لحظه بستن کلید ارضا کند. توجه کنید که اگر مقدار در نقطه ای از شکل موج ولتاژ متناظر با $\alpha - \theta = 0$ یا $\alpha - \theta = \pi$ بسته شود، جمله dc وجود نخواهد داشت. شکل ۱-۱۰، تغییرات جریان را در برابر زمان طبق معادله (۲-۱۰) به ازای $\alpha - \theta = 0$ نشان می دهد. اگر کلید در نقطه ای از شکل موج ولتاژ متناظر با $\pm \pi/2$ بسته شود مؤلفه dc حداکثر مقدار ابتدایی خود را خواهد داشت که برابر ماکزیمم مقدار مؤلفه سینوسی است. شکل ۲-۱۰، جریان را بر حسب زمان در لحظه $\alpha - \theta = -\pi/2$ نشان می دهد. بسته به مقدار لحظه ای ولتاژ در هنگام بستن کلید، ضریب توان مدار، مقدار مؤلفه dc ممکن است از ۰ تا $V_{\max}/|Z|$ تغییر کند. در لحظه اعمال ولتاژ، مؤلفه های dc و حالت مانا همواره مساوی اند و علامت مخالف دارند تا صفر بودن جریان کل رعایت شود.

در بخش ۲-۶ و ۳-۶ به بحث درباره اصول کار ژنراتور سنکرون پرداختیم که بر اساس یک میدان مغناطیسی گردان کار می کند. این میدان، ولتاژی در سیم پیچ آرمچر دارای مقاومت و ریکتانس، تولید می کند. جریان گذرنده در هنگام اتصال کوتاه شدن



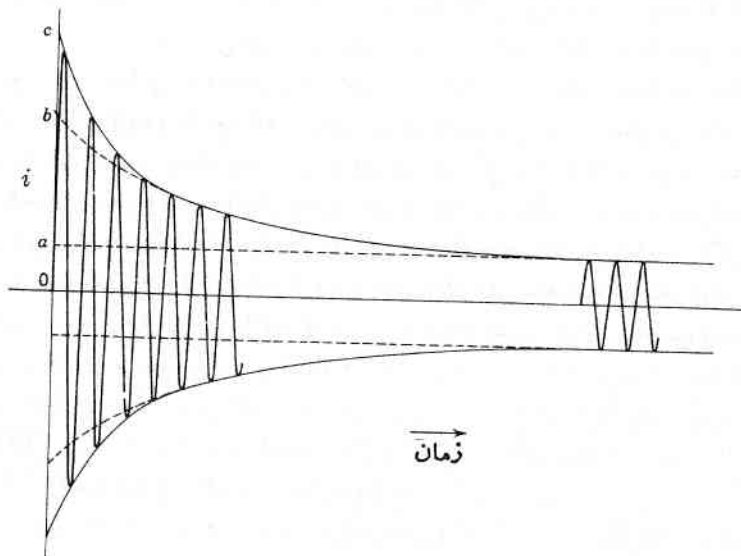
شکل ۱۰-۲ تغییرات جریان در برابر زمان در مدار RL به ازای $\alpha - \theta = -\pi/2$ که در آن داریم $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$. ولتاژ اعمال شده در $t=0$ مساوی $V_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$ است.



شکل ۱۰-۱ تغییرات جریان در برابر زمان در مدار RL به ازای $\alpha - \theta = 0$ که در آن داریم $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$. ولتاژ اعمال شده در $t=0$ مساوی $V_{\max} \sin(\omega t + \alpha)$ است.

ژنراتور سنکرون شبیه جریانی است که از یک مقاومت و اندوکتانس متوالی، هنگام اعمال ناگهانی یک ولتاژ متناوب خواهد گذشت. اما، تفاوت‌های مهمی نیز وجود دارد زیرا جریان آرمچر بر روی میدان گردان اثر می‌گذارد.

یک راه مناسب برای تحلیل اثر اتصال کوتاه سه فاز در سرهای آلترناتور بی‌بار، گرفتن نوسان-نگاشت از جریان یکی از فازها به هنگام وقوع چنین اتصال‌ی است. از آنجا که ولتاژهای تولید شده در فازهای ماشین سه فاز، نسبت به یکدیگر، ۱۲۰ درجه الکتریکی اختلاف فاز دارند، اتصال کوتاه در نقاط نامتناظری از شکل موج ولتاژ فازها صورت می‌گیرد. به همین علت، مؤلفه گذرای dc در فازها متفاوت است. اگر مؤلفه dc از جریان فازها حذف شود، تغییرات جریان فازها در برابر زمان به صورت شکل ۱۰-۳ خواهد بود.



شکل ۱۰-۳ تغییرات جریان در برابر زمان در یک ژنراتور سنکرون بی‌بار اتصال کوتاه شده. مؤلفه گذرای dc جریان در ترسیم دوباره نوسان-نگاشت حذفی شده است.

مقایسه شکل ۱-۱۰ با ۳-۱۰ تفاوت میان اعمال ولتاژ به یک مدار RL معمولی و اعمال اتصال کوتاه به یک ماشین سنکرون را نشان می‌دهد. مؤلفه dc در هیچ یک از این دو شکل وجود ندارد. در ماشین سنکرون، شار شکاف هوایی در لحظه اتصال کوتاه شدن بسیار بزرگتر از چند سیکل پس از آن است. کاهش شار، ناشی از mmf جریان آرمچر است. در بخش ۲-۶ در باره اثر جریان آرمچر زیر نام واکنش آرمچر بحث شد. مدار معادل به دست آمده در بخش ۳-۶، کاهش شار ناشی از واکنش آرمچر را دخالت می‌دهد و مربوط به حالت مانای پس از ناپدید شدن مؤلفه گذرای dc و بعد از ثابت شدن دامنه موج شکل ۳-۱۰، است. وقتی اتصال کوتاه در سرهای یک ماشین سنکرون رخ می‌دهد مدتی طول می‌کشد تا شار شکاف هوایی کاهش یابد. با کم شدن شار، جریان آرمچر نیز کاهش می‌یابد زیرا ولتاژ ناشی از شار شکاف هوایی تعیین کننده جریانی است که از مقاومت و رثکتانس نشت سیم پیچ آرمچر خواهد گذشت.

۲-۱۰ جریانه‌های اتصال کوتاه و رثکتانسیهای ماشین سنکرون*

پارامترهایی که در محاسبه جریان اتصال کوتاه یک سیستم قدرت اهمیت دارند از روی شکل ۳-۱۰ قابل تعریف اند. رثکتانسیهای مورد بحث، رثکتانسیهای طولی اند که در بخش ۳-۶ به آنها اشاره شد. یادآوری می‌کنیم که رثکتانس طولی برای محاسبه افت ولتاژهای ناشی از مؤلفه‌ای از جریان آرمچر به کار می‌رود که نسبت به ولتاژ تولید شده بی باری، 90° اختلاف فاز دارد. به علت کوچک بودن مقاومت مدار معیوب در برابر رثکتانس القایی آن، جریان حین اتصال همیشه به میزان زیادی پس افتمی است و رثکتانس به اصطلاح طولی دخالت می‌کند. در بحث زیر باید به خاطر داشت که جریان نشان داده شده در نوسان نگاشت شکل ۳-۱۰، جریان آلترناتوری است که پیش از وقوع اتصال به صورت بی بار کار می‌کند.

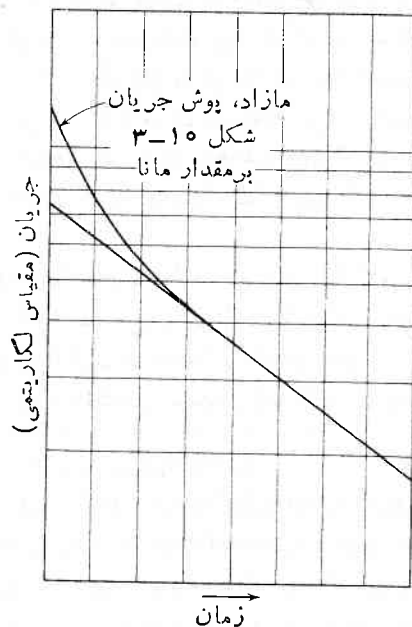
در شکل ۳-۱۰، فاصله oa ، دامنه جریان اتصال کوتاه ماناست. این مقدار، ضربدر 70.7% ، اندازه مؤثر $|I|$ - جریان اتصال کوتاه مانا یا ماندگار را به دست می‌دهد. به علت پایین بودن ضرایب توان در لحظه اتصال کوتاه، ولتاژ بی باری آلترناتور، $|E_g|$ ، تقسیم بر جریان مانا، $|I|$ ، رثکتانس سنکرون ژنراتور یا رثکتانس سنکرون طولی X_d

* برای بحث کاملتر به کتابهای زیر مراجعه کنید:

C. F. Wagner, "Machine Characteristics," in Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, *Electrical Transmission and Distribution Reference Book*, 4th ed., Chap. 6, pp. 145-194, East Pittsburgh, Pa., 1964; and A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and A. Kusko, *Electric Machinery*, 3d ed., pp. 312-319, 479-492, McGraw-Hill Book Company, New York, 1971.

نامیده می‌شود. از مقاومت نسبتاً کوچک آر-چر صرف نظر شده است. اگر پوش شکل موج جریان تا محور قائم، امتداد یابد و از چند سیکل اول که به نظر می‌رسد کاهش خیلی سریع دارند صرف نظر شود عرض از مبدأ، برابر ob است. جریانی که مقدار مؤثرش با این عرض از مبدأ به نمایش درمی‌آید و ۷۰۷ره برابر ob بر حسب آمپر است جریان گذرا، I' نامیده می‌شود. حال يك ركنانس جدید در ماشین تعریف می‌کنیم. ركنانس گذرا یا در این حالت خاص ركنانس گذرای طولی X'_d برای آلترناتوری که پیش از اتصال به صورت بی بار کار می‌کند برابر $|E_g|/|I'|$ است. اگر زکاهش سریع در چند سیکل اول صرف نظر شود نقطه تلاقی پوش جریان با محور صفر می‌تواند از رسم مازاد پوش جریان مقدار مانای oa روی کاغذ نیمه لگاریتمی مطابق شکل ۳-۱۰ دقیق‌تر به دست آید. بخش راست خط این منحنی تا محور قائم، امتداد داده می‌شود و عرض از مبدأ آن به مقدار ماکزیمم جریان مانا اضافه می‌شود تا حداکثر مقدار لحظه‌ای جریان گذرای متناظر با ob در شکل ۳-۱۰ به دست آید.

مقدار مؤثر جریانی که از عرض از مبدأ پوش جریان تعیین می‌شود جریان زیر گذرا $|I''|$ نام دارد. در شکل ۳-۱۰، جریان زیر گذرا، ۷۰۷ره برابر عرض oc است. جریان زیر گذرا اغلب به صورت توصیفی‌تر، جریان مؤثر متقارن ابتدایی نامیده می‌شود زیرا این



شکل ۳-۱۰ مازاد پوش جریان شکل ۳-۱۰ بر ماکزیمم جریان مانا، ترسیم شده با مقیاس نیمه لگاریتمی.

اسم، تصور صرف نظر کردن از مؤلفه dc و در نظر گرفتن مقدار مؤثر مؤلفه ac جریان بلافاصله پس از وقوع اتصالی را تداعی می‌کند. رئکتانس ذی‌گذرای طولی X_d'' برای يك آلترناتور، که پیش از وقوع اتصالی سه فاز در سرهایش بی بار کار می‌کند برابر است با $|E_g|/|I''|$.

جریانها و رئکتانسهای نامبرده در بالا با معادله‌های زیر تعریف می‌شوند که برای آلترناتوری که پیش از وقوع اتصالی سه‌فاز در سرهایش بی بار کار می‌کند، صدق می‌کنند.

$$|I| = \frac{oa}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d} \quad (3-10)$$

$$|I'| = \frac{ob}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d'} \quad (4-10)$$

$$|I''| = \frac{oc}{\sqrt{2}} = \frac{|E_g|}{X_d''} \quad (5-10)$$

که در آنها

$$\begin{aligned} |I| &= \text{مقدار مؤثر جریان مانا} \\ |I'| &= \text{مقدار مؤثر جریان گذرا، بدون مؤلفه } dc \\ |I''| &= \text{مقدار مؤثر جریان زیر گذرا، بدون مؤلفه } dc \\ X_d &= \text{رئکتانس سنکرون طولی} \\ X_d' &= \text{رئکتانس گذرای طولی} \\ X_d'' &= \text{رئکتانس زیر گذرای طولی} \\ |E_g| &= \text{ولتاژ مؤثر بین يك سرو نقطه خنثی در حالت بی باری} \\ oa, ob, oc &= \text{عرض از مبداهای نشان داده شده در شکل ۳-۱۰.}\end{aligned}$$

در کار تحلیلی که جریانهای مانا، گذرا، و زیر گذرا به صورت فاز بردار بیان می‌شوند معمولاً E_g را مرجع انتخاب می‌کنند.

جریان زیر گذرای $|I''|$ بسیار بزرگتر از جریان مانای $|I|$ است زیرا شار شکاف هوایی ماشین در اثر جریان آرمچر، چنانکه در بخش ۳-۶ گفته شد، نمی‌تواند فوراً کاهش یابد. بنابراین ولتاژ القا شده در سیم پیچهای آرمچر درست پس از وقوع اتصالی، بزرگتر از زمان برپایی حالت ماناست. البته مابرای محاسبه جریانهای زیر گذرا، گذرا و مانا، این تفاوت ولتاژ القایی را بسا به کار بردن رئکتانسهای مختلف متوالی بسا ولتاژ بی باری E_g به حساب می‌آوریم. در بخش آینده حالت‌های گذرا در ماشین بارشده را بررسی خواهیم کرد.

معادله‌های (۳-۱۰) تا (۵-۱۰)، روش تعیین جریان اتصالی ژنراتوری را که

رئکتانسهای آن معلوم باشند نشان می دهند. اگر ژنراتور در هنگام وقوع اتصال بی بی بار باشد ماشین با ولتاژ بی باری نسبت به خنثای خود، متوالی بایک رئکتانس مناسب، نمایش داده می شود. اگر دقت بیشتری خواسته شود مقاومت نیز به حساب می آید. اگر امپدانس خارجی نیز بین سرهای ژنراتور و اتصال کوتاه موجود باشد به مدار افزوده می شود.

مثال ۱-۱۰ دو ژنراتور را موازی به طرف کم ولتاژ يك ترانسفورماتور سه فاز $\Delta-Y$ همانند شکل ۵-۱۰، بسته ایم. مقادیر نامی ژنراتورها $13.8 \text{ kV}, 50000 \text{ kVA}$ و $13.8 \text{ kV}, 25000 \text{ kVA}$ و رئکتانس زیر گذرای هر دوی آنها ۲۵٪ است. ترانسفورماتور دارای مقادیر نامی $13.8 \Delta / 6.9 \text{ kV}, 75000 \text{ kVA}$ بسا رئکتانس ۱۰٪ است. ولتاژ طرف فشار قوی ترانسفورماتور، پیش از وقوع اتصال بی 6.6 kV است. ترانسفورماتور بی بار است و بین ژنراتورها جریان گردشی وجود ندارد. جریان زیر گذرای هر ژنراتور را به هنگام وقوع يك اتصال کوتاه سه فاز در طرف فشار قوی ترانسفورماتور بیابید.

حل: مبنا را در مدار فشار قوی 6.9 kV و 75000 kVA انتخاب کنید. به این ترتیب مبناى ولتاژ در طرف فشار ضعیف 13.8 kV است.

ژنراتور ۱:

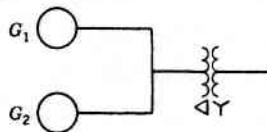
$$X_d'' = 0.25 \frac{75000}{50000} = 0.375 \quad \text{در-يك}$$

$$E_{g1} = \frac{6.6}{6.9} = 0.957 \quad \text{در-يك}$$

ژنراتور ۲:

$$X_d'' = 0.25 \frac{75000}{25000} = 0.75 \quad \text{در-يك}$$

$$E_{g2} = \frac{6.6}{6.9} = 0.957 \quad \text{در-يك}$$



شکل ۵-۱۰ نمودار تك خطى مثال ۱-۱۰.

ترانسفور ماتور:

$$X = 0.10$$

در-يك

شکل ۱۰-۶، نمودار رثکتانسها را پیش از اتصالی نشان می‌دهد. اتصالی سه فاز در P با بستن کلید S شبیه سازی شده است. ولتاژهای داخلی دو ماشین را می‌توان موازی تصور کرد زیرا برای نبودن جریان گردشی، ولتاژها باید از نظر اندازه و فاز یکسان باشند. رثکتانس زیر گذرای موازی معادل برابر است با:

$$\frac{0.375 \times 0.075}{0.375 + 0.075} = 0.025 \text{ pu}$$

بنابراین جریان زیر گذرا در اتصال کوتاه اگر فاز بردار مرجع، E_g باشد برابر است با:

$$I'' = \frac{0.957}{j0.025 + 0.10} = -j2.735 \text{ pu}$$

ولتاژ طرف مثلثی ترانسفورماتور عبارت است از:

$$-(j2.735)(j0.10) = 0.2735 \text{ pu}$$

و جریان ژنراتورهای ۱ و ۲:

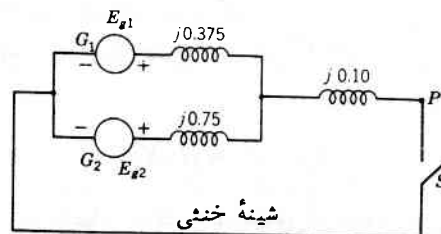
$$I_1'' = \frac{0.957 - 0.2735}{j0.375} = -j1.823 \text{ pu}$$

$$I_2'' = \frac{0.957 - 0.2735}{j0.075} = -j0.912 \text{ pu}$$

برای یافتن جریانها بر حسب آمپر باید مقدار در-یکی آنها را در جریان مبنای مدار

ضرب کرد:

$$I_1'' = 1.823 \frac{75000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 5720 \text{ A}$$



شکل ۱۰-۶ نمودار رثکتانسهای مثال ۱۰-۱.

$$\square \quad I_7'' = 0.912 \frac{75000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 2860 \text{ A}$$

اگرچه رثکنانسهای ماشین واقعاً ثابت نیستند و بستگی به درجه اشباع مدار مغناطیسی دارند با این حال مقدار آنها معمولاً در محدوده‌های معینی قرار می‌گیرند و برای انواع مختلف ماشینها قابل پیش‌بینی‌اند. جدول پ-۴، مقدار نوعی رثکنانسهای ماشین را که برای محاسبه اتصالی و بررسی پایداری لازم است به دست می‌دهد. در حالت کلی، رثکنانس زیر گذرای ژنراتورها و موتورهای برای تعیین جریان ابتدایی هنگام وقوع اتصال کوتاه به کار می‌روند. در تعیین ظرفیت قطع مدار شکنها جز آنهایی که آنرا باز می‌شوند از رثکنانس زیر گذرای ژنراتورها و از رثکنانس گذرای موتورهای سنکرون استفاده می‌شود. در بررسی پایداری که مسئله بر سر تعیین این است که آیا در صورت رفع اتصالی پس از يك فاصله زمانی معین، همزمانی ماشین با بقیه سیستم حفظ می‌شود یا نه، رثکنانسهای گذرا به کار می‌رود.

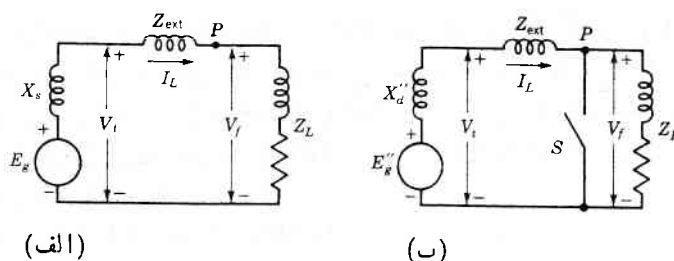
۳-۱۰ ولتاژهای داخلی ماشین بارشده در حالت گذرا

در سراسر بحث پیش، ژنراتور سنکرون، بنا به فرض، در لحظه وقوع اتصالی سه فاز در سرهایش، جریانی حمل نمی‌کند. حال ژنراتوری را در نظر بگیرید که در هنگام وقوع اتصالی بار دارد. شکل ۷-۱۰ (الف)، مدار معادل ژنراتوری دارای يك بار سه فاز متعادل است. امپدانس خارجی بین سرهای ژنراتور و نقطه P - محل وقوع اتصالی - نشان داده شده است. I_L ، V_f و V_t به ترتیب جریان در نقطه P ، ولتاژ محل اتصالی و ولتاژ سر ژنراتور پیش از وقوع اتصالی است. مطابق بحث فصل ۶، مدار معادل ژنراتور سنکرون عبارت از ولتاژ بی باری E_g متوالی با رثکنانس سنکرون آن X_g است. اگر يك اتصالی سه فاز در نقطه P از سیستم رخ دهد دیده می‌شود که اتصال کوتاه کردن P به نقطه خنثای مدار معادل، شرط لازم برای محاسبه جریان زیر گذرا را بر آورده نمی‌کند زیرا برای محاسبه جریانهای زیر گذرای I'' و گذرای I' رثکنانس ژنراتور باید به ترتیب X_d'' و X_d' باشد.

مدار نشان داده شده در شکل ۷-۱۰ (ب)، نتیجه مطلوب را به دست می‌دهد. در اینجا ولتاژ E_g'' متوالی با X_d'' وقتی که کلید S باز است جریان مانسا را به وجود می‌آورد و هنگامی که کلید S بسته است جریان اتصال کوتاه را در X_d'' و Z_{ext} تولید می‌کند. اگر بتوانیم E_g'' را تعیین کنیم این جریان در X_d'' ، برابر I'' خواهد بود. اگر کلید S باز باشد مشاهده می‌کنیم که:

$$E_g'' = V_t + j I_L X_d'' \quad (۷-۱۰)$$

و این معادله، E_g'' را که ولتاژ داخلی زیر گذرا نامیده می‌شود، تعیین می‌کند. همچنین، در هنگام محاسبه جریان گذرای I' که باید از رثکنانس گذرای X_d' بگذرد، ولتاژ محرک، ولتاژ



شکل ۷-۱۰ مدار معادله‌های ژنراتور تغذیه کننده يك بار متعادل سه فاز. وقوع يك اتصالی سه فاز در P بابتستن کلید S شبیه سازی می‌شود. (الف) مدار معادل معمولی حالت مانای ژنراتور بار شده. (ب) مدار ویژه محاسبه I'' .

داخلی گذرای E'_g است و داریم

$$E'_g = V_t + jI_L X'_d \quad (7-10)$$

ولتاژهای E'_g و E''_g را I_L تعیین می‌کند و این دو فقط وقتی برابر ولتاژ حالت بی باری E_g اند که I_L صفر باشد و در آن صورت، E_g برابر V_t است.

در اینجا ذکر این نکته اهمیت دارد که E''_g متوالی با X''_d فقط وقتی نمایش دهنده ژنراتور پیش از وقوع اتصالی و بلافاصله پس از آن است که جریان پیش از اتصالی در ژنراتور، I_L باشد. از طرف دیگر مدار معادل ماشین به ازای هر باری در حالت مانا عبارت از E_g متوالی با ریکتانس سنکرون X_s است. به ازای هر مقدار دیگر I_L در مدار شکل ۷-۱۰، E_g تغییری نمی‌کند اما E''_g مقدار دیگری می‌یابد.

موتور سنکرون نیز ریکتانسهایی مانند مولد سنکرون دارد. وقتی موتور اتصال کوتاه می‌شود دیگر از خط قدرت، انرژی دریافت نمی‌کند اما به میدان آن انرژی می‌رسد و لختی یا اینرسی روتورش و بار متصل به آن، چرخش موتور را برای مدت زمان نامعینی حفظ می‌کند. ولتاژ داخلی موتور سنکرون، باعث می‌شود موتور به سیستم، جریان تحویل دهد زیرا در این حال، موتور مانند يك ژنراتور عمل می‌کند. به قیاس با روابط متناظر برای ژنراتور، ولتاژ داخلی زیر گذرا و گذرای يك موتور سنکرون از معادله‌های زیر به دست می‌آیند:

$$E''_m = V_t - jI_L X''_d \quad (8-10)$$

$$E'_m = V_t - jI_L X'_d \quad (9-10)$$

سیستمهای شامل ژنراتورها و موتورهای بار شده را، همان طور که در مثالهای زیر دیده می‌شود، می‌توان با قضیه تونن و یا با استفاده از ولتاژهای داخلی زیر گذرا یا گذرا، حل کرد. مثال ۷-۱۰ يك ژنراتور و يك موتور سنکرون هر دو دارای مقادیر نامی ۳۰۰۰۰ kVA،

۱۳۲ kV و رثکتانس زیر گذرای ۲۰٪ اند. رثکتانس خط ارتباطی آنها اگر اندازه‌های نامی ماشینها را مینا بگیریم ۱۰٪ است. در حالی که موتور، ۲۰۰۰۰ kW در ضریب توان ۰.۸۰۰ پیش افتی با ولتاژ بین سرهای ۱۲۸ kV، جذب می‌کند يك اتصال سه فاز متقارن در سرهایش رخ می‌دهد. جریان زیر گذرا را در ژنراتور، موتور و اتصال، با استفاده از ولتاژ داخلی ماشینها بیابید.

حل: مینا را ۳۰۰۰۰ kVA، ۱۳۲ kV انتخاب می‌کنیم.

شکل ۸-۱۰ (الف)، مدار معادل سیستم توصیف شده را نشان می‌دهد. دیده می‌شود که شکل ۸-۱۰ (الف)، شبیه شکل ۷-۱۰ (ب) است و پیش از اتصال به جای E_m'' و E_g'' باید E_m و E_g را نشانند به شرط آنکه به جای رثکتانسهای زیر گذرا نیز رثکتانسهای سنکرون را بگذاریم. البته برای یافتن جریان زیر گذرا به نمایش شکل ۸-۱۰ (الف)، نیاز داریم.

اگر ولتاژ اتصال، V_f را به عنوان فاز بردار مرجع به کار ببریم داریم

$$V_f = \frac{128}{132} = 0.97 \angle 0^\circ \quad \text{در-يك}$$

$$\text{جریان مینا} = \frac{30000}{\sqrt{3} \times 132} = 1312 \text{ A}$$

$$I_L = \frac{20000}{0.8 \times \sqrt{3} \times 128} \angle 36.9^\circ = 1128 \angle 36.9^\circ \text{ A}$$

$$\text{در-يك} = \frac{1128}{1312} \angle 36.9^\circ = 0.86 \angle 36.9^\circ$$

$$\text{در-يك} = 0.86(0.8 + j0.6) = 0.69 + j0.52$$

برای ژنراتور:

$$\text{در-يك} \quad V_i = 0.97 + j0.1(0.69 + j0.52) = 0.918 + j0.069$$

$$E_g'' = 0.918 + j0.069 + j0.2(0.69 + j0.52)$$

$$\text{در-يك} = 0.814 + j0.207$$

$$\text{در-يك} \quad I_g'' = \frac{0.814 + j0.207}{j0.3} = 0.69 - j2.71$$

$$= 1312(0.69 - j2.71) = 905 - j3550 \text{ A}$$

برای موتور:

$$V_i = V_f = 0.97 \angle 0^\circ \quad \text{در-يك}$$

$$E_m'' = 0.97 + j0 - j0.2(0.069 + j0.52) = 0.97 - j0.138 + 0.104$$

$$= 1.074 - j0.138 \quad \text{در-يك}$$

$$I_m'' = \frac{1.074 - j0.138}{j0.2} = -0.69 - j5.37 \quad \text{در-يك}$$

$$= 1312(-0.69 - j5.37) = -905 - j7050 \quad A$$

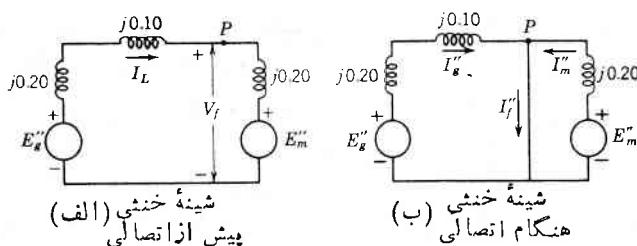
در اتصالی:

$$I_f'' = I_g'' + I_m'' = 0.69 - j2.71 - 0.69 - j5.37 = -j8.08 \quad \text{در-يك}$$

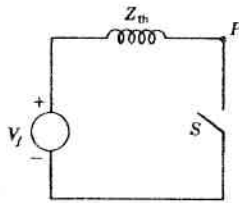
$$= -j8.08 \times 1312 = -j10600 \quad A$$

 شکل ۸-۱۰ (ب)، مسیرهای I_g'' ، I_m'' و I_f'' را نشان می‌دهد. □

جریان زیرگذرای اتصالی را می‌توان از قضیهٔ تونن که می‌تواند در مدارهای خطی و دوطرفه به کار رود نیز پیدا کرد. وقتی برای رثکتانسهای ماشینهای سنکرون مقادیر ثابت به کار می‌رود، مدار، خطی فرض شده است. هنگامی که قضیهٔ تونن به مدار شکل ۷-۱۰ (ب) اعمال می‌شود، مدار معادل، عبارت از يك منبع و يك امپدانس است. ولتاژ این منبع، مساوی V_f ، یعنی ولتاژ نقطهٔ اتصالی پیش از وقوع اتصالی است. مقدار امپدانس هم، مساوی امپدانس مدار از دیدگاه نقطهٔ اتصالی است و وقتی همهٔ ولتاژهای تولیدی، اتصال کوتاه شوند. اگر جریان ابتدایی را بخواهیم باید از رثکتانسهای زیرگذرا استفاده کنیم. شکل ۹-۱۰، معادل تونن شکل ۷-۱۰ ب است و امپدانس Z_{th} برابر $(Z_{ext} + jX_d'')Z_L / (Z_L + Z_{ext} + jX_d'')$ است. با وقوع يك اتصال کوتاه سه فاز در P که با بستن S شبیه‌سازی می‌شود جریان زیرگذرای اتصالی چنین خواهد بود:



شکل ۸-۱۰ مدار معادلهای مثال ۲-۱۰



شکل ۹-۱۰ معادل تونن مدار شکل ۷-۱۰ ب.

$$I'' = \frac{V_f}{Z_{th}} = \frac{V_f(Z_L + Z_{ext} + jX_d'')}{Z_L(Z_{ext} + jX_d'')} \quad (10-10)$$

مثال ۳-۱۰ مثال ۲-۱۰ را با استفاده از قضیه تونن حل کنید:
حل:

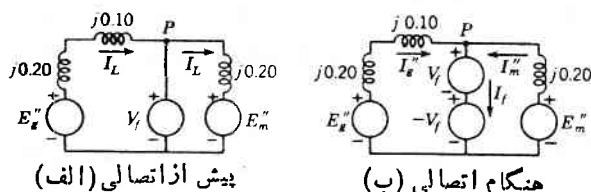
$$Z_{th} = \frac{j0.3 \times j0.2}{j0.3 + j0.2} = j0.12 \text{ pu}$$

$$V_f = 0.97 \angle 0^\circ \text{ pu}$$

درعیب:

$$I_f'' = \frac{0.97 + j0}{j0.12} = -j8.08 \text{ pu}$$

این جریان به دست آمده از قضیه تونن، جریانی است که در نقطه اتصالی به علت کاهش ولتاژش تا صفر، از مدار خارج می شود. اگر این جریان ناشی از اتصالی، به نسبت عکس امپدانس، بین ژنراتورهای موازی تقسیم شود فقط جریان هر ماشین در اثر تغییر ولتاژ نقطه اتصالی به دست می آید. برای یافتن کل جریان ماشینها پس از اتصالی، باید جریان پیش از وقوع اتصالی گذرنده از هر ماشین را به جریان اتصالی در آن ماشین اضافه کنیم. قضیه جمع آثار، علت افزودن جریان پیش از اتصالی به جریان محاسبه شده به کمک قضیه تونن را بیان می کند. شکل ۱۰-۱۵ (الف)، ژنراتوری را متصل به نقطه اتصالی با ولتاژی مساوی ولتاژ V_f همین نقطه پیش از رویداد اتصالی، نشان می دهد. این ژنراتور هیچ تأثیری بر جریان پیش از وقوع اتصالی ندارد و مدار متناظر با شکل ۱۰-۱۵ (الف) است. از افزودن ژنراتور دیگری متوالی با V_f که enif آن اندازه ای برابر، ولی فازی متقابل با V_f دارد مدار شکل ۱۰-۱۵ (ب)، متناظر با شکل ۱۰-۱۵ (ب)، به دست می آید. بنابراین جمع آثار ابتدا E_g'' ، E_m'' و V_f اتصال کوتاه می شوند و جریانهایی حاصل از توزیع جریان اتصالی بین دو ژنراتور به نسبت عکس امپدانسها به دست می آید. سپس اتصال کوتاه کردن ژنراتور باقی مانده یعنی $-V_f$ و نگه داشتن E_g'' ، E_m'' و V_f در مدار، جریان پیش از



شکل ۱۰-۱۰ مدارهای نشان دهنده کاربرد قضیه جمع آثار برای تعیین سهم جریان اتصال در هر شاخه سیستم.

اتصال را به دست می‌دهد و از افزودن این دوجریان هر شاخه به هم، جریان پس از اتصال آن شاخه به دست می‌آید. به کارگیری اصل فوق در این مثال، نتیجه می‌دهد:

$$\text{در-یک} \quad -j3723 = -j808 \times \frac{j0.2}{j0.5} = \text{جریان ژنراتور به اتصال}$$

$$\text{در-یک} \quad -j485 = -j808 \times \frac{j0.3}{j0.5} = \text{جریان موتور به اتصال}$$

برای به دست آوردن کل جریان زیر گذرای ماشینها باید به جریانهایی بالا، جریان پیش از اتصال یعنی I_L را افزود

$$\text{در-یک} \quad I_g' = 0.69 + j0.52 - j3723 = 0.69 - j271$$

$$\text{در-یک} \quad I_m' = -0.69 - j0.52 - j485 = -0.69 - j537$$

باتوجه به اینکه I_L در جهت I_g' و در جهت مخالف I_m' است، مقادیر در-یکی به دست آمده برای I_g' ، I_m' و I_L همان مقادیر مثال ۱۰-۲ هستند و بنابراین مقادیر آمپری نیز یکی خواهند بود.

به هنگام وقوع اتصال، معمولاً از جریان بار در تعیین جریان هر خط صرف نظر می‌کنند. در روش تونن، نادیده گرفتن جریان بار به این معناست که جریان پیش از اتصال هر خط به مؤلفه جریان اتصالیهی مربوط به آن خط افزوده نمی‌شود. روش مثال ۱۰-۲، جریان بار را به شرطی نادیده می‌گیرد که ولتاژهای داخلی زیر گذرای همه ماشینها برابر ولتاژ نقطه اتصال پیش از وقوع اتصال فرض شوند زیرا زمانی که هیچ جریانی پیش از رویداد اتصال از هیچ جای شبکه نمی‌گذرد همین تساوی برقرار است. نادیده گرفتن جریان بار در مثال ۱۰-۳ نتیجه می‌دهد:

$$A \quad 4240 = 3723 \times 1312 = \text{جریان اتصالیهی از طرف ژنراتور}$$

$$A \quad 6360 = 485 \times 1312 = \text{جریان اتصالیهی از طرف موتور}$$

$$A \quad 10600 = 808 \times 1312 = \text{جریان اتصالیهی}$$

در نظر گرفتن یا نگرفتن جریان بار در مقدار جریان انصالی تأثیری ندارد اما سهم جریان هر خط را تغییر می‌دهد. وقتی جریان بار در نظر گرفته شود از مثال ۱۰-۲ چنین به دست می‌آید

$$A \quad ۳۶۶۰ = |۹۰۵ - j۳۵۵۰| = \text{جریان انصالی از طرف ژنراتور}$$

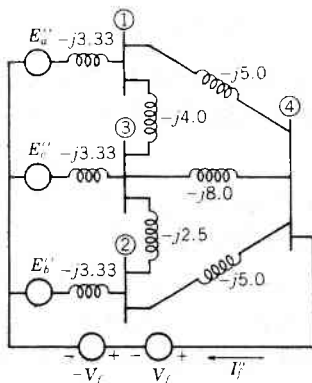
$$A \quad ۷۲۰۰ = |-۹۰۵ - j۷۰۵۰| = \text{جریان انصالی از طرف موتور}$$

به علت همفاز نبودن جریانهای ژنراتور و موتور، جمع اندازه‌ها مساوی جریان انصالی نیست. □

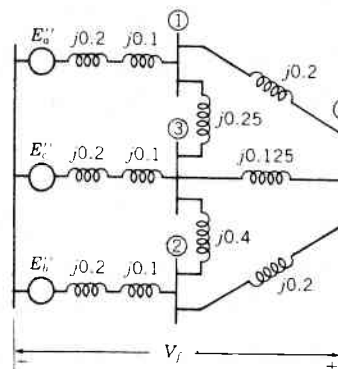
۱۰-۴ ماتریس امپدانس شینه در محاسبات انصالی

بررسی محاسبات انصالی را که تاکنون منحصر به مدارهای ساده بود اینک به شبکه‌های کلی‌تر توسعه می‌دهیم. اما بهتر است برای یافتن معادله‌های کلی، از شبکه خاصی که هم‌اکنون با آن آشنا می‌شویم شروع کنیم. اگر رئکتانسه‌های متوالی با ولتاژهای تولیدی مدار شکل ۷-۳ را به رئکتانسه‌های زیر گذرا و نیز ولتاژهای تولیدی را به ولتاژهای داخلی زیر گذرا تبدیل کنیم، شبکه شکل ۱۰-۱۱ به دست می‌آید. اگر این شبکه، معادل تکفاز يك سیستم سه‌فاز باشد و در این بررسی، انصالی را در شینه ۴ انتخاب کنیم، می‌توانیم روش بخش ۱۰-۳ را به کار ببریم و ولتاژ شینه ۴ را پیش از وقوع انصالی، V_f بنامیم.

يك انصالی سه‌فاز در شینه ۴ را می‌توان با شبکه شکل ۱۰-۱۲ شبیه‌سازی کرد که



شکل ۱۰-۱۲ مدار شکل ۱۰-۱۱ با ادمیتانسهای در-یکی و يك انصالی سه‌فاز در شینه ۴ سیستم که با V_f و $-V_f$ متوالی، شبیه‌سازی شده است.



شکل ۱۰-۱۱ نمودار رئکتانسی به دست آمده از شکل ۷-۳ بر اثر گذاشتن رئکتانسه‌های زیر گذرا به جای رئکتانسه‌های سنکرون ماشین و ولتاژهای داخلی زیر گذرا به جای ولتاژهای تولید حالت بی‌باری. مقدار رئکتانسه‌ها بر حسب در-یک است.

در آن امپدانسهای شکل ۱۰-۱۱ به ادیمیتانس تبدیل شده اند. ولتاژهای تولیدی متوالی V_f و $-V_f$ ، اتصال کوتاه را می سازند. اگر فقط ولتاژ V_f در این شاخه وجود داشت هیچ جریانی در شاخه تولید نمی شد. با V_f و $-V_f$ متوالی، این شاخه، اتصال کوتاه می شود و جریان آن I_f'' است. در این نمودار، ترجیحاً ادیمیتانسهای در-یکی به جای امپدانسها به کار رفته است. اگر E_a'' ، E_b'' ، E_c'' و V_f اتصال کوتاه شوند ولتاژها و جریانه‌ها فقط ناشی از $-V_f$ اند. پس تنها جریان ورودی به گره از طرف منبع، جریان ناشی از $-V_f$ است و برابر I_f'' به گره ۴ (I_f'' از گره ۴) است. زیرا تا پیش از گذاشتن $-V_f$ ، هیچ جریانی در این شاخه وجود ندارد. معادله ماتریسی گره‌ها در شبکه‌ای که تنها منبع آن $-V_f$ است عبارت است از:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{bmatrix} = j \begin{bmatrix} -12.33 & 0.0 & 4.0 & 5.0 \\ 0.0 & -10.83 & 2.0 & 5.0 \\ 4.0 & 2.0 & -12.83 & 8.0 \\ 5.0 & 5.0 & 8.0 & -18.0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^{\Delta} \\ V_4^{\Delta} \\ V_f^{\Delta} \\ -V_f \end{bmatrix} \quad (11-10)$$

که زیرنوشته Δ نشان دهنده ولتاژهای مربوط به $-V_f$ به تنهایی است علامت Δ برای بیان تغییر ولتاژ بر اثر اتصال، انتخاب شده است. با معکوس کردن ماتریس ادیمیتانس شینه شبکه شکل ۱۰-۱۲، ماتریس امپدانس شینه را به دست می آوریم. ولتاژ شینه‌ها (ناشی از $-V_f$) چنین خواهند بود

$$\begin{bmatrix} V_1^{\Delta} \\ V_4^{\Delta} \\ V_f^{\Delta} \\ -V_f \end{bmatrix} = Z_{bus} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -I_f'' \end{bmatrix} \quad (12-10)$$

بنابراین

$$I_f'' = \frac{V_f}{Z_{44}} \quad (13-10)$$

و

$$V_1^{\Delta} = -I_f'' Z_{14} = -\frac{Z_{14}}{Z_{44}} V_f$$

$$V_4^{\Delta} = -\frac{Z_{44}}{Z_{44}} V_f \quad V_f^{\Delta} = -\frac{Z_{34}}{Z_{44}} V_f \quad (14-10)$$

وقتی که ولتاژ ژنراتور یعنی V_f ، در شبکه شکل ۱۰-۱۲، اتصال کوتاه شود و E_a'' ، E_b'' ، E_c'' و V_f در مدار بمانند. جریانها و ولتاژهای هر نقطه شبکه، مقادیر پیش از اتصال را خواهند داشت. به کمک اصل جمع آثار از افزودن ولتاژهای پیش از اتصال به ولتاژهای حاصل از معادله‌های (۱۰-۱۴)، ولتاژهای پس از وقوع اتصال به دست می‌آیند. معمولاً شبکه عیب‌کرده را پیش از اتصال، بدون بار در نظر می‌گیرند. در این صورت، هیچ جریانی پیش از اتصال وجود ندارد و ولتاژهای سراسر شبکه همه یکسان و مساوی V_f اند. این فرض، کار را بسیار ساده می‌کند و به کارگیری اصل جمع آثار نتیجه می‌دهد که:

$$\begin{aligned} V_1 &= V_f + V_1^A = V_f - I_f'' Z_{1f} \\ V_2 &= V_f + V_2^A = V_f - I_f'' Z_{2f} \\ V_3 &= V_f + V_3^A = V_f - I_f'' Z_{3f} \\ V_4 &= V_f - V_f = 0 \end{aligned} \quad (10-15)$$

این ولتاژها وقتی وجود دارند که جریان زیر گذر عبور می‌کند و Z_{bus} برای شبکه‌ای تشکیل شده است که رثکنانس هر مولد مقدار زیر گذرای خود را دارد. به عبارت کلی به ازای اتصال در شینه k و با نادیده گرفتن جریانهای پیش از اتصال داریم:

$$I_f = \frac{V_f}{Z_{kk}} \quad (10-16)$$

و ولتاژ پس از اتصال در شینه n برابر است با

$$V_n = V_f - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}} V_f \quad (10-17)$$

با استفاده از مقادیر عددی معادله (۱۰-۱۱)، هرگاه ماتریس مربعی Y_{bus} آن معادله را معکوس کنیم داریم:

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.1488 & 0.0651 & 0.0864 & 0.0978 \\ 0.0651 & 0.1554 & 0.0799 & 0.0967 \\ 0.0864 & 0.0798 & 0.1341 & 0.1058 \\ 0.0978 & 0.0967 & 0.1058 & 0.1566 \end{bmatrix} \quad (10-18)$$

V_f معمولاً $1.0 \angle 0^\circ$ pu در نظر گرفته می‌شود و با این فرض در این شبکه عیب‌کرده داریم:

$$I_f'' = \frac{1}{j0.01566} = -j63.86 \quad \text{در-يك}$$

$$V_1 = 1 - \frac{j0.0978}{j0.01566} = 0.3755 \quad \text{در-يك}$$

$$V_2 = 1 - \frac{j0.0967}{j0.01566} = 0.3825 \quad \text{در-يك}$$

$$V_3 = 1 - \frac{j0.1058}{j0.01566} = 0.3244 \quad \text{در-يك}$$

جریانهای هر قسمت شبکه می تواند از ولتاژها و امپدانسها تعیین شود. برای مثال، جریان اتصالی به طرف گره ۳ در شاخه بین گره های ۱ و ۳ برابر است با:

$$I_{13}'' = \frac{V_1 - V_3}{j0.025} = \frac{0.3755 - 0.3244}{j0.025} = -j0.2044 \quad \text{در-يك}$$

جریان ژنراتور متصل به گره ۱ به صورت زیر است:

$$I_a'' = \frac{E_a'' - V_1}{j0.03} = \frac{1 - 0.3755}{j0.03} = -j20.817 \quad \text{در-يك}$$

جریانهای دیگر را نیز می توان به همین روش تعیین کرد. ولتاژها و جریانها اگر اتصالی در هر شینه دیگر باشد نیز درست به همین سادگی از روی ماتریس امپدانس محاسبه می شوند.

معادله (۱۰-۱۶)، يك کاربرد ساده قضیه تونن است و دیده می شود که کمیت های قطر اصلی در ماتریس امپدانس شینه، مساوی امپدانسهای تونن شبکه برای محاسبه جریان اتصالی شینه های مختلف است. شرکتهای برق، اطلاعات لازم را به مشتری می دهند تا بسا تعیین جریان اتصالی بتواند مدار شکنهای يك واحد صنعتی یا سیستم توزیعی را که به نقطه ای از سیستم متصل شده است، مشخص کند. معمولاً اطلاعات فراهم شده، مگا ولت آمپرهای اتصال کوتاه را نیز در بر می گیرند، که:

$$MVA = \sqrt{3} \times (KV \text{ نامی}) \times I_{sc} \times 10^{-3} \quad (10-19)$$

مدار معادل تونن تکفازی که سیستم را نمایش می دهد، صرف نظر از مقاومت و ظرفیت موازی، به صورت يك emf مساوی ولتاژ نامی خط تقسیم بر $\sqrt{3}$ ، متوالی با يك رثکتانس القایی

است به طوری که:

$$X_{th} = \frac{(kV / \sqrt{3}) \times 1000}{I_{sc}} \Omega \quad (20-10)$$

حل معادله (۱۹-۱۰) برای I_{sc} و گذاردن در معادله (۲۰-۱۰) نتیجه می دهد که:

$$X_{th} = \frac{(kV)^2}{MVA \text{ اتصال کوتاه}} \Omega \quad (21-10)$$

اگر کیلوولت مبنا مساوی کیلوولت نامی باشد به صورت در-یکی خواهیم داشت

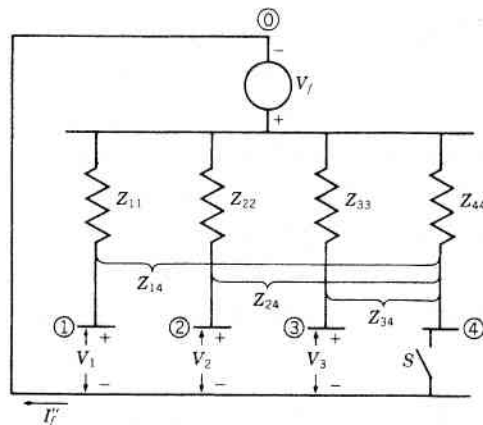
$$X_{th} = \frac{MVA \text{ مبنا}}{MVA \text{ اتصال کوتاه}} pu \quad (22-10)$$

$$X_{th} = \frac{I_{\text{مبنا}}}{I_{sc}} pu \quad (23-10)$$

۱۰-۵ شبکه معادل ماتریس امپدانس شینه ها

اگر چه طراحی يك مدار در بر گیرنده امپدانسهای شبکه امپدانس شینه از نظر فیزیکی ممکن نیست، می توانیم مداری با امپدانسهای انتقالی نشان داده شده بین شاخه ها، رسم کنیم. چنین نموداری در درك مفهوم معادله های به دست آمده در بخش ۱۰-۲ سودمند خواهد بود.

در شکل ۱۰-۱۳، بین شاخه ۴ و سه شاخه دیگر شبکه ای که دارای چهار گره به غیر



شکل ۱۰-۱۳ شبکه معادل ماتریس امپدانس شینه با چهار گره مستقل. بستن کلید S، اتصالی در گره ۴ را شبیه سازی می کند. فقط ادmittانسهای انتقالی گره ۴ نشان داده شده اند.

از گره مرجع است، کروشهایایی رسم شده است.* نمادهای $Z_{۱۴}$ ، $Z_{۲۴}$ و $Z_{۳۴}$ کنار این کروشها امپدانسهای انتقالی گره ۴ ماتریس امپدانس شینه‌اند. امپدانسهای خودی ماتریس امپدانس شینه عبارت‌اند از $Z_{۱۱}$ ، $Z_{۲۲}$ ، $Z_{۳۳}$ و $Z_{۴۴}$. وقتی کلید S باز است هیچ جریانی نمی‌تواند از هیچ شاخه‌ای بگذرد. وقتی کلید S بسته است جریان در مدار فقط به طرف گره ۴ می‌گذرد. این جریان، برابر $V_f/Z_{۴۴}$ است که بنا بر معادله (۱۵-۱۳)، همان I_f'' ، به‌ازای اتصالی در گره ۴ است. پس معنای کروشها این است که جریان I_f'' گذرنده به طرف گره ۴ در شبکه، افت ولتاژهای $I_f''Z_{۱۴}$ ، $I_f''Z_{۲۴}$ و $I_f''Z_{۳۴}$ را به ترتیب در شاخه‌های متصل به گره‌های ۱ و ۲ و ۳ به وجود می‌آورد. جهت این افت ولتاژها به سمت گره‌های مربوط به آنهاست.

اگر کلید S در مدار شکل ۱۵-۱۳ باز باشد به شرط تساوی E_a'' ، E_b'' و E_c'' با V_f ، ولتاژ همه گره‌ها V_f خواهد بود، همانند شکل ۱۵-۱۱. اگر S بسته باشد بررسی مدار نشان می‌دهد که ولتاژ هر چهار گره نسبت به گره مرجع صفر، برابر مقادیر مشخص شده بسا معادله‌های (۱۵-۱۵) خواهند بود. بنابراین اگر تعبیر ما از امپدانسهای انتقالی نمایانده شده در مدار به صورتی باشد که در بالا توصیف شده، مدار در حالت باز بودن کلید S ، معادل شکل ۱۵-۱۱ و در حالت بسته بودن، معادل شکل ۱۵-۱۲ است و البته باز هم از جریان بیش از اتصالی صرف نظر می‌کنیم.

البته می‌توانیم به طریقی مشابه، اتصال کوتاه در شینه‌های دیگر را نیز شبیه‌سازی کرده و این روند را به یک شبکه کلی دارای هر تعداد گره توسعه دهیم. می‌توانستیم دیگر امپدانسهای انتقالی مدار معادل را با کروشهای اضافی نشان دهیم، و این کار را از آن جهت نکرده‌ایم که وجود تعداد زیادی کروش برای نمایش امپدانسهای انتقالی، گیج‌کننده می‌شود. در حقیقت معمولاً به هنگام رسم شبکه معادل برای ماتریس امپدانس شینه، کروشها را حذف می‌کنیم اما باید بدانیم که امپدانسهای انتقالی واقعاً وجود دارند و باید در تحلیل شبکه در نظر گرفته شوند.

مثال ۱۵-۴ ماتریس امپدانس شینه را برای شبکه مثال ۸-۱ که نتایج بررسی بخش بار آن در شکل ۸-۲ آمده است تعیین کنید. مقادیر نامی ژنراتور شینه‌های ۱ و ۳ به ترتیب ۲۷۵ و ۲۵۵ مگاوات آمپرند. مجموع رئکتانس زیر گذاری هر مولد و رئکتانس ترانسفورماتور اتصال آن به شینه، اگر اندازه نامی مولد مبنا فرض شود برابر $p u ۳۰$ است. نسبت دور ترانسفورماتورها طوری است که مبنای ولتاژ در مدار ژنراتور، برابر ولتاژ نامی آن است. رئکتانس ژنراتورها و ترانسفورماتورها را در ماتریس در نظر بگیرید.

* این شبکه معادل به روش ارائه شده در

J. R. Neuenswander, *Modern Power Systems*, Intext Educational Publishers, New York, 1971

ترسیم شده است که شبکه معادل ماتریس امپدانس شینه را معادل برچین (rake equivalent) می‌نامد.

جریان زیرگذرا در یک اتصال سه فاز روی شینه ۴ و جریان آینده از هر خط به شینه عیب کرده را بیابید. جریان پیش از اتصال را نادیده بگیرید و همه ولتاژهای پیش از وقوع اتصال را 1.0 pu فرض کنید. مبنای سیستم را 100 MVA بگیرید و از همه مقاومتها صرف نظر کنید.

حل: مجموع رئکتانسهای ژنراتور و ترانسفورماتور با مبنای 100 MVA عبارت اند از:

$$X = 0.30 \times \frac{100}{270} = 0.1111 \text{ pu} \quad \text{ژنراتور شینه ۱}$$

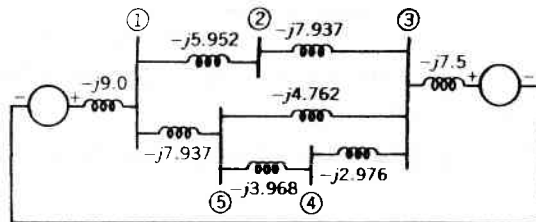
$$X = 0.30 \times \frac{100}{225} = 0.1333 \text{ pu} \quad \text{ژنراتور شینه ۲}$$

شکل ۱۰-۱۴، شبکه ادمیتانسهای در یکی را نشان می دهد که از روی آن ماتریس ادمیتانسی گره به صورت زیر نوشته می شود:

$$Y_{\text{bus}} = j \begin{bmatrix} -22.889 & 5.952 & 0.0 & 0.0 & 7.937 \\ 5.952 & -13.889 & 7.937 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 7.937 & -23.175 & 2.976 & 2.762 \\ 0.0 & 0.0 & 2.976 & -6.944 & 3.968 \\ 7.937 & 0.0 & 2.762 & 3.968 & -16.667 \end{bmatrix}$$

کامپیوتر رقمی، این ماتریس شینه 5×5 را معکوس می کند تا ماتریس اتصال کوتاه به دست آید:

$$Z_{\text{bus}} = j \begin{bmatrix} 0.0793 & 0.0558 & 0.0382 & 0.0511 & 0.0608 \\ 0.0558 & 0.1338 & 0.0664 & 0.0630 & 0.0605 \\ 0.0382 & 0.0664 & 0.0875 & 0.0720 & 0.0603 \\ 0.0511 & 0.0630 & 0.0720 & 0.2321 & 0.1002 \\ 0.0608 & 0.0605 & 0.0603 & 0.1002 & 0.1301 \end{bmatrix}$$



شکل ۱۰-۱۴ نمودار رئکتانسی برای مثال ۱۰-۴.

تصور يك شبکه مانند شكل ۱۰-۱۳ به‌یافتن جریانه‌ها و ولتاژهای خواسته شده كمك خواهد كرد.

جریان زیرگذرا دراتصالى سه‌فاز شینه ۴ برابر است با:

$$I'' = \frac{100}{j502321} = -j4308 \text{ در-يك}$$

ولتاژ شینه‌های ۳ و ۵ عبارت‌اند از:

$$V_3 = 100 - (-j4308)(j500720) = 0.6898 \text{ در-يك}$$

$$V_5 = 100 - (-j4308)(j501002) = 0.5683 \text{ در-يك}$$

جریانهای آینده به‌اتصالى برابر اند با:

$$\text{از شینه ۳: } 0.6898(-j2976) = -j2053$$

$$\text{از شینه ۵: } 0.5683(-j3968) = -j2255$$

$$\text{در-يك } -j4308$$

برای اتصالى درهر شینه دیگر نیز می‌توان اطلاعات مشابهی از همان ماتریس اتصال کوتاه به‌دست آورد. □

۱۰-۶ انتخاب مدارشکنها

بررسی زیادی روی مقدار نامی و کاربرد مدارشکنها به‌عمل آمده است و بحث ما در اینجا تاحدی مقدمه‌ای از این موضوع است. برای کسب راهنمایی بیشتری که در تعیین مدارشکنها ضروری است خواننده باید به نشریات ANSI، فهرست شده در پاروقیه‌ای ضمیمه این بخش رجوع کند.

جریان زیرگذرا، که تا اینجا حداکثر توجه خود را به آن معطوف داشتیم جریان متقارن ابتدایی است و شامل مؤلفه dc نمی‌شود. چنانکه دیدیم الحاق مؤلفه dc به آن، مقدار مؤثر جریان بلافاصله بعد از وقوع اتصالى را به‌دست می‌دهد که بزرگتر از جریان زیرگذراست. برای مدارشکنهای روغنی بالای ۵ kV، جریان زیرگذرا ضرب در ۱.۶، مقدار مؤثر جریانی است که مدارشکن باید نیروهای شکندۀ آن را طى اولین نیم‌سیکل بعد از وقوع اتصالى تحمل کند. این جریان را جریان زودگذر می‌نامند و طى سالیانی دراز، اندازه‌های نامی مدارشکنها، علاوه بر معیارهای* دیگر، از روی جریان زودگذرشان

* مراجعه کنید به:

G. N. Lester, "High Voltage Circuit Breaker Standards in the USA: Past, Present and Future," *IEEE Trans. Power Appar., Syst.*, vol. 93, 1974, pp. 590-600.

تعیین می‌شود.

قدرت قطع نامی يك مدار شکن، برحسب کیلوولت آمپر یا مگاولت آمپر، مشخص می‌شود. کیلوولت آمپر قطع مساوی است با $\sqrt{3}$ برابر کیلوولت شینه متصل به مدار شکن ضرب در جریانی که مدار شکن باید به هنگام دور شدن کنتاكتهايش بتواند قطع کند. البته این جریان، کوچکتر از جریان زودگذر است و مقدار آن بستگی دارد به سرعت مدار شکن برای مثال ۸، ۵، ۳، یا $1\frac{1}{4}$ سیکل که زمان اندازه گیری شده از وقوع اتصال تا خاموش شدن قوس است.

جریانی که يك مدار شکن باید قطع کند معمولاً نامتقارن است زیرا هنوز مقداری مؤلفه dc میراشونده دارد. جدول مقادیر نامی ترجیحی مدار شکنهای روغنی، ولتاژ بالای ac، جریان نامی قطع مدار شکنها را برحسب مؤلفه ای از جریان نامتقارن که نسبت به محور صفر، متقارن است مشخص می‌کند. این جریان را ظرفیت قطع متقارن لازم، یا به طور ساده جریان اتصال کوتاه متقارن نامی، می‌گویند. اغلب صفت متقارن نیز حذف می‌شود. همچنین ممکن است انتخاب مدار شکنها براساس جریان کل (که مؤلفه dc را نیز شامل است) صورت بگیرد.* ما بحث خود را به بررسی کوتاهی از طریقه انتخاب مدار شکن براساس جریان متقارن، محدود خواهیم کرد.

مدار شکنها را بارده ولتاژ اسمی شناسایی می‌کنند، مانند ۶۹ kV. برخی از عوامل دیگر شناساننده عبارت اند از: جریان پیوسته کاری نامی، ولتاژ ماکزیمم نامی، ضریب پهنه ولتاژ K، و جریان اتصال کوتاه نامی در کیلوولت ماکزیمم نامی. K، پهنه ولتاژ را تعیین می‌کند که در آن، جریان اتصال کوتاه نامی ضرب در ولتاژ بهره برداری، ثابت است. برای يك مدار شکن ۶۹ kV که ماکزیمم ولتاژ نامی آن ۷۲.۵ kV، ضریب پهنه ولتاژ آن $K=1.21$ ، و جریان پیوسته کاری نامی آن ۱۲۰۰ A است، جریان اتصال کوتاه نامی در ولتاژ ماکزیمم (جریان متقارنی که می‌تواند در ۷۲.۵ kV قطع شود) ۱۹۰۰۰ A است. یعنی اینکه حاصل ضرب 72.5×19000 ، مقدار ثابت حاصل ضرب جریان اتصال کوتاه نامی در ولتاژ بهره برداری، در پهنه ۷۲.۵ تا ۶۰ kV است $(72.5/1.21 = 60)$. جریان اتصال کوتاه نامی در ۶۰ kV، مساوی 1.21×19000 یا ۲۳۰۰۰ A است. در ولتاژهای پایین تر بهره برداری نمی‌توان از این جریان اتصال کوتاه تجاوز کرد. جریان

* مراجعه کنید به:

Schedules of Preferred Ratings and Related Required Capabilities for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, ANSI C37.06-1971 and Guide for Calculation of Fault Currents for Application of AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Total Current Basis, ANSI C37.5-1979, American National Standards Institute, New York.

اتصال کوتاه نامی در ۶۹ kV برابر است با

$$\frac{7275}{69} \times 19000 = 20000 \text{ A}$$

مدار شکنهای رده ۱۱۵ kV و بالاتر، ضریب پهنه ولتاژی برابر ۱۰۰ دارند. در یک روش ساده شده به نام دوش E/X ، برای محاسبه جریان اتصال کوتاه متقارن از همه مقاومتها، بارهای ایستا، و جریانهای پیش از اتصالی صرف نظر می شود. در روش E/X ، برای ژنراتورها از رثکتانس زیر گذرا، و برای موتورهای سنکرون از X_d'' ضرب در ۱٫۵ که مقدار تقریبی رثکتانس گذرای موتور است، استفاده می شود. از موتورهای القایی زیر ۵۰ hp صرف نظر می شود و به X_d'' موتورهای القایی بزرگتر بسته به اندازه آنها، ضرایب مختلفی اعمال می شود. اگر موتوری وجود نداشته باشد جریان اتصال کوتاه متقارن برابر جریان زیر گذراست.

به هنگام استفاده از روش E/X باید امپدانس را بررسی کرد که برای یافتن جریان اتصال کوتاه، ولتاژ اتصالی V_f به آن تقسیم می شود. در تعیین مدار شکن برای شینه k ، این امپدانس برابر Z_{kk} از ماتریس امپدانس شینه با رثکتانسهای مناسب ماشین است. زیرا جریان اتصال کوتاه با معادله (۱۰-۱۶) بیان می شود. اگر نسبت X/R این امپدانس، ۱۵ یا کمتر باشد به شرطی ولتاژ وکیلو ولت آمپر مدار شکن به کار رفته درست است که جریان نامی قطع آن مساوی یا بیشتر از جریان محاسبه شده باشد. در صورت معلوم نبودن نسبت X/R ، جریان محاسبه شده نباید بیشتر از ۸۰٪ مقدار جریان مجاز مدار شکن به ازای ولتاژ شینه، باشد. راهنمای کاربرد ANSI، روش تصحیح شده ای را مشخص می کند که ثابت زمانی ac و dc مربوط به میرایی دامنه جریان را در صورت تجاوز نسبت X/R از ۱۵، به حساب می آورد. روش تصحیح شده، سرعت مدار شکن را نیز در نظر می گیرد.

بحث انتخاب مدار شکنها نه به عنوان بررسی کاربرد آنها بلکه برای نشان دادن اهمیت درک محاسبات اتصالی، عرضه شده است. مثال زیر، این اصل را روشن می سازد.

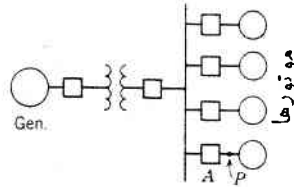
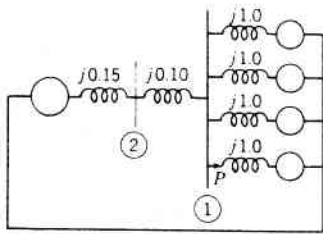
مثال ۱۰-۵ یک ژنراتور ۲۵۰۰۰ kVA، ۱۳٫۸ kV با $X_d'' = ۱۵\%$ را یک ترانسفورماتور، مطابق شکل ۱۰-۱۵ به شینه ای وصل می کند که چهار موتور یکسان را تغذیه می کند. رثکتانس زیر گذرای هر موتور، X_d'' بامبنای ۵۰۰۰ kVA، ۶٫۹ kV، برابر ۲۰٪ است و مقدار نامی سه فاز ترانسفورماتور ۲۵۰۰۰ kVA، ۱۳٫۸/۶٫۹ kV

* مراجعه کنید به:

Application Guide for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis, ANSI C37. 010-1972, American National Standards Institute, New York.

همچنین به صورت زیر منتشر شده است:

IEEE Std 320-1972.



شکل ۱۵-۱۰ نمودار تگ خطی مثال ۵-۱۰. شکل ۱۶-۱۰ نمودار رثکتانس برای مثال ۵-۱۰.

و رثکتانس نشت آن، ۱۰٪ است. به هنگام وقوع يك اتصالی سه فاز در نقطه P ، ولتاژ شینه در سر موتورها مساوی 69 kV می شود. مطلوب است تعیین: (الف) جریان زیر گذرا در اتصالی، (ب) جریان زیر گذرا در مدار شکن A ، و (ج) جریان قطع اتصال کوتاه متقارن (همان طور که برای کاربرد مدار شکنها تعریف شد) در اتصالی و در مدار شکن A . حل: (الف) به ازای مبنای 25000 kVA ، 69 kV در مدار ژنراتور، مبنای موتورها 25000 kVA ، 69 kV است. رثکتانس زیر گذرای هر موتور عبارت است از:

$$X_d'' = 0.20 \times \frac{25000}{5000} = 1.0 \text{ در-يك}$$

شکل ۱۶-۱۰، مقدار رثکتانسهای زیر گذرا را نشان می دهد. به ازای عیبی در P :

$$V_f = 1.0 \text{ در-يك}$$

$$Z_{th} = j0.125 \text{ در-يك}$$

$$I_f'' = \frac{1.0}{j0.125} = -j8.0 \text{ در-يك}$$

جریان مبنا در مدار 69 kV برابر است با:

$$\frac{25000}{\sqrt{3} \times 69} = 2090 \text{ A}$$

$$I_f'' = 8 \times 2090 = 16720 \text{ A}$$

(ب) جریان ژنراتور و سه موتور از چهار موتور به مدار شکن A می آید. جریانی که از مولد می آید

$$-j8.0 \times \frac{0.25}{0.05} = -j40 \text{ در-يك}$$

از هر موتور نیز ۲۵٪ بقیه جریان اتصال $p u - j ۱۰۰$ می آید.
جریان مدار شکن A برابر است با:

$$I'' = -j ۲۰۰ + ۳(-j ۱۰۰) = -j ۷۰۰ \text{ p u} = ۷ \times ۲۰۹۰ = ۱۴۶۳۰ \text{ A}$$

(ج) برای محاسبه جریان قطع مدار شکن A ، رنکثانس گذرای $j ۱۰۵$ را در مدار موتورهایی شکل ۱۰-۱۶، جانشین رنکثانس زیر گذرای $j ۱۰۵$ کنید. در این صورت داریم:

$$Z_{th} = j \frac{۰.۳۷۵ \times ۰.۲۵}{۰.۳۷۵ + ۰.۲۵} = j ۰.۱۵ \text{ در-یک}$$

جریان تحویلی ژنراتور

$$\frac{۱۰۰}{j ۰.۱۵} \times \frac{۰.۳۷۵}{۰.۰۶۲۵} = -j ۴۰۰ \text{ در-یک}$$

و جریان تحویلی هر موتور

$$\frac{۱}{۴} \times \frac{۱۰۰}{j ۰.۱۵} \times \frac{۰.۲۵}{۰.۰۶۲۵} = -j ۰.۶۷ \text{ در-یک}$$

و جریان اتصال کوتاه مقارنی که باید قطع شود

$$(۴۰۰ + ۳ \times ۰.۶۷) \times ۲۰۹۰ = ۱۲۵۶۰ \text{ A}$$

روش معمول این است که اندازه نامی همه مدار شکنهای متصل به هر شینه را بر اساس جریان رسیده به اتصالی واقع روی آن شینه تعیین می کنند. در آن صورت قدرت قطع نامی جریان اتصال کوتاه هر مدار شکن متصل به شینه ۶۹ kV باید حداقل برابر باشد با

$$۴ + ۴ \times ۰.۶۷ = ۶.۶۷ \text{ در-یک}$$

یا

$$۶.۶۷ \times ۲۰۹۰ = ۱۳۹۴۰ \text{ A}$$

در-یک مدار شکن ۱۴۴ kV ، ولتاژ ماکزیمم نامی و K به ترتیب عبارت از ۱۵۰۵ kV و ۲۶۷ است. در ۱۵۰۵ kV ، جریان قطع اتصال کوتاه نامی آن ۸۹۰۰ A است. این مدار شکن برای جریان قطع اتصال کوتاه متقارن $۲۶۷ \times ۸۹۰۰ = ۲۳۷۶۰ \text{ A}$ در ولتاژ $۵۸ \text{ kV} = ۱۵۰۵ / ۲۶۷$ در نظر گرفته می شود. این مقدار ماکزیمم جریان نامی است که می تواند قطع شود حتی اگر مدار شکن در مداری با ولتاژ پایینتر باشد. جریان قطع اتصال کوتاه نامی در ۶۹ kV برابر است با:

$$\frac{۱۵۰۵}{۶۹} \times ۸۹۰۰ = ۲۰۰۰۰ \text{ A}$$

ظرفیت لازم $A = ۱۳۹۴۰$ ، بسیار کمتر از ۸۰ درصد $A = ۲۰۰۰۰$ است و مدار شکن از لحاظ جریان اتصال کوتاه، مناسب است.

جریان اتصال کوتاه را می توان با استفاده از ماتریس امپدانس شینه پیدا کرد. برای این منظور دو گره در شکل ۱۵-۱۶ مشخص شده است. گره ۱، شینه طرف فشار ضعیف ترانسفورماتور و گره ۲، شینه طرف فشار قوی آن است. به ازای رثکتانس $p.u = ۱۵$ موتور:

$$Y_{11} = -j10 + \frac{1}{j15/4} = -j12.67$$

$$Y_{12} = j10$$

$$Y_{22} = -j10 - j6.67 = -j16.67$$

ماتریس ادمیتانس گره و معکوس آن به ترتیب به صورت زیر است

$$Y_{bus} = j \begin{bmatrix} -12.67 & 10.0 \\ 10.0 & -16.67 \end{bmatrix}$$

$$Z_{bus} = j \begin{bmatrix} 0.015 & 0.009 \\ 0.009 & 0.0114 \end{bmatrix}$$

شکل ۱۵-۱۷، شبکه متناظر با ماتریس امپدانس شینه را نشان می دهد بستن S_1 و باز کردن S_2 نشان دهنده يك اتصالی در شینه ۱ است.

جریان قطع اتصال کوتاه متقارن در يك اتصالی سه فاز در گره ۱ عبارت است از

$$I_{sc} = \frac{10}{j0.015} = -j667 \text{ در يك}$$

که با محاسبات قبلی سازگار است. ماتریس امپدانس شینه، ولتاژ شینه ۲ را نیز درحالی که اتصالی روی شینه ۱ وجود دارد، به دست می دهد:

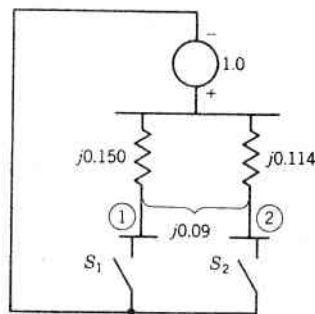
$$V_2 = 10 - I_{sc} Z_{21} = 10 - (-j667)(j0.009) = 0.4$$

و از آنجا که ادمیتانس بین گره های ۱ و ۲ برابر $j10$ - است، جریان اتصالی از طرف ترانسفورماتور چنین است

$$\text{در يك} = 0.4(-j10) = -j4$$

که این نیز با نتیجه قبلی مطابقت می کند.

همچنین با مراجعه به شکل ۱۵-۱۷ و حالت S_1 باز و S_2 بسته، جریان اتصال کوتاه



شکل ۱۰-۱۲ شبکه معادل امپدانس شینه برای ماتریس امپدانس شینه مثال ۱۰-۵.

يك عیب سه فاز در گره ۲ را فوراً پیدا می کنیم:

$$I_{sc} = \frac{1.0}{j0.114} = -j8.77 \text{ پیک}$$

حتی این مثال ساده، درموردی که آثار اتصال در تعدادی از شینه ها باید بررسی شود ارزش ماتریس امپدانس را به نمایش می گذارد. چنانکه در بخش ۷-۷ دیدیم معکوس کردن ماتریس ضروری نیست. زیرا کامپیوتر می تواند Z_{bus} را مستقیماً ایجاد کند. □

مسائل

- ۱۰-۱۰ يك ولتاژ متناوب ۶۰ Hz با مقدار مؤثر ۱۰۰ V، با بستن يك كليد به مدار RL متوالی اعمال می شود. مقاومت، 15Ω و اندوكتانس، 0.12 H است.
- (الف) مقدار مؤلفه dc جریان را به هنگام بستن كليد، هرگاه مقدار ولتاژ در آن لحظه ۵۰ V باشد، بیابید.
- (ب) مقدار لحظه ای ولتاژی را که هنگام بستن كليد، حداکثر مؤلفه dc جریان را تولید می کند بیابید.
- (ج) مقدار لحظه ای ولتاژی را که هنگام بستن كليد، باعث حذف مؤلفه dc جریان می شود پیدا کنید.
- (د) اگر كليد در موقعی که ولتاژ لحظه ای صفر است بسته شود جریان لحظه ای را پس از ۵، ۱۵، و ۵۵ سیکل بیابید.

۱۰-۲ يك ژنراتور که از طریق يك مدار شکن ۵ سیکلی به يك ترانسفورماتور وصل شده، دارای اندازه های نامی ۱۰۰ MVA، ۱۸ kV و رثکتناسهای $X_d' = 26\%$ ، $X_d'' = 19\%$ و $X_d = 130\%$ است. در هنگام وقوع يك اتصال کوتاه سه فاز بین مدار شکن و ترانسفورماتور،

ژنراتور بی بار و با ولتاژ نامی کار می کند. (الف) جریان اتصال کوتاه مداوم مدارشکن، (ب) جریان مؤثر متقارن ابتدایی مدارشکن، و (ج) حداکثر ممکن مؤلفه dc جریان اتصال کوتاه مدارشکن را بیابید.

۳-۱۰ ترانسفورماتور سه فاز متصل به ژنراتور توصیف شده در مسئله ۲-۱۰، دارای اندازه های نامی 100 MVA ، $18 \Delta \text{ kV}$ ، $Y/240 \text{ V}$ ، و $X = 10\%$ است. اگر یک اتصال کوتاه سه فاز در طرف فشار قوی ترانسفورماتور بی بار در ولتاژ نامی رخ دهد (الف) جریان مؤثر متقارن ابتدایی در سیم پیچ طرف فشار قوی ترانسفورماتور و (ب) جریان مؤثر متقارن ابتدایی خط طرف فشار ضعیف را بیابید.

۴-۱۰ مقادیر نامی یک ژنراتور 60 Hz عبارت اند از 500 MVA ، 20 kV ، و $X_d'' = 0.2 \text{ pu}$. ژنراتور، یک بار کاملاً اهمی 400 MW را در ولتاژ 20 kV تغذیه می کند. بار مستقیماً بین سرهای خروجی ژنراتور متصل است. اگر هر سه فاز بار، همزمان اتصال کوتاه شوند، جریان مؤثر متقارن ابتدایی ژنراتور را بر حسب دریک بیابید. مبنا 500 MVA ، 20 kV است.

۵-۱۰ ژنراتوری از طریق یک ترانسفورماتور به یک موتور سنکرون متصل است. بر اساس یک مبنای مشترک، رثکتانسهای زیرگذرای ژنراتور و موتور به ترتیب برابر 0.15 pu و 0.35 pu و رثکتانس نشت ترانسفورماتور برابر 0.10 pu است. وقتی که ولتاژ سر ژنراتور 0.99 pu و جریان خروجی آن 1.0 pu با ضریب توان 0.8 پیش افتی است، یک اتصال سه فاز در سر موتور رخ می دهد. مقدار دریک یکی جریان زیرگذرای اتصالیی، ژنراتور، و موتور را بیابید. ولتاژ سر ژنراتور را فاز بردار مرجع بگیرید و مسئله را به دو روش حل کنید: (الف) با محاسبه ولتاژهای پشت رثکتانس زیرگذرای ژنراتور و موتور و (ب) با استفاده از قضیه تونن.

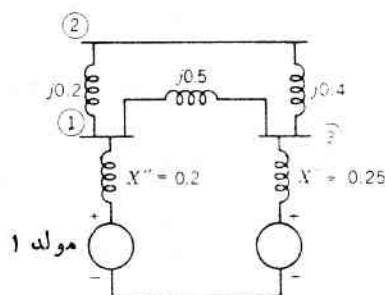
۶-۱۰ دو موتور سنکرون به ترتیب دارای رثکتانسهای زیرگذرای 0.08 pu و 0.25 pu با مبنای تا 480 V ، 2000 kVA به یک شینه وصل شده اند. این شینه با خطی دارای رثکتانس 0.23Ω به شینه یک سیستم قدرت وصل شده است مگا ولت آمپر اتصال کوتاه شینه سیستم قدرت به ازای ولتاژ نامی 480 V برابر 96 MVA است. وقتی ولتاژ شینه موتورها 440 V است از جریان بار صرف نظر کنید و جریان مؤثر متقارن ابتدایی را به هنگام وقوع یک اتصال سه فاز در شینه موتورها، بیابید.

۷-۱۰ ماتریس امپدانس شینه یک شبکه چهار شینه با مقادیر دریک به صورت زیر است:

$$Z_{\text{bus}} = j \begin{bmatrix} 0.15 & 0.08 & 0.04 & 0.07 \\ 0.08 & 0.15 & 0.06 & 0.09 \\ 0.04 & 0.06 & 0.13 & 0.05 \\ 0.07 & 0.09 & 0.05 & 0.12 \end{bmatrix}$$

ژنراتورها به شینه‌های ۱ و ۲ متصل‌اند و رثکتانسهای زیر گذرای آنها در هنگام یافتن Z_{bus} به حساب آمده‌اند. اگر از جریان پیش از اتصالی صرف نظر شود مقدار در-یکی جریان زیر گذرای اتصالی را به ازای یک اتصالی سه فاز در شینه ۴ بیابید. ولتاژ محل اتصالی را پیش از وقوع اتصالی 1.0 pu فرض کنید. همچنین مقدار در-یکی جریان ژنراتور دارای رثکتانس زیر گذرای 0.2 pu را بیابید.

۸-۱۰ برای شبکه نشان داده شده در شکل ۱۰-۱۸، مقدار در-یکی جریان زیر گذرای ژنراتور ۱ و خط ۱-۲ و ولتاژ شینه‌های ۱ و ۳ را به ازای یک اتصالی سه فاز در شینه ۲



شکل ۱۸-۱۰ شبکه مسئله ۱۰-۸.

بیابید. فرض کنید که هیچ جریانی پیش از اتصالی نمی‌گذرد و ولتاژ پیش از اتصالی در شینه ۲، برابر 1.0 pu است. ماتریس امپدانس شینه را در محاسبات به کار ببرید.

۹-۱۰ اگر یک اتصالی سه فاز در شینه ۱ شبکه شکل ۱۰-۱۱ به هنگام بی‌باری (که در آن ولتاژ همه گره‌ها، 1.0 pu است) رخ دهد جریان زیر گذرای اتصالی، ولتاژ شینه‌های ۲، ۳، ۴، و جریان ژنراتور متصل به شینه ۲ را بیابید.

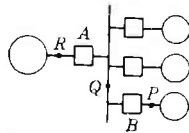
۱۰-۱۰ جریان زیر گذرا را در یک اتصالی سه فاز روی شینه ۵ شبکه مثال ۸-۱، بر حسب در-یک بیابید. از جریان پیش از اتصالی صرف نظر کنید، ولتاژ همه شینه‌ها را پیش از وقوع اتصالی 1.0 pu در نظر بگیرید، و از محاسباتی که قبلاً در مثال ۱۰-۴ انجام دادیم استفاده کنید. همچنین جریان در خطهای ۱-۵ و ۳-۵ را بیابید.

۱۱-۱۰ یک ژنراتور 625 kVA ، 2.4 kV با $X_d'' = 0.2 \text{ pu}$ ، از طریق یک مدار شکن به صورت شکل ۱۰-۱۹ به یک شینه متصل است. سه موتور سنکرون با اندازه‌های نامی 250 hp ، 2.4 kV ، ضریب توان 0.9 ، بازدهی 90% ، و $X_d'' = 0.2 \text{ pu}$ از طریق مدار شکن به همان شینه وصل شده‌اند. موتورها در بار کامل، ضریب توان یک، و ولتاژ نامی کار می‌کنند و بار بین ماشینها به تساوی تقسیم می‌شود. (الف) نمودار امپدانس را با مبنای 625 kVA ، 2.4 kV بر حسب در-یک رسم کنید.

(ب) جریان اتصال کوتاه مقارنی را کسه باید به ازای يك اتصالی سه فاز در نقطه P ، مدارشکتهای A و B قطع کنند برحسب آمپر بیايید. با صرف نظر کردن از جریان پیش از اتصالی، محاسبات را ساده کنید.

(ج) قسمت (ب) را برای يك اتصالی سه فاز در نقطه Q تکرار کنید.

(د) قسمت (ب) را برای يك اتصالی سه فاز در نقطه R تکرار کنید.



شکل ۱۰-۱۹ نمودار تک خطی مثال ۱۰-۱۱.

۱۰-۱۲ يك مدارشکن دارای اندازه نامی 345 kV ، جریان پیوسته کاری نامی 1500 A و ضریب بهینه ولتاژ $K = 1.65$ است. ولتاژ ماکزیم نامی 38 kV و جریان اتصال کوتاه نامی در آن ولتاژ، 22 kA است. (الف) ولتاژی را کسه به ازای کمترین آن، جریان اتصال کوتاه نامی با کاهش ولتاژ بهره برداری افزایش نمی یابد و مقدار این جریان را بیايید و (ب) جریان اتصال کوتاه نامی را در 345 kV پیدا کنید.