



راه حلها و کنترل پخش بار

اهمیت زیاد بررسیهای پخش بار در برنامه ریزی گسترش آتی سیستمهای قدرت و همچنین در تعیین بهترین شرایط بهره برداری از سیستمهای موجود را در فصل ۱ تحلیل کردیم. اطلاعات اصلی که از بررسی پخش بار به دست می آید عبارت است از اندازه و زاویه فاز ولتاژ هر یک از شینه ها و توان حقیقی و واکنشی گذرنده از هر خط انتقال. لیکن، بسیار اطلاعات پرارزش دیگری نیز از بیرون نوشت، برنامه های کامپیوتری به کار رونده در شرکت های برق به دست می آید. در بررسیهای پخش بار در این فصل که به بررسی اصول کنترل پخش بار نیز می پردازد، به بیشتر این ویژگیها توجه خواهد شد.

از روشهایی که اساس راه حل های مسائل پخش بار را تشکیل می دهند دو تا را بررسی خواهیم کرد. ارزش بسیار زیاد کامپیوتر رقمی در طراحی و بهره برداری از سیستم قدرت نیز خاطر نشان خواهد شد.

۸-۱ داده های لازم برای بررسیهای پخش بار

برای حل مسائل پخش بار می توان از خود ادمیتانسها و ادمیتانسهای متقابل تشکیل دهنده ماتریس ادمیتانس شینه ها Y_{bus} و یا از امپدانسهای نقطه رانش و امپدانسهای انتقالی تشکیل دهنده Z_{bus} استفاده کرد. بررسی را به روشهایی که از ادمیتانسها بهره می گیرند محدود خواهیم کرد. نقطه شروع برای مهیا کردن داده هایی که باید در اختیار کامپیوتر نهاد نمودار

تك خطی سیستم است. مقدار امیدانسه‌های متوالی و ادمیتانسه‌های موازی خطهای انتقال برای اینکه کامپیوتر بتواند همه عناصر Y_{bus} یا Z_{bus} را تعیین کند لازم است. سایر اطلاعات ضروری، اندازه‌های نامی و امیدانسه‌های ترانسفورماتورها، اندازه‌های نامی خازنهای موازی، و سرکهای^۱ انتخاب شده ترانسفورماتورها را شامل می‌شود.

همیشه باید شرایط بهره‌برداری را برای هر بررسی انتخاب کرد. در همه شینه‌ها بجز یکی، توان حقیقی خالص ورودی به شبکه باید مشخص شود. توان جذب شده بار، توان ورودی منفی به سیستم است. سایر توانهای ورودی از جانب ژنراتورها، و توانهای مثبت یا منفی ورودی از پیوستگانه‌های شبکه‌هاست. علاوه بر این، در این شینه‌ها یا توان واکنشی خالص ورودی به شبکه و یا اندازه و لثاژ باید مشخص شود؛ یعنی در هر شینه باید تصمیم گرفت که آیا اندازه و لثاژ ثابت می‌ماند یا گذر توان واکنشی، روش معمول، مشخص کردن توان واکنشی در شینه‌های بار و اندازه و لثاژ در شینه‌های ژنراتور است، اگرچه گاهی توان واکنشی ژنراتورها مشخص می‌شود. در برنامه‌های کامپیوتری انجام محاسبات شبکه تازمانی که تولید توان واکنشی در محدوده مشخص شده باقی بماند و لثاژ شینه، ثابت فرض می‌شود.

شینه‌ای که در آن، گذر توان حقیقی مشخص نمی‌شود شینه تابخورد^۲ نام دارد و معمولاً شینه‌ای است که ژنراتوری به آن متصل است. البته، گذر خالص توان به درون سیستم در هر شینه را نمی‌توان از پیش تعیین کرد، زیرا تازمانی که بررسی کامل نشود میزان اتلاف در سیستم معلوم نیست. ژنراتورهای متصل به شینه تابخور، تفاوت بین گذر توان حقیقی مشخص شده به درون سیستم در شینه‌های دیگر و کل توان خروجی سیستم به اضافه اتلافها را تأمین می‌کنند. هم اندازه و هم زاویه و لثاژ در شینه تابخور مشخص می‌شود. توان حقیقی و توان واکنشی در این شینه، بخشی از پاسخهایی است که کامپیوتر تعیین می‌کند.

۲-۸ روش گوس-زایدل^۳

پیچیدگی دستیابی به راه‌حلی صریح برای پخش بار در سیستم قدرت از تفاوت موجود بین نوع داده‌های مشخص شده برای انواع مختلف شینه‌ها ناشی می‌شود. اگرچه نوشتن معادله‌های کافیه دشوار نیست، راه‌حلی صریح و بسته عملی نخواهد بود. راه‌حل‌های کامپیوتری مسائل پخش بار که اکنون بررسی خواهیم کرد فرایندی بساوردی را دنبال می‌کنند، به این ترتیب که مقداری تخمینی به و لثاژ نامعلوم شینه‌ها نسبت می‌دهند و با استفاده از و لثاژ تخمینی شینه‌های دیگر، توانهای حقیقی ذکر شده، و توانهای واکنشی یا اندازه و لثاژهای ذکر شده، مقداری جدید برای و لثاژ هر شینه محاسبه می‌کنند. به این ترتیب، دسته مقادیر تازه‌ای برای و لثاژ شینه‌ها به دست می‌آید که باز هم برای محاسبه دسته و لثاژ دیگری

1. Taps

2. Swing bus

3. Gauss-Seidel

برای شینه‌ها به کار می‌رود. محاسبه هر دسته ولتاژ جدید يك بساورد نامیده می‌شود. فرایند بساوردی آن قدر تکرار می‌شود تا اینکه تغییر ولتاژ در هر شینه از مقداری مینیمم داده شده‌ای کمتر شود.

ابتدا به بررسی راه‌حلی می‌پردازیم که ولتاژ هر شینه را بر حسب توان حقیقی و توان واکنشی داده شده به شینه از ژنراتورها توان تحویل داده شده به بار متصل به شینه، ولتاژهای تخمینی یا قبلاً محاسبه شده شینه‌های دیگر، و خود ادمیتانسها و ادمیتانسهای متقابل گرهای بیان می‌کند. نوشتن معادله‌های اساسی با بیان معادله‌های گرهای شبکه آغاز می‌شود. این معادله‌ها را برای يك سیستم چهار شینه‌ای به دست می‌آوریم و نوشتن معادله‌های کلی را به بعد موکول می‌کنیم. اگر شماره ۱ را به شینه تابخور اختصاص دهیم، محاسبه با شینه شماره ۲ آغاز می‌شود. اگر P_2 و Q_2 توان حقیقی و توان واکنشی برنامه‌ریزی شده برای ورود به سیستم در شینه ۲ باشند داریم

$$V_2 I_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (۱-۸)$$

که از آن I_2 ، به صورت زیر به دست می‌آید

$$I_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} \quad (۲-۸)$$

و با بیان I_2 بر حسب خود ادمیتانسها و ادمیتانسهای متقابل گرهای، درحالی که ژنراتورها و بارها حذف می‌شوند زیر جریان ورودی به هر گره با معادله (۲-۸) بیان می‌شود، می‌توان نوشت

$$\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} = Y_{21}V_1 + Y_{22}V_2 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4 \quad (۳-۸)$$

که از آن V_2 چنین به دست می‌آید

$$V_2 = \frac{1}{Y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{V_2^*} - (Y_{21}V_1 + Y_{23}V_3 + Y_{24}V_4) \right] \quad (۴-۸)$$

معادله (۴-۸)، مقدار تصحیح شده‌ای برای V_2 به دست می‌دهد که بر مبنای مقادیر برنامه‌ریزی شده P_2 و Q_2 زمانی که مقادیر تخمینی ولتاژها را در طرف راست معادله بگذاریم تعیین می‌شود. مقدار محاسبه شده V_2 با مقدار تخمین زده شده V_2^* مطابقت نخواهند داشت. اما با گذاردن مزدوج مقدار محاسبه شده V_2 به جای V_2^* در معادله (۴-۸) جهت محاسبه مقدار دیگری برای V_2 ، پس از چندین بساورد، مطابقت با دقت کافی حاصل می‌شود و مقدار صحیح V_2 با توجه به ولتاژهای تخمینی و بدون توجه به توان در شینه‌های دیگر به دست می‌آید. لیکن، این مقدار در این حالت خاص بخش بار، پاسخ نهایی V_2 نیست، زیرا از

1. iteration

مقدار تخمینی ولتاژ سایر شینه‌ها محاسبه شده است و ولتاژهای واقعی هنوز معلوم نیستند. توصیه می‌شود بیش‌از برداختن به شینه بعدی، دو محاسبه متوالی V_p (که دومی مانند اولی است جز در مورد تصحیح V_p^*) بر روی هر شینه انجام شود.

ولتاژ تصحیح شده هر شینه که به دست آید برای محاسبه ولتاژ تصحیح شده شینه بعدی به کار می‌رود. این فرایند پی در پی در هر شینه از شبکه (بجز شینه تاب‌خور) انجام می‌شود تا نخستین بساورد تکمیل شود. سپس کل این فرایند دوباره و دوباره انجام می‌شود تا مقدار تصحیح در ولتاژ هر شینه از درجه دقت از پیش تعیین شده کمتر شود.

این فرایند حل معادله‌های جبری خطی را دوش بساوردی گوس-زایدل می‌گویند. هر گاه در سراسر هر بساورد کامل، (به جای اینکه از هر مقدار ولتاژ جدید به دست آمده، ولتاژ شینه بعدی محاسبه شود) یک دسته مقدار برای ولتاژها به کار رود فرایند حل را دوش بساوردی گوس می‌نامند.

در صورتی که ولتاژهای تخمینی، اختلاف زیادی با مقادیر واقعی داشته باشند ممکن است همگرایی به پاسخ نادرستی منجر شود. اگر مقادیر تخمینی دارای اندازه مقبولی باشند و از نظر فاز هم اختلاف چندانی نداشته باشند، معمولاً از همگرایی به پاسخ نادرست اجتناب خواهد شد. پاسخهای ناخواسته معمولاً از بررسی نتایج، به آسانی ردیابی می‌شوند زیرا به طور طبیعی محدوده فاز ولتاژهای سیستم از ۴۵° وسیعتر نیست و اختلاف فاز بین شینه‌های نزدیک به هم از حدود ۱۰° کمتر و غالباً بسیار کوچک است.

برای هر مجموعه N شینه، ولتاژ محاسبه شده شینه k که در آن P_k و Q_k داده شده‌اند عبارت است از

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left(\frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) \quad (5-8)$$

که در آن $n \neq k$. مقدار ولتاژهای طرف راست معادله، آخرین مقادیر محاسبه شده برای شینه‌هاست (اگر در شینه خاصی بساورد انجام نشده است ولتاژ تخمینی آن به کار می‌رود). تجربه کار با روش گوس-زایدل برای حل مسائل گذر توان نشان داده است که اگر صرفاً ولتاژ تصحیح شده شینه، با پیشرفت محاسبه از شینه‌ای به شینه دیگر، جانشین بهترین مقدار قبلی شود، تعداد بیش از حدی بساورد لازم است تا ولتاژها در حد درجه دقت قابل قبولی تصحیح شوند. تعداد بساوردها اگر تصحیح ولتاژ هر شینه در ضریب ثابتی ضرب شود تا میزان تصحیح را افزایش دهد و ولتاژ را به مقدار نهاییش نزدیکتر کند بسیار کاهش خواهد یافت. ضرابی که این همگرایی بهتر را انجام می‌دهند عوامل شتاب نام دارند. تفاوت بین ولتاژ تازه محاسبه شده و بهترین ولتاژ قبلی شینه را در عامل شتاب مناسبی ضرب می‌کنند تا تصحیح بهتری برای جمع شدن با مقدار قبلی به دست آید. عامل شتاب برای مؤلفه حقیقی تصحیح ممکن است با عامل شتاب برای مؤلفه موهومی آن متفاوت باشد. برای هر سیستمی، عوامل شتاب بهینه‌ای وجود دارد، و انتخاب نادرست عوامل ممکن است

همگرایی را کندتر و یا ناممکن کند. عامل شتاب ۱۶ برای هر دو مؤلفه حقیقی و موهومی معمولاً انتخاب خوبی است. برای تعیین بهترین عوامل شتاب خاص هر سیستم معین می توان بررسیهایی انجام داد.

در شینه‌هایی که به جای توان واکنشی، اندازه ولتاژ نشان داده شده است محاسبه مؤلفه‌های حقیقی و موهومی ولتاژ شینه در هر بساورد با تعیین مقداری برای توان واکنشی آغاز می شود. از معادله (۵-۸)

$$P_k - jQ_k = \left(Y_{kk} V_k + \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right) V_k^* \quad (6-8)$$

که در آن $n \neq k$ اگر این مجدودیت را برداریم

$$P_k - jQ_k = V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \quad (7-8)$$

$$Q_k = -\text{Im} \left\{ V_k^* \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \right\} \quad (8-8)$$

که در آن Im به معنی «قسمت موهومی» است.

توان واکنشی Q_k به کمک معادله (۸-۸) به ازای بهترین مقادیر قبلی ولتاژ شینه‌ها ارزیابی می شود، و این مقدار Q_k در معادله (۵-۸) گذارده می شود تا V_k جدیدی به دست آید. سپس مؤلفه‌های V_k جدید در نسبت اندازه ثابت مشخص شده V_k به اندازه V_k به دست آمده از معادله (۵-۸) ضرب می شود. حاصل، ولتاژ مختلط تصحیح شده شینه‌ای است که اندازه ولتاژش مشخص شده است.

۳-۸ روش نیوتون-رافسون^۱

بسط سری تیلور برای توابع دو یا چندمتغیره، بنای روش نیوتون-رافسون در حل مسائل پخش بار است. بررسی این روش را با بحثی درباره حل مسئله‌ای شامل تنها دو معادله دو متغیره آغاز می کنیم. سپس خواهیم دید که چگونه این بررسی را به حل معادله‌های پخش بار بسط دهیم.

دو تابع f_1 و f_2 از دو متغیر x_1 و x_2 را به صورت زیر در نظر می گیریم

$$f_1(x_1, x_2) = K_1 \quad (9-8)$$

$$f_2(x_1, x_2) = K_2 \quad (10-8)$$

که در آنها K_1 و K_2 مقادیر ثابتی است.

سپس برای پاسخهای این معادله‌ها مقادیر $x^{(0)}$ و $x^{(1)}$ را تخمین می‌زنیم. زیرنوشتها نشان‌دهنده این اند که این مقادیر، مقادیر ابتدایی یا تخمینی اند. مقادیری را که باید به $x^{(0)}$ و $x^{(1)}$ افزود تا پاسخهای صحیح به دست آید با $\Delta x^{(0)}$ و $\Delta x^{(1)}$ نشان می‌دهیم. بنا بر این می‌توانیم بنویسیم:

$$K_1 = f_1(x_1, x_2) = f_1(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (11-8)$$

$$K_2 = f_2(x_1, x_2) = f_2(x_1^{(0)} + \Delta x_1^{(0)}, x_2^{(0)} + \Delta x_2^{(0)}) \quad (12-8)$$

اکنون مسئله عبارت از حل کردن معادله‌های بالا برای $\Delta x_1^{(0)}$ و $\Delta x_2^{(0)}$ است وقتی به صورت سری تیلور چنین بسط داده می‌شوند

$$K_1 = f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(0)} + \dots \quad (13-8)$$

$$K_2 = f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) + \Delta x_1^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(0)} + \Delta x_2^{(0)} \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(0)} + \dots \quad (14-8)$$

در این معادله‌ها مشتقات جزئی از درجات بالاتر از ۱ را در سری جمله‌های بسط ننوشته‌ایم. جمله $\left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)}$ نشان‌دهنده این است که مشتق جزئی به ازای مقادیر $x_1^{(0)}$ و $x_2^{(0)}$ حساب شده است. جملات دیگر نیز همین گونه حساب می‌شوند.

اگر از مشتقات جزئی از درجات بالاتر از ۱ صرف نظر کنیم می‌توانیم معادله‌های (۱۳-۸) و (۱۴-۸) را به شکل ماتریسی چنین بازنویسی کنیم.

$$\begin{bmatrix} K_1 - f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \\ K_2 - f_2(x_1^{(0)}, x_2^{(0)}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_1} \right|_{(0)} & \left. \frac{\partial f_1}{\partial x_2} \right|_{(0)} \\ \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_1} \right|_{(0)} & \left. \frac{\partial f_2}{\partial x_2} \right|_{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x_1^{(0)} \\ \Delta x_2^{(0)} \end{bmatrix} \quad (15-8)$$

که در آن، ماتریس مربعی مشتقات جزئی، ژاکوبین J یا در این مورد $J^{(0)}$ نامیده می‌شود و نشان‌دهنده این است که تخمینهای ابتدایی $x^{(0)}$ و $x^{(1)}$ برای محاسبه مقدار عددی مشتقات جزئی به کار می‌رود. یادآور می‌شود که $f_1(x_1^{(0)}, x_2^{(0)})$ مقدار محاسبه شده K_1 به ازای مقادیر تخمینی $x^{(0)}$ و $x^{(1)}$ است، اما این مقدار محاسبه شده K_1 ، مقداری نیست که از معادله (۹-۸) مشخص می‌شود مگر اینکه مقادیر تخمینی $x^{(0)}$ و $x^{(1)}$ صحیح باشند. اگر اختلاف بین مقدار مشخص شده K_1 با مقدار محاسبه شده K_1 را با $\Delta K_1^{(0)}$ نشان دهیم و $\Delta K_2^{(0)}$ را نیز به همین ترتیب تعریف کنیم، داریم

1. Jacobian

$$\begin{bmatrix} \Delta K_{\psi}^{(0)} \\ \Delta K_{\varphi}^{(0)} \end{bmatrix} = J^{(0)} \begin{bmatrix} \Delta x_{\psi}^{(0)} \\ \Delta x_{\varphi}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (16-8)$$

بنابراین با به دست آوردن و آرون ژاکوبین می توانیم $\Delta x_{\psi}^{(0)}$ و $\Delta x_{\varphi}^{(0)}$ را تعیین کنیم. لیکن چون جملاتی از بسط سری تیلور را حذف کرده ایم، افزودن این مقادیر به تخمینهای نخست، پاسخ صحیح را به دست نمی دهد و باید بار دیگر با تخمینهای نوین $x_{\psi}^{(1)}$ و $x_{\varphi}^{(1)}$ محاسبه را از سر بگیریم، به طوری که

$$x_{\psi}^{(1)} = x_{\psi}^{(0)} + \Delta x_{\psi}^{(0)}$$

$$x_{\varphi}^{(1)} = x_{\varphi}^{(0)} + \Delta x_{\varphi}^{(0)}$$

و فرایند را تکرار کنیم تا تصحیحات آن قدر کوچک شوند که درجه دقت انتخاب شده را ارضا کنند.

برای به کار بردن روش نیوتون-رافسون در حل معادله های بخش بار می توانیم ولتاژ شینه ها و ادmittانس خطها را در مختصات قطبی و یا در مختصات قائم بیان کنیم. با انتخاب شکل قطبی و تجزیه معادله (۷-۸) به مؤلفه های حقیقی و موهومی به ترتیب خواهیم داشت

$$V_k = |V_k| / \underline{\delta_k} \quad V_n = |V_n| / \underline{\delta_n} \quad \text{و} \quad Y_{kn} = |Y_{kn}| / \underline{\theta_{kn}}$$

$$P_k - jQ_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| / \underline{\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k} \quad (17-8)$$

$$P_k = \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \cos(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (18-8)$$

$$Q_k = - \sum_{n=1}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (19-8)$$

مانند روش گوس-زایدل در اینجا نیز شینه تا بخور از راه حل بساوردی برای تعیین ولتاژها حذف شده است زیرا اندازه و زاویه ولتاژ در شینه تا بخور داده شده است. اگر در نظر گرفتن شینه های با کنترل ولتاژ را به بعد موکول کنیم می توانیم P و Q را در همه شینه ها بجز شینه تا بخور مشخص کنیم و اندازه و زاویه ولتاژ را در همه شینه ها بجز شینه تا بخور که در آن اندازه و زاویه ولتاژ داده شده است حساب کنیم. مقدار ثابت مشخص شده P و Q با ثابتهای K در معادله (۱۵-۸) متناظرند. مقادیر تخمینی اندازه و زاویه ولتاژ با مقادیر تخمینی x_{ψ} و x_{φ} در معادله (۱۵-۸) متناظرند. این مقادیر تخمینی را برای محاسبه مقادیر P_k و Q_k از معادله های (۱۸-۸) و (۱۹-۸) به کار می بریم و ΔP_k و ΔQ_k را به صورت زیر تعریف می کنیم

$$\Delta P_k = P_{k, \text{حساب شده}} - P_{k, \text{داده شده}}$$

$$\Delta Q_k = Q_k - Q_{k, \text{حساب شده}} - Q_{k, \text{داده شده}}$$

که با مقادیر ΔK در معادله (۸-۱۶) متناظرند. ژاکوبین، شامل مشتقات جزئی P و Q نسبت به هر يك از متغیرهای معادله‌های (۸-۱۸) و (۸-۱۹) است. عناصر ماتریس ستونی $\Delta \delta_k^{(0)}$ و $\Delta |V_k|^{(0)}$ با $\Delta x_k^{(0)}$ و $\Delta x_k^{(0)}$ متناظرند و تصحیحاتی هستند که باید به تخمینهای ابتدایی $\delta_k^{(0)}$ و $|V_k|^{(0)}$ افزوده شوند تا مقادیر جدید برای محاسبه $\Delta P_k^{(1)}$ و $\Delta Q_k^{(1)}$ به دست آید. برای سادگی کار معادله ماتریسی را برای سیستمی با تنها سه شینه می‌نویسیم. اگر شینه تابخور، شماره ۱ باشد محاسبه را از شینه ۲ شروع می‌کنیم زیرا اندازه و زاویه ولتاژ شینه تابخور مشخص شده است. در شکل ماتریسی

$$\begin{bmatrix} \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \\ \Delta Q_2 \\ \Delta Q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial P_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial P_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial P_3}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_2}{\partial |V_3|} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_2} & \frac{\partial Q_3}{\partial \delta_3} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_2|} & \frac{\partial Q_3}{\partial |V_3|} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_2 \\ \Delta \delta_3 \\ \Delta V_2 \\ \Delta V_3 \end{bmatrix} \quad (۸-۲۰)$$

زیرنوشته‌ها که نشان دهنده شماره بساوردند در معادله (۸-۲۰) حذف شده‌اند، زیرا آنها با هر بساورد تغییر می‌کنند. عناصر ژاکوبین با گرفتن مشتقات جزئی از عبارات P_k و Q_k به دست می‌آیند هر گاه در آنها به جای ولتاژهای فرض شده برای بساورد اول ولتاژهای محاسبه شده در آخرین بساورد قبلی گذاشته شود. ژاکوبین پاره شده است تا برانواع مختلف مشتقات جزئی که در هر زیرماتریس نمایان می‌شود تأکید شده باشد. برای مثال، از معادله (۸-۱۸) به دست می‌آید

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_n} = -|V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (۸-۲۱)$$

که در آن $n \neq k$

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N |V_k V_n Y_{kn}| \sin(\theta_{kn} + \delta_n - \delta_k) \quad (۸-۲۲)$$

بدیهی است در جمع زنی بالا، $n \neq k$ زیرا به ازای $n = k$ ، δ_k از معادله (۸-۱۷) حذف

می‌شود. شکل‌های کلی مشابه دیگری از مشتقات جزئی معادله‌های (۸-۱۸) و (۸-۱۹) برای محاسبه عناصر زیرماتریسهای دیگر به دست می‌آید.

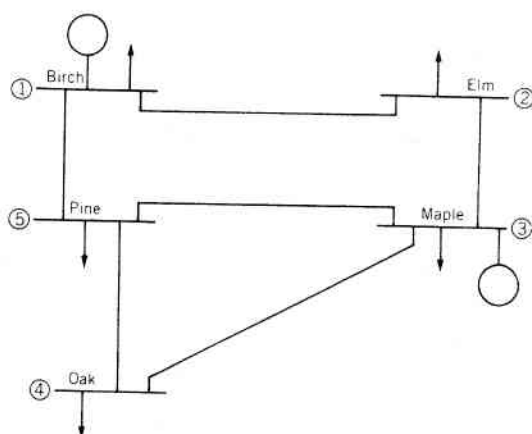
معادله (۸-۲۰) و معادله‌های مشابه در برگیرنده شینه‌های بیشتر می‌توانند از طریق وارون کردن ژاکوبین حل شوند. مقادیر به دست آمده برای $\Delta \delta_k$ و $\Delta |V_k|$ با مقادیر قبلی اندازه و زاویه ولتاژ جمع می‌شوند تا مقادیر جدیدی برای $P_k^{(1)}$ (محاسبه شده) و $Q_k^{(1)}$ (محاسبه شده) به منظور آغاز کردن بساورد بعدی به دست دهند. این فرایند ادامه می‌یابد تا به شاخص دقت تعیین شده برای کمیت‌های هر دو ماتریس ستونی برسیم. البته برای دستیابی به همگرایی، تخمین‌های ابتدایی ولتاژ می‌بایست معقول باشد، اما این نکته به ندرت ممکن است در بررسی سیستمهای قدرت مسئله ساز باشد.

شینه‌های با کنترل ولتاژ به آسانی به حساب می‌آیند. چون در چنین شینه‌ای اندازه ولتاژ ثابت است، ستون مشتقات جزئی نسبت به اندازه ولتاژ این شینه در ژاکوبین حذف شود. در این مرحله، دانستن مقدار Q در این شینه ضرورت ندارد. و بنا بر این سطر مربوط به دیفرانسیلهای جزئی Q را نیز برای شینه با کنترل ولتاژ حذف می‌کنیم. مقدار Q را در این شینه پس از همگرایی، به کمک معادله (۸-۱۹) می‌توان تعیین کرد.^۱

چنانکه پیشتر گفتیم، زمانی که معادله‌ها در مختصات قائم بیان شده‌اند نیز می‌توان روش نیوتون-رافسون را به کار برد. ما شکل قطبی معادله‌ها را از این رو انتخاب کردیم که ژاکوبین در این شکل، اطلاعات جالبی به دست می‌دهد که از شکل قائم به دست نمی‌آید. برای مثال، وابستگی P_k به δ_k و Q_k به $|V_k|$ در ژاکوبین به شکل قطبی مستقیماً دیده می‌شود. بعداً در بخش ۸-۱۰ خواهیم دید که چگونه ترانسفورماتورهای تنظیم کننده ولتاژ در خطوط انتقال اساساً بر انتقال Q در سیستم تأثیر می‌گذارند در حالی که ترانسفورماتورهای فاز-گردان اساساً بر انتقال P تأثیر می‌گذارند.

مثال ۸-۱ شکل ۸-۱، نمودار تک خطی سیستم قدرت بسیار ساده‌ای را نشان می‌دهد. ژنراتورها به شینه‌های ۱ و ۳ وصل شده‌اند و بارها به شینه‌های ۲، ۴ و ۵. مقادیر مبنا برای سیستم در خطوط فشارقوی مورد نظر در اینجا ۱۰۰ MVA و ۱۳۸ kV است. جدول ۸-۱، امیدانسیهای شش خطی را که با شماره شینه‌های دوسر خود مشخص شده‌اند به نمایش می‌گذارد. مگاوارهای باردار کننده داده شده در این جدول، بیانگر ظرفیت گسترده خطوط است و در این مثال نادیده گرفته می‌شوند اما در بخش ۸-۴ در محاسبات کامپیوتری سیستم به حساب آورده خواهند شد. جدول ۸-۲، مقادیر P و Q و V را در هر شینه به دست می‌دهد. چون مقادیر P و Q در معادله‌های (۸-۱۸) و (۸-۱۹) برای توان حقیقی و ولت آمپر واکنشی القایی

۱. شرح مفصل تر روش نیوتون-رافسون و مثالهای عددی جالبی که تا همگرایی پاسخ برای هر دو روش گوس-زایدل و نیوتون-رافسون انجام شده است در فصلهای ۷ و ۸ کتاب زیر آمده است. G. W. Stagg and A. H. El-Abiad, *Computer Methods in Power System Analysis*, McGraw-Hill Book Company, New York, 1968.



شکل ۸-۱ نمودار تک خطی مثال ۸-۱.

جدول ۸-۱

خط، شینه به شینه	طول mi	R Ω	X Ω	R در-یک	X در-یک	مگاوار باردار کننده*
۱-۲	۶۴٫۴	۴۰	۸	۳۲	۰٫۰۴۲	۴٫۱
۱-۵	۴۸٫۳	۳۰	۶	۲۴	۰٫۰۳۱	۳٫۱
۲-۳	۴۸٫۳	۳۰	۶	۲۴	۰٫۰۳۱	۳٫۱
۳-۴	۱۲٫۸۷	۸۰	۱۶	۶۴	۰٫۰۸۴	۸٫۲
۳-۵	۸۰٫۵	۵۰	۱۰	۴۰	۰٫۰۵۳	۵٫۱
۴-۵	۹۶٫۵	۶۰	۱۲	۴۸	۰٫۰۶۳	۶٫۱

* در ۱۳۸ kv

درودی به شبکه درهر شینه مثبت است، مقادیر خالص P و Q برای این معادله‌ها در شینه‌های ۲، ۴ و ۵ منفی اند. درجایی که اندازه ولتاژ ثابت است Q تولیدی مشخص نشده است. در ستون ولتاژ، مقادیر مربوط به شینه‌های بار، تخمینهای ابتدایی اند. مقادیر داده شده برای اندازه و زاویه ولتاژ در شینه تابخور، ثابت نگه داشته می شوند و اندازه ولتاژ داده شده در شینه ۳ ثابت باقی می ماند. قرار است بررسی بخش باری به روش نیوتون-رافسون با

جدول ۲-۸

شینه	تولید	بار	V	توضیحات
	Q, Mvar	P, MW	Q, Mvar	P, MW
۱			۳۰	۶۵
۲	۰	۰	۶۰	۱۱۵
۳	۱۸۰		۴۰	۷۰
۴	۰	۰	۳۰	۷۰
۵	۰	۰	۴۰	۸۵

استفاده از شکل قطبی معادله‌ها برای P و Q انجام شود. تعداد سطرها و ستون‌ها را در ژاکوبین تعیین کنید. مقدار $\Delta P^{(0)}$ و مقدار عنصر دوم در سطر اول ژاکوبین را به کمک مقادیر مشخص شده یا از تخمینهای ابتدایی ولتاژها محاسبه کنید.

حل: چون شینه تابخور نیاز به سطر و ستونی در ژاکوبین ندارد، اگر P و Q برای ۴ شینه دیگر مشخص شوند، به یک ماتریس ۸×۸ نیاز خواهد بود. لیکن، اندازه ولتاژ در شینه ۳ نیز مشخص شده است (ثابت نگه داشته می‌شود)، پس ژاکوبین، ماتریسی ۷×۷ خواهد بود.

برای محاسبه $P^{(0)}$ به ازای ولتاژ تخمینی و ولتاژهای ثابت جدول ۲-۸، تنها به ادمیتانسهای زیر نیاز داریم

$$Y_{21} = -\frac{1}{0.0042 + j0.0168} = 57747 \angle 104.04^\circ$$

$$Y_{22} = -\frac{1}{0.0031 + j0.0126} = 77067 \angle 103.82^\circ$$

و Y_{22} که (چون هیچ ادمیتانس دیگری به شینه ۲ پایان نمی‌یابد) به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$Y_{22} = -Y_{21} - Y_{23} = -|Y_{21}| \angle \theta_{21} - |Y_{23}| \angle \theta_{23}$$

از معادله (۸-۱۸) چون Y_{24} و Y_{25} صفرند و چون مقادیر ابتدایی $\delta_1^{(0)} = \delta_2^{(0)} = \delta_3^{(0)} = 0$ نتیجه می‌گیریم

$$\begin{aligned}
 P_{\gamma}^{(0)} (\text{محاسبه شده}) &= |V_{\gamma} V_{\gamma} Y_{\gamma 1}| \cos \theta_{\gamma 1} - |V_{\gamma} V_{\gamma} Y_{\gamma 1}| \cos \theta_{\gamma 1} \\
 &\quad - |V_{\gamma} V_{\gamma} Y_{\gamma 2}| \cos \theta_{\gamma 2} + |V_{\gamma} V_{\gamma} Y_{\gamma 2}| \cos \theta_{\gamma 2} \\
 &= (100 \times 1004 - 100 \times 100) |Y_{\gamma 1}| \cos \theta_{\gamma 1} \\
 &\quad - (100 \times 100 - 100 \times 1002) |Y_{\gamma 2}| \cos \theta_{\gamma 2} \\
 &= 0004 \times 507747 \cos 104004^{\circ} + \\
 &\quad 0002 \times 77067 \cos 10382^{\circ} \\
 &= -00560 - 00368 = -00928 \quad \text{در-يك}
 \end{aligned}$$

توان برنامه‌ریزی شده ورودی به شبکه در شینه ۲ عبارت است از

$$-\frac{115}{100} = -115 \quad \text{در-يك}$$

بنابراین

$$\Delta P_{\gamma}^{(0)} = -115 - (-00928) = -105072 \quad \text{در-يك}$$

برای به دست آوردن $\partial P_{\gamma} / \partial \delta_{\gamma}$ ، معادله (۸-۲۱) را به کار می‌بریم و نتیجه می‌گیریم

$$\frac{\partial P_{\gamma}}{\partial \delta_{\gamma}} = -|V_{\gamma} V_{\gamma} Y_{\gamma 2}| \sin(\theta_{\gamma 2} + \delta_{\gamma} - \delta_{\gamma})$$

$$\square \quad = -100 \times 1002 \times 77067 \sin 10382 = -776333 \quad \text{در-يك}$$

مراحل اجرای روش نیوتون-رافسون را می‌توان چنین خلاصه کرد:

۱. تعیین مقادیر (محاسبه شده) P_k و (محاسبه شده) Q_k گذرنده به درون سیستم در هر شینه به ازای مقادیر ذکر شده یا تخمینی اندازه و زاویه و لذاها در بساورد اول یا آخرین و لذاهای به دست آمده در بساوردهای بعدی.

۲. محاسبه مقدار ΔP در هر شینه.

۳. محاسبه ژاکوبین به کمک مقادیر مشخص شده یا تخمینی اندازه و زاویه و لذاها در معادله‌های مشتقات جزئی که در مشتق‌گیری از معادله‌های (۸-۱۸) و (۸-۱۹) به دست می‌آید.

۴. وارون کردن ژاکوبین و محاسبه تصحیحات و لذا $\Delta \delta_k$ و $\Delta |V_k|$ در هر شینه.

۵. محاسبه مقادیر جدید δ_k و $|V_k|$ از طریق افزودن $\Delta \delta_k$ و $\Delta |V_k|$ به مقادیر پیشین.

۶. بازگشت به گام ۱ و تکرار فرایند با بهره‌گیری از آخرین مقادیر به دست آمده

برای اندازه و زاویه ولتاژها تا اینکه همه مقادیر ΔP و ΔQ یا همه مقادیر $\Delta\delta$ و $\Delta|V|$ از درجه دقت انتخاب شده کمتر شوند.

P و Q در شینه تابخور و Q در شینههای با کنترل ولتاژ را می توان از معادله های (۸-۱۸) و (۸-۱۹) به دست آورد. گذر خط را می توان از تفاوت ولتاژهای شینه ها به دست آورد.

تعداد بساووردهای لازم در روش نیوتون-رافسون با بهره گیری از ادیتمانس شینه ها عملاً مستقل از تعداد شینه ها است. زمان لازم برای روش گوس-زایدل (ادیتمانس شینه ها) تقریباً به طور مستقیم با تعداد شینه ها افزایش می یابد. برعکس، محاسبه عناصر ژاکوبین وقت گیر است، و زمان لازم برای هر بساوورد در روش نیوتون-رافسون بسیار بیشتر است. مزیت زمان کوتاه تر برای راه حل کامپیوتری با دقت مشابه، جز در مورد سیستمهای بسیار کوچک، به نفع روش نیوتون-رافسون است.

۴-۸ بررسی کامپیوتری پخش بار

شرکتهای برق از برنامه های بسیار جامعی برای انجام بررسیهای پخش بار استفاده می کنند. یک برنامه نمونه وار قادر است به سیستمی با بیش از ۲۰۰۰ شینه، ۳۰۰۰ خط، و ۵۰۰ ترانسفورماتور بپردازد. البته، در صورتی که امکانات کامپیوتر موجود به اندازه کافی وسیع باشد برنامه ها را می توان از این هم گسترده تر کرد.

داده های خورانده به کامپیوتر باید شامل مقادیر عددی داده شده در جدولهای ۸-۱ و ۸-۲ باشند و نشان دهند که آیا هر شینه یک شینه تابخور است، شینه تنظیم شده ای است که در آن اندازه ولتاژ از راه تولید توان واکنشی Q ثابت نگه داشته می شود، یا شینه ای با P و Q تثبیت شده است. در جایی که مقادیر قرار نیست ثابت نگه داشته شوند مقادیر داده شده در جدولها تخمینهای ابتدایی تلقی می شوند. حدود تولید P و Q و همچنین حدود کیلوولت آمپر هر خط باید معمولاً مشخص شود. برنامه ها معمولاً با مبنای ۱۰۰ MVA فرض می شوند، مگر آنکه خلاف آن گفته شود.

میزان کل باردار شدن خط بر حسب مگاوار که برای هر خط مشخص می شود بیانگر ظرفیت موازی است و مساوی با $\sqrt{3}$ برابر ولتاژ نامی خط بر حسب کیلوولت ضرب در I_{cbg} تعریف شده در معادله های (۴-۲۴) و (۴-۲۵)، تقسیم بر ۱۰۳ است. این مقدار برابر است با $\omega C_n |V|^2$ که در آن $|V|$ ، ولتاژ نامی خط به خط بر حسب کیلو ولت، و C_n ظرفیت خط نسبت به خنثی بر حسب فاراد برای کل طول خط است. برنامه کامپیوتری، خط را به صورت π نامی در نظر می گیرد که در آن ظرفیت محاسبه شده از مقدار مگاوار باردار کننده داده شده، به تساوی بین دوسر خط تقسیم شده است. در مورد خطهای بلند، کامپیوتر را می توان طوری برنامه ریزی کرد که π معادل را برای گسترش یکنواخت ظرفیت در طول خط محاسبه کند.

۵-۸ اطلاعات به‌دست آمده در بررسی پخش بار

اطلاعاتی که از پاسخهای کامپیوتری پخش بار به دست می‌آید کمک بزرگ کامپیوترهای رقمی را به توانایی مهندس سیستم قدرت برای کسب اطلاعات بهره‌برداری در مورد سیستمهای هنوز ساخته نشده و برای تحلیل آثار هرگونه تغییر در سیستمهای موجود نشان می‌دهد. بحث زیر بنا ندارد صورت همه اطلاعات قابل دستیابی را ارائه کند بلکه منظورش نشان دادن اهمیت عظیم کامپیوترهای رقمی در مهندسی سیستم قدرت است.

نتایج بیرون‌نوشت کامپیوتر، شامل تعدادی جدول بندی است. معمولاً مهمترین اطلاعاتی که باید پیش از هر چیز به آن توجه کرد جدولی است که صورتی از شماره و عنوان شینه‌ها، اندازه در یکی و ولتاژ شینه‌ها و زاویه آنها، تولید و بار در شینه بر حسب مگاوات و مگاوار، میزان باردار شدن خط، و مگاوار خازنهای استاتیک و رثکتانسهای متصل به شینه‌ها را ارائه می‌دهد. همراه با اطلاعات مربوط به هر شینه، میزان گذر مگاوات و مگاوار از این شینه به هر خط انتقال متصل به آن شینه ذکر می‌شود. مجموع تولید و بارهای سیستم بر حسب مگاوات و مگاوار داده می‌شود. جدول بندی تشریح شده را شکل ۸-۲، برای سیستم پنج شینه‌ای مثال ۸-۱ نشان می‌دهد.

در بهره‌برداری از سیستمهای قدرت، هرافت قابل توجهی در ولتاژ اولیه ترانسفورماتور که ناشی از تغییر بار است ممکن است ایجاد کند تنظیم سرك ترانسفورماتورهای را که سرکهای قابل تنظیم دارند تغییر دهیم تا ولتاژ مناسب برای بار، حفظ شود. درجایی که قرار شده ترانسفورماتورهای سرك-تعویض شوند، ولتاژ شینه‌ای را در محدوده مجاز مشخص شده نگه‌دارد، پیش از همگرایی کامل، ولتاژ کنترل می‌شود. اگر ولتاژ در محدوده مشخص شده نباشد، برنامه، کامپیوتر را و می‌دارد که دست به یک رشته بساورد تازه با یک گام تغییر در تنظیم قبلی سرکها بزنند. این فرایند هرچند بار که لازم باشد تکرار می‌شود تا پاسخ با شرایط دلخواه سازگار شود. تنظیم نهایی سرك در نتایج جدول بندی شده آورده می‌شود.

سیستم، ممکن است به چند منطقه تقسیم بندی شود، یا اینکه بررسی ممکن است سیستمهای چندین شرکت برق را که هر یک معرف منطقه متفاوتی است شامل شود. برنامه کامپیوتری، گذر توان را بین مناطق بررسی می‌کند، و هر انحراف از گذر مقرر شده را با اعمال تغییر مناسب در تولید ژنراتور از پیش تعیین شده‌ای در هر منطقه تصحیح می‌کند. در بهره‌برداری واقعی از سیستم، بر تبادل توان بین مناطق نظارت می‌شود تا تعیین شود که آیا منطقه‌ای معین، مقدار توان متناظر با تبادل دلخواه را تولید می‌کند یا نه.

از میان سایر اطلاعاتی که ممکن است کسب شود یکی صورتی است از همه شینه‌هایی که اندازه ولتاژشان به ترتیب، از ۱۰۵ (یا هر حد دیگری) بیشتر و یا از ۹۵ (یا هر حد دیگری) کمتر است. می‌توان صورتی از بارکنش خطها بر حسب مگاوات آمپر گرفت. بیرون نوشت کامپیوتر همچنین کل مگاوات ($|I|^2 R$) و مگاوار ($|I|^2 X$) اتلاف در سیستم

SAVE THE PILES POWER COMPANY - LOAD FLOW STUDY

REPORT OF POWER FLOW CALCULATIONS FOR AREA 1

DATE 04/26/79 TIME 00.00.12
3 ITERATIONS, SWING BUS IS 1

BUS	NAME	VOLTS	ANGLE	MM	MYAR	WVAR	WVAR	TO	NAME	MM	MYAR	TAP
1	BIRCH	1.000	0.0	234.7	100.1	65.0	30.0	3	PINE	73.98	11.55	
2	ELM	0.961	-6.3	0.0	0.0	115.0	60.0	3	BIRCH	93.68	18.52	
3	MAPLE	1.020	-3.7	180.0	110.38	70.0	40.0	3	MAPLE	-71.41	-25.39	
4	OAK	0.920	-10.9	0.0	0.0	70.0	30.0	2	ELM	44.59	35.85	
5	PINE	0.968	-6.2	0.0	0.0	85.0	40.0	3	PINE	40.96	16.28	
AREA TOTALS		414.7	210.4	405.0	200.0	0.0		4	MAPLE	-38.74	-18.90	
								3	PINE	-31.25	-11.00	
								1	BIRCH	-92.59	-29.14	
								4	OAK	-32.03	-8.17	

SOLUTION TIME 0.40 SECONDS
TOTAL TIME 0.44 SECONDS

شکل ۸-۲ ساخته کامپیوتری بخش بار برای سیستم مثال ۸-۱ با مبنای ۱۰۰ MVA

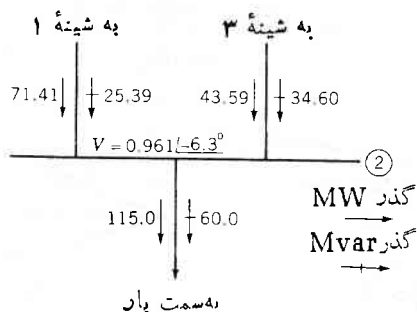
و ناهمخوانی P و Q هر شینه را ارائه می‌دهد. ناهمخوانی، معرف دقت پاسخ است و عبارت از تفاوت بین P (و نیز معمولا Q) ورودی و خروجی هر شینه است.

۸-۶ نتایج عددی

بررسی بخش بار برای سیستم تشریح شده در مثال ۸-۱ را اصلاح شده برنامه‌ای متعلق به شرکت برق فیلا دلفیا انجام داده است و شکل ۸-۲ بیرون نوشت آن است. سه بساورد نیوتون-رافسون لازم بوده است. بررسیهایی در همین ابعاد با استفاده از برنامه‌های دیگر نیز به سه بساورد نیوتون-رافسون، اما با همان درجه دقت به ۲۲ بساورد گوس-زایدل نیاز داشته‌اند. شکل ۸-۲ را می‌توان برای کسب اطلاعاتی بیشتر از آنچه در جدول آمده است بررسی کرد. برای مثال، اتلاف مگاوات در هر خط را می‌توان با مقایسه مقادیر P و Q در دو سر خط به دست آورد. به عنوان نمونه، می‌بینیم که 95.68 MW از شینه ۱ به درون خط ۵-۱ می‌گذرد و 92.59 MW از همان خط به شینه ۵ می‌گذرد. واضح است که اتلاف $R|I|^2$ در این خط 3.09 MW است. در صفحه دیگر بیرون نوشت، که در اینجا ارائه نشده، اتلاف $R|I|^2$ سیستم، 96.7 MW آورده شده است. اطلاعات کسب شده از شکل ۸-۲ را می‌توان بر روی نموداری از کل سیستم به نمایش گذاشت. شکل ۸-۳ بخشی از چنین نموداری را در شینه ۲ نشان می‌دهد.

۸-۷ کنترل توان به درون شبکه

بعضی از ویژگیهای ماشینهای سنکرون را در فصل ۶ مطالعه کردیم و این اصل را نتیجه گرفتیم که ژنراتور پرتحرک، توان واکنشی Q به سیستم می‌دهد در حالی که ژنراتور کم تحرک، توان واکنشی Q از سیستم می‌گیرد. بنا بر این درمی‌یابیم که چگونه تحریک کننده، گذر توان واکنشی بین ژنراتور و سیستم را کنترل می‌کند.



شکل ۸-۳ گذر P و Q در شینه ۲ برای سیستم مثال ۸-۱. اعداد کنار پیکانها مقدار گذر P و Q را بر حسب مگاوات و مگاوار نشان می‌دهند. ولتاژ شینه بر حسب دریک است.

اکنون توجه خود را به توان حقیقی P معطوف می‌کنیم. فرض کنید که ژنراتوری که سیستمی بزرگتر را تغذیه می‌کند در حال تحویل دادن توان در شرایطی پایدار است به طوری که بین ولتاژ شینه سیستم، V_t ، و ولتاژ تولید شده ماشین، E_g ، زاویه معینی، δ وجود دارد. اگر E_g نسبت به V_t پیش‌افتی باشد، نمودار فازبرداری شکل ۸-۴ (الف) را داریم که همان شکل ۹-۴ (الف) است. اگر توان ورودی به ژنراتور با بیشتر باز شدن شیرهای ورود بخار (یا آب) به‌تدریج افزایش یابد درحالی که $|E_g|$ ثابت است، سرعت روتور شروع به افزایش می‌کند و زاویه بین E_g و V_t زیاد می‌شود. افزایش δ ، چنانکه از مقایسه شکل ۸-۴ (الف)، و ۸-۴ (ب) برمی‌آید، I_a را بزرگتر و θ را کوچکتر می‌کند. ژنراتور در نتیجه، توان بیشتری به شبکه تحویل خواهد داد، و اگر اتلافها نادیده گرفته شود ورودی محرک نخستین، دوباره با خروجی به شبکه برابر خواهد شد. تعادل سرعت متناظر با فرکانس شبکه بینهایت، با زاویه δ بزرگتری مجدداً برقرار می‌شود. شکل ۸-۴ (ب) با همان تحریک dc و در نتیجه با همان $|E_g|$ شکل ۸-۴ (الف) رسم شده است، اما توان خروجی $|V_t| \cdot |I_a| \cos \theta$ در حالت شکل ۸-۴ (ب) بیشتر است، و افزایش δ باعث شده است که ژنراتور، توان اضافی به شبکه تحویل دهد.

وابستگی توان به زاویه توان را معادله‌ای که $P + jQ$ تحویلی ژنراتور را بر حسب δ به دست می‌دهد نیز می‌نمایاند. از

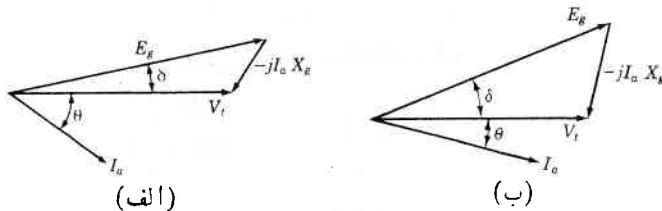
$$V_t = |V_t| \angle 0^\circ \quad \text{و} \quad E_g = |E_g| \angle \delta$$

که در آنها V_t و E_g بر حسب ولت نسبت به‌خشتی یا بر حسب در-یک بیان می‌شوند، نتیجه می‌گیریم

$$I_a = \frac{|E_g| \angle \delta - |V_t|}{jX_g} \quad (۲۳-۸)$$

و

$$I_a^* = \frac{|E_g| \angle -\delta - |V_t|}{-jX_g} \quad (۲۴-۸)$$



شکل ۸-۴ نمودارهای فازبرداری ژنراتور با مقادیر ثابت $|E_g|$ و $|V_t|$ در حالت (الف) زاویه δ کوچک و (ب) زاویه δ بزرگتر برای نشان دادن افزایش توان تحویلی بر اثر افزایش δ .

در نتیجه

$$\begin{aligned}
 P + jQ &= V_t I_a^* \\
 &= \frac{|V_t| \cdot |E_g| \angle -\delta - |V_t|^2}{-jX_g} \\
 &= \frac{|V_t| \cdot |E_g| \angle 90^\circ - \delta - |V_t|^2 \angle 90^\circ}{X_g} \quad (25-8)
 \end{aligned}$$

بخش حقیقی معادله (۲۵-۸) عبارت است از

$$P = \frac{|V_t| \cdot |E_g|}{X_g} \cos(90^\circ - \delta) = \frac{|V_t| \cdot |E_g|}{X_g} \sin \delta \quad (26-8)$$

و بخش موهومی عبارت است از

$$\begin{aligned}
 Q &= \frac{|V_t| \cdot |E_g|}{X_g} \sin(90^\circ - \delta) - \frac{|V_t|^2}{X_g} \\
 &= \frac{|V_t|}{X_g} (|E_g| \cos \delta - |V_t|) \quad (27-8)
 \end{aligned}$$

زمانی که مقادیر V_t و E_g در معادله‌های (۲۶-۸) و (۲۷-۸)، به جای در-یک، برحسب ولت بیان می‌شوند، باید دقت کرد که V_t و E_g ولتاژهای خط به خطی و P و Q مربوط به هر فاز خواهند بود. البته، اگر مقدار خط به خط به جای V_t و E_g گذاشته شود مقدار سه فاز P و Q را نتیجه خواهد داد. P و Q در یکی در معادله‌های (۲۶-۸) و (۲۷-۸)، بسته به اینکه کل توان سه فاز یا توان هر فاز خواسته شود در مگاوات آمپر سه فاز مینا یا مگاوات آمپر مبنای هر فاز ضرب می‌شوند.

معادله (۲۶-۸) به روشنی وابستگی توان منتقل شده به شبکه را به زاویه توان δ در صورت ثابت بودن $|E_g|$ و $|V_t|$ نشان می‌دهد. لیکن، اگر P و V_t ثابت باشند، معادله (۲۶-۸) نشان می‌دهد که اگر $|E_g|$ با افزودن تحریک dc افزایش یا بد δ کاهش می‌یابد. در معادله (۲۷-۸) با ثابت بودن P ، چه افزایش در مقدار $|E_g|$ و چه کاهش در مقدار δ به مفهوم افزایش Q است اگر قبلاً مثبت بوده باشد و یا اینکه کاهش در مقدار Q و شاید هم مثبت شدن آن اگر پیش از افزایش تحریک، منفی بوده باشد. این امر با نتایج به دست آمده در بخش ۴-۶، سازگار است.

معادله (۲۶-۸) را می‌توان به صورت توان انتقال یافته از یک شینه به شینه دیگر شبکه از طریق رئکتانس X بین دو شینه تعبیر کرد. اگر V_1 و V_2 ، ولتاژهای شینه‌ها و δ ، زاویه پیش افت V_1 نسبت به V_2 باشد،

$$P = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X} \sin \delta \quad (28-8)$$

به همین ترتیب از معادله (۲۷-۸)، Q دریافتی شینه ۲ عبارت است از

$$Q = \frac{|V_2|}{X} (|V_1| \cos \delta - |V_2|) \quad (29-8)$$

معادله‌های به دست آمده در بخش ۵-۸ برای رسیدن به نمودار دایره‌ای چون مقاومت و ظرفیت را به حساب می‌آورند از معادله‌های (۲۸-۸) و (۲۹-۸) کلی‌ترند. لیکن، اگر تنها پارامتر به حساب آمده در خط، اندوکنانش باشد معادله‌های (۵۹-۵) و (۶۰-۵) همان معادله‌های (۲۸-۸) و (۲۹-۸) می‌شوند.

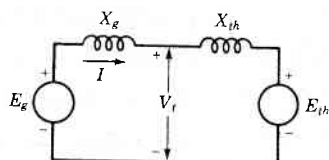
از معادله‌های (۲۸-۸) و (۲۹-۸) درمی‌یابیم که زمانی که δ کوچک است، افزایش δ باعث تغییر بیشتری در P تا در Q می‌شود. این تفاوت به دلیل آن است که وقتی δ در پهنه‌ای کمتر از 10° یا 15° تغییر می‌کند $\sin \delta$ به شدت اما $\cos \delta$ تنها اندکی تغییر می‌کند.

۸-۸ انتخاب ولتاژ شینه‌ها

در فصل ۶ و بخش ۸-۷ به بررسی ژنراتور سنکرون وقتی شینه بینهایت را تغذیه می‌کند پرداختیم. اثر تحریک ژنراتور و زاویه توان را زمانی که ولتاژ بین سرهای ژنراتور ثابت باقی می‌ماند دیدیم. لیکن، در بررسیهای بخش بار با کامپیوتر رقمی دریافتیم که لازم است اندازه ولتاژ یا توان واکنشی هر شینه بجز شینه تابخور که ولتاژش با اندازه و زاویه مشخص شده است ذکر شود. اگرچه کامپیوتر می‌تواند به آسانی نتایج مشخص کردن اندازه ولتاژهای مختلف شینه‌های خاص برهه سیستم را در اختیار ما بگذارد، توجه به اینکه در یک مورد بسیار ساده چه اتفاق می‌افتد ممکن است مفید باشد.

معمولاً هنگام انجام بررسی بخش بار با کامپیوتر، اندازه ولتاژ شینه‌هایی که در آنها تولید صورت می‌گیرد مشخص می‌شود. در چنین شینه‌هایی توان حقیقی P تأمین شده از ژنراتور نیز مشخص می‌شود. سپس توان واکنشی Q را کامپیوتر در هنگام حل مسئله تعیین می‌کند. در نتیجه، اینک می‌خواهیم تأثیر اندازه ولتاژ مشخص شده شینه را بر مقدار Q تأمین شده از ژنراتور برای شبکه قدرت، بررسی کنیم.

شکل ۵-۸، ژنراتوری را با مدار معادلش نشان می‌دهد که از مقاومت نسبتاً کوچکش برای ساده شدن بررسی صرف نظر شده است. سیستم قدرت با ولتاژ معادل E_{th} ، متوالی با امپدانس تونن X_{th} ، بار هم با نادیده گرفتن مقاومت نمایانده شده است. بارهای محلی وصل به شینه نیز در معادل تونن گنجانده شده است. برای اینکه مولد، توان ثابتی تحویل دهد، مؤلفه‌ای از I که با E_{th} هم‌فاز است باید ثابت بماند. ولتاژ مشخص شده شینه، $|V_t|$ است، و

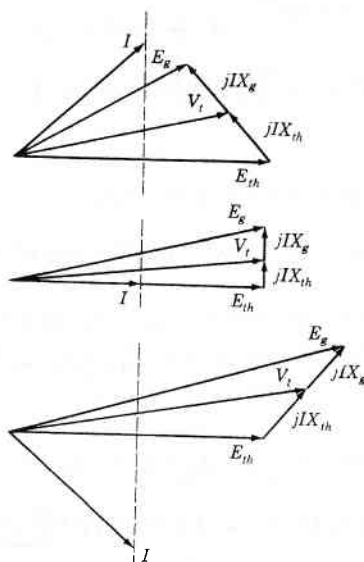


شکل ۵-۸ ژانراتوری با ولتاژ داخلی E_g متصل به سیستم قدرتی که با معادل توننش ارائه شده.

$$V_t = E_{th} + jIX_{th} \quad (۳۰-۸)$$

نمودار فازبرداری مدار شکل ۵-۸ برای سه زاویه فاز مختلف بین E_{th} و I در شکل ۶-۸ نشان داده شده است. لیکن، در هر سه حالت، مؤلفه‌ای از I که با E_{th} هم‌فاز است یک مقدار دارد.

شکل ۶-۸ نشان می‌دهد که مقادیر بزرگتر ولتاژ شینه V_t ، به‌ازای توان ورودی ثابت به شینه، به $|E_g|$ بزرگتر نیاز دارد، و البته، $|E_g|$ بزرگتر با افزودن تحریک dc ژنراتور حاصل می‌شود. همان‌طور که در شکل ۶-۸ می‌بینیم و همان‌طور که از بحث ژنراتور سنکرون انتظار می‌رود، افزودن ولتاژ شینه از طریق افزودن $|E_g|$ باعث پس‌افتی‌تر شدن جریان می‌شود. ازدیدگاه پخش بار، افزایش ولتاژ مشخص شده در شینه یک ژنراتور به این معنی است که ژنراتور تغذیه‌کننده آن شینه، توان واکنشی بیشتری به آن شینه تحویل می‌دهد.



شکل ۶-۸ نمودارهای فازبرداری ژنراتوری که با سه ولتاژ شینه V_t مختلف، توان برابری به سیستم تحویل می‌دهد.

از نظر بهره‌برداری سیستم، ولتاژ شینه و تولید Q را با تنظیم تحریک ژنراتور کنترل می‌کنیم. از آنجایی که سیستم را با معادل توننش نمایش داده‌ایم، فرض شده است که همه مقادیر E_g و E_m در سیستم از لحاظ اندازه و زاویه ثابت می‌مانند. این فرض در شرایط واقعی بهره‌برداری کاملاً درست نیست. زمانی که تغییری در تحریک یک ژنراتور صورت می‌گیرد، تغییرات دیگری ممکن است در جای دیگر سیستم روی دهد. مثالی که تغییر E_g ژنراتورها یا موتورهای متصل به شینه‌های دیگر را ایجاب می‌کند زمانی است که مشخص شده است که ولتاژ باید در این شینه‌ها ثابت بماند. برنامه کامپیوتری، همه این شرایط تحمیلی را در نظر می‌گیرد. لیکن، فرض ما مبنی بر ثابت بودن مقادیر E_g و E_m در سیستم، بجز در جایی که دست به تغییراتی می‌زنیم، برای نمایاندن تأثیر تغییر اندازه ولتاژ شینه‌ای خاص، بسیار مفید است.

مثال ۸-۲ ژنراتوری که سیستم بزرگی را تغذیه می‌کند می‌تواند با مدار معادل توننش، شامل ژنراتوری به ولتاژ E_{th} متوالی با $Z_{th} = j0.2 \text{ pu}$ نمایانده شود. ولتاژ همین سرهای ژنراتور، زمانی که جریان $0.8 - j0.2 \text{ pu}$ را می‌دهد، $V_t = 0.97 \angle 0^\circ \text{ pu}$ است. رثکتانس سنکرون ژنراتور 0.1 pu است. Q و P ورودی به سیستم در سرهای ژنراتور و E_g را محاسبه کنید (الف) برای شرایط تشریح شده در بالا و (ب) اگر زمانی که ژنراتور همان توان P را به سیستم می‌دهد $|V_t| = 0.9 \text{ pu}$ باشد. فرض کنید سیستم آن قدر بزرگ باشد که E_{th} از تغییر $|V_t|$ تأثیر نپذیرد. لیکن چون Z_{th} صفر نیست، شینه متصل به ژنراتور، شینه بینهایت نیست. حل: (الف) از ژنراتور به درون سیستم

$$P + jQ = 0.97(0.8 + j0.2) = 0.776 + j0.194 \text{ در یک}$$

$$E_g = 0.97 + j1(0.8 - j0.2) \\ = 1.17 + j0.8 = 1.42 \angle 34.4^\circ \text{ در یک}$$

(ب) برای تعیین Q و P به ازای $|V_t| = 0.9$ باید زاویه فاز V_t را از طریق به دست آوردن زاویه δ بین V_t و E_{th} به ازای $V_t = 0.9$ و $P = 0.776$ از معادله (۸-۲۸) چنین تعیین کنیم

$$E_{th} = 0.97 - j0.2(0.8 - j0.2) \\ = 0.93 - j0.16 = 0.944 \angle -9.76^\circ \text{ در یک}$$

$$\frac{100 \times 0.944}{0.02} \sin \delta = 0.776$$

$$\delta = 9.46^\circ$$

(که پیش افت V_i نسبت به E_{th} است). در نتیجه،

$$V_i = 100 \angle -9.46^\circ + 9.46^\circ = 100 \angle -0.3^\circ = 100 - j0.005$$

$$I = \frac{100 - j0.005 - (0.93 - j0.16)}{j0.02}$$

$$= \frac{0.07 + j0.155}{j0.02} = 0.775 - j0.350$$

$$= 0.850 \angle -24.3^\circ$$

$$E_g = 100 - j0.005 + j(0.775 - j0.350)$$

$$= 103.50 + j0.770 = 105.5 \angle 2.97^\circ \quad \text{در-يك}$$

از سرهای ژنراتور به درون سیستم

$$P + jQ = 100 \angle -0.3^\circ \times 0.850 \angle 24.3^\circ$$

$$= 0.850 \angle 24.0^\circ = 0.776 + j0.346 \quad \text{در-يك}$$

این مثال، استدلال ما را تأیید می کند که هرچه ولتاژ شینه ای وصل به ژنراتور از سیستم را بیشتر انتخاب کنیم ژنراتور، توان واکنشی بیشتری به سیستم می دهد و نیاز به این دارد که با افزودن تحریک dc، ولتاژش افزایش یابد. در این مثال Q از ۱۹۴ به ۳۴۶ در-يك افزایش یافت و لازم شد $|E_g|$ از ۱۴۲ به ۱۵۵ در-يك افزایش یابد. □

۹-۸ گروه خازنها

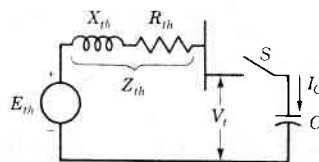
روش بسیار مهم دیگری برای کنترل ولتاژ شینه ها بهره گیری از گروه-خازنهای موازی در محل شینه های سراسر خط در سطوح خواه انتقال و خواه توزیع یا در پستهای برق و محل بارهاست. اساساً خازنها وسیله تأمین وار در نقطه ای هستند که نصب می شوند. گروه خازنها ممکن است همیشه در مدار باشند، اما به عنوان تنظیم کننده های ولتاژ می توانند به تناسب تغییر مصرف از سیستم قطع یا به آن وصل شوند. قطع و وصل ممکن است دستی باشد یا اینکه به صورت خودکار، با رله های زمانی و یا در پاسخ به شرایط ولتاژ یا توان واکنشی کنترل شود. زمانی که خازنها بایاری دارای ضریب توان پس افتهی موازی باشند مانند يك

منبع، بخشی از توان واکنشی بار یا همه آن را فراهم می‌کنند. بنابراین، خازن‌ها جریان خط لازم برای تغذیه بار را کاهش می‌دهند و با اصلاح ضریب توان، میزان افت ولتاژ در خط را نیز کاهش می‌دهند. چون خازن‌ها درخواست توان واکنشی از ژنراتورها را کم می‌کنند، توان حقیقی خروجی بیشتری در دسترس خواهد بود. خواننده اگر بخواهد می‌تواند تأثیر ضریب توان بر تنظیم ولتاژ را با مراجعه به شکل ۵-۵ مرور کند.

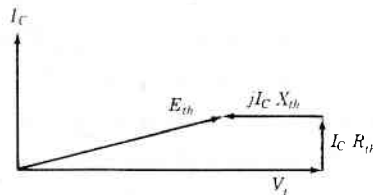
در برنامه کامپیوتری پخش بار، اندازه ولتاژ را تنها در صورتی می‌توان از پیش مشخص کرد که منبعی برای تولید توان واکنشی موجود باشد. در نتیجه در شینه‌های بی‌ژنراتور، گروه خازن باید در نظر گرفته شود، کامپیوتر مقدار Q لازم را مشخص خواهد کرد. اگر خازن‌ها در گره خاصی به کار روند، افزایش ولتاژ در آن گره را می‌توان به کمک قضیه تونن تعیین کرد. شکل ۸-۷، سیستمی را با معادل تونن در گرهی نشان می‌دهد که در آنجا خازن‌ها با بستن کلید وارد مدار می‌شوند. در مدار معادل، مقاومت نیز نشان داده شده است اما همیشه از رنکتنانس القایی بسیار کوچکتر است. وقتی کلید باز است ولتاژ گره V_i با ولتاژ تونن، E_{th} برابر است. زمانی که کلید بسته می‌شود، جریانی که خازن می‌کشد عبارت است از

$$I_C = \frac{E_{th}}{Z_{th} - jX_C} \quad (۸-۳۱)$$

نمودار فاز برداری سیستم را شکل ۸-۸ نشان می‌دهد. افزایش V_i در نتیجه افزودن خازن بسیار نزدیک به $|I_C|X_{th}$ است، اگر با توجه به برابر بودن E_{th} و V_i پیش از افزودن



شکل ۸-۷ مداری که خازنی را نشان می‌دهد که از طریق کلید S به سیستمی وصل می‌شود که با معادل توننش ارائه شده است.



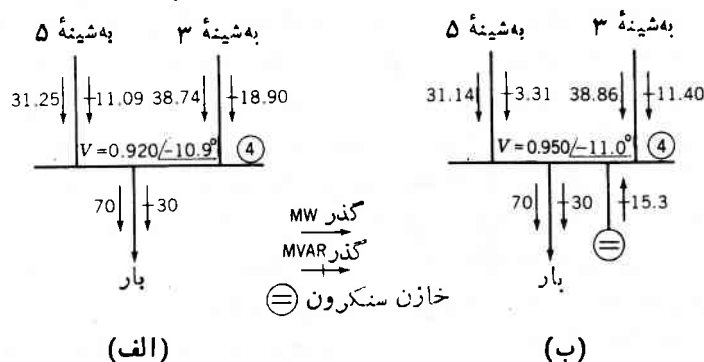
شکل ۸-۸ نمودار فاز برداری مدار شکل ۸-۷ پس از اتصال به خازن. پیش از اتصال خازن $V_i = E_{th}$.

خازن، فرض کنیم که E_{th} تغییر نمی کند. این نمودار فاز برداری به تشریح چگونگی افزایش ولتاژ شینه ای که خازن در آن نصب شده است کمک می کند. مثال ۷-۶ در واقع، بخشی از بررسی ما در مورد Z_{bus} بود؛ و این مثال باید مرور شود زیرا نشان می دهد که چگونه تغییر در اندازه ولتاژها را در اثر افزودن خازن می توان در همه شینه های سیستمی که هیچ شینه تنظیم شده ای ندارد و بارهایش با امیدانسیهایشان ارائه می شوند محاسبه کرد.

در اینجا نیز فرض کرده ایم که مقادیر E_g و E_m در سیستم ثابت باقی می ماند. چنانکه در بخش ۸-۸ توضیح دادیم، این فرض کاملاً درست نیست اما تخمین خوبی از افزایش ولتاژ شینه را بر اثر افزودن خازن، جز در شینه هایی که ولتاژشان ثابت نگه داشته می شود، به دست می دهد. اگر خازنهای به شینه باری دور از ژنراتورها افزوده شوند، تخمین صورت گرفته برای شینه های مجاور کاملاً خوب است.

بیرون نوشت بخش بار کامپیوتری شکل ۸-۲، ولتاژ شینه ۴ را ۰.۹۲۰ pu نشان می دهد. همین برنامه بخش بار را می توان برای تعیین مقدار توانی واکنشی به کار برد که باید خازنهای در این شینه تأمین کنند تا ولتاژ شینه به هر مقدار مشخص شده افزایش یابد. روش این کار این است که شینه ۴ به عنوان تنظیم شده ای انتخاب شود که باید در ولتاژی مشخص شده باقی بماند و به مولدی وصل شود که تنها توان واکنشی فراهم می کند. چنین ژنراتوری اگر از اتلافهایش صرف نظر شود معادل است با موتور سنکرون بی اتلاف، بی بار، و پرتحرکی که به نام خازن سنکرون شناخته می شود. مقدار توان واکنشی لازمی را که ممکن است خازنهای ایستا یا خازن سنکرون برای سیستم فراهم آورند کامپیوتر تعیین می کنند.

زمانی که ولتاژ شینه ۴ به میزان ۰.۹۵۰ pu مشخص شود، توان واکنشی لازم ۱۵.۳ kvar به دست می آید. این توان واکنشی ورودی به شینه ۴، ولتاژ شینه ۵ را نیز از ۰.۹۶۸ به ۰.۹۷۶ در یک افزایش می دهد. در شینه ۲ که تنها شینه تنظیم نشده دیگر است



شکل ۸-۹ جریان P و Q در شینه ۴ مثال ۸-۱ (الف) آن طور که در بررسی بخش بار ابتدایی به دست آمد و (ب) با افزودن خازنهایی به شینه برای بالابردن ولتاژ تا ۰.۹۵۰ pu.

ولتاژ تغییر نمی‌کند زیرا شینه‌های تنظیم شده ۳۰۱، آن را از شینه ۴ جدا می‌کنند. گذر توان حقیقی و واکنشی را که کامپیوتر تعیین کرده، در خطوط متصل به شینه ۴ با افزودن خازن و یا بی‌بی‌آن، شکل ۸-۹ نشان می‌دهد. افت ولتاژ در خط‌های اتصال شینه‌های ۳ و ۵ به شینه ۴، با تغذیه توان واکنشی به شینه ۴ کاهش می‌یابد زیرا توان واکنشی گذرنده از این خطوط کاهش می‌یابد. افزایش ولتاژ در شینه ۴ که در اثر بستن خازن‌ها به این شینه پدید می‌آید باعث می‌شود که توانی واکنشی که از طریق دو خط انتقال به شینه ۴ می‌رسد بین دو خط به نسبتی تقسیم شود که افت ولتاژ مورد نظر در هر خط حاصل شود.

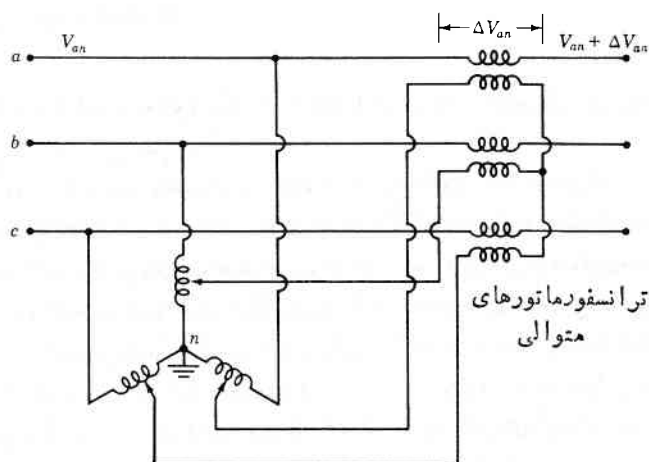
۸-۱۰ کنترل به وسیله ترانسفورماتورها

ترانسفورماتور وسیله دیگری برای کنترل گذر توان چه حقیقی و چه واکنشی است. برداشت معمول از کار برد ترانسفورماتور در سیستم قدرت، تغییر دادن سطح ولتاژ است، مثل زمانی که ترانسفورماتور، ولتاژ ژنراتوری را به ولتاژ خط انتقال تبدیل می‌کند. لیکن، ترانسفورماتورهایی که مقدار ولتاژ را به میزان اندکی، معمولاً در محدوده $\pm 10\%$ تنظیم می‌کنند یا آنهایی که زاویه فاز ولتاژ خط را تغییر می‌دهند اجزای مهمی از سیستم قدرت اند. بعضی ترانسفورماتورها هم اندازه و هم زاویه فاز ولتاژ را تنظیم می‌کنند.

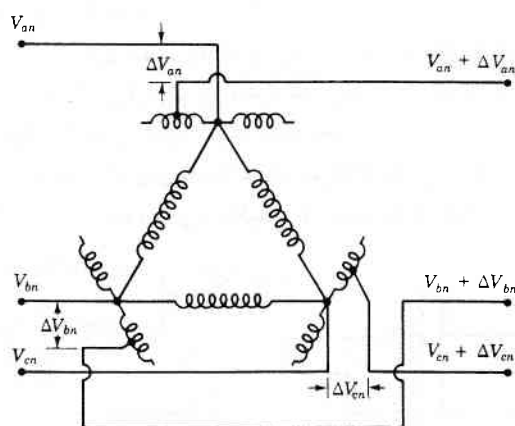
تقریباً همه ترانسفورماتورها سرکهای بر روی سیم پیچ‌هاشان دارند. تعویض سرکها نسبت تبدیل را در زمانی که ترانسفورماتور به برق متصل نیست تنظیم می‌کند. تعویض سرکها زمانی که ترانسفورماتور به برق وصل است نیز امکان دارد و چنین ترانسفورماتوری را ترانسفورماتور با سرکهای تعویض شونده دد زپس بار (LTC یا TCUL) می‌نامند. تعویض سرکها خودکار است و به وسیله موتورهای انجام می‌شود که فرمانشان را از رله‌هایی می‌گیرند که برای نگهداشتن ولتاژ در حد تعیین شده تنظیم شده‌اند. امکان تعویض سرکها بدون قطع شدن جریان را مدارهای ویژه‌ای فراهم می‌کنند.

ترانسفورماتوری که به جای تغییر دادن سطح ولتاژ برای تغییر دادن اندک ولتاژ طراحی شده است ترانسفورماتور تنظیم نامیده می‌شود. شکل ۸-۱۰، یک ترانسفورماتور تنظیم را برای کنترل اندازه ولتاژ و شکل ۸-۱۱، یک ترانسفورماتور تنظیم را برای کنترل زاویه فاز نشان می‌دهد. نمودار فاز برداری شکل ۸-۱۲ به تشریح تغییر زاویه فاز کمک می‌کند. هر یک از سه سیم پیچ سرکدار بر روی هسته مغناطیسی سیم پیچ فازی قرار دارد که ولتاژش نسبت به ولتاژ بین نقطه خنثی و نقطه میانی سیم پیچ سرکدار، 90° اختلاف فاز دارد. برای مثال، ولتاژ نسبت به نقطه خنثای V_{an} ، به اندازه مؤلفه ΔV_{an} که با V_{bc} هم‌فاز است یا 180° با آن اختلاف فاز دارد افزایش می‌یابد. شکل ۸-۱۲ نشان می‌دهد که چگونه سه ولتاژ خط با تنها تغییر کوچکی در اندازه‌هایشان تغییر فاز یافته‌اند.

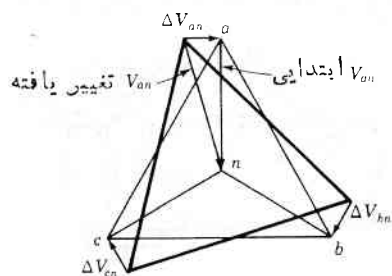
روش کار تعیین Y_{bus} و Z_{bus} در سیستم در-یکی برای هر شبکه شامل ترانسفورماتور تنظیم، همان روشی است که در مورد هر ترانسفورماتوری که نسبت تبدیانش با نسبت ولتاژهای



شکل ۸-۱۰ ترانسفورما تور تنظیم برای کنترل اندازه ولتاژ.



شکل ۸-۱۱ ترانسفورما تور تنظیم برای کنترل زاویه فاز. سیم پیچیهایی که موازی هم رسم شده اند بر روی هسته آهنی واحدی قرار دارند.



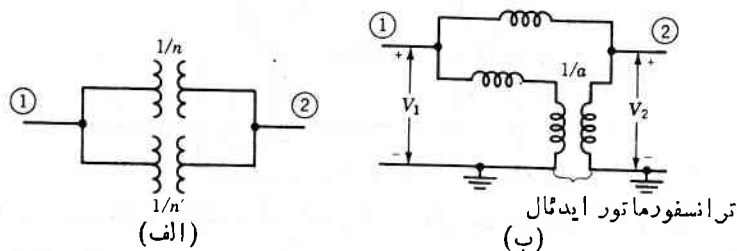
شکل ۸-۱۲ نمودار فازبرداری برای ترانسفورما تور تنظیم شکل ۸-۱۱.

مبنا در دو طرف ترانسفورماتور متفاوت باشد به کار می رود. چنین ترانسفورماتوری را با نسبت تبدیل ورای نامی گویند.

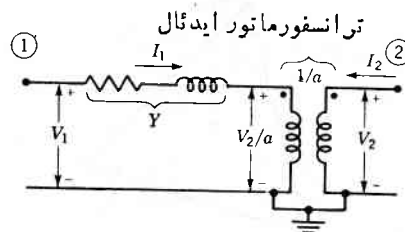
اگر دو شینه داشته باشیم که بایک ترانسفورماتور بهم وصل شده باشند و نسبت ولتاژهای خط به خط ترانسفورماتور همان نسبت ولتاژهای مبنای دوشینه باشد، مدار معادل (با صرف نظر کردن از جریان مغناطنده)، صرفاً امپدانس در-یکی ترانسفورماتور وصل بین شینه ها با مبنای انتخاب شده است. شکل ۸-۱۳ (الف)، نمودار تک خطی دو ترانسفورماتور موازی است. فرض می کنیم که نسبت ولتاژ یکی از آنها $1/n$ ، همان نسبت ولتاژهای مبنا در دو طرف ترانسفورماتور است و نسبت ولتاژ دیگری $1/n'$ است. در این صورت مدار معادل، مطابق شکل ۸-۱۳ (ب) می شود و باید ترانسفورماتوری ایدئال (بدون امپدانس) با نسبت $1/a$ به نمودار رکتانسه های در-یکی بیفزاییم تا نسبت تبدیل ورای نامی ترانسفورماتور دوم را به حساب آورد زیرا ولتاژهای مبنا براساس نسبت تبدیل ترانسفورماتور اول تعیین شده اند.

اگر یک ترانسفورماتور تنظیم داشته باشیم (ونه يك LTC که علاوه بر تغییر سطح ولتاژ امکان تعویض سرك را نیز فراهم می کند)، شکل ۸-۱۳ (ب) را می توان دو خط انتقال موازی که یکی از آنها ترانسفورماتور تنظیم دارد تعبیر کرد.

ظاهراً مسئله ما به دست آوردن ادمیتانسهای گره های شکل ۸-۱۴ است، که يك LTC با نسبت تبدیل $1/n'$ یا ترانسفورماتور تنظیمی با نسبت تبدیل $1/a$ را با جزئیات بیشتر



شکل ۸-۱۳ ترانسفورماتورهای موازی با نسبتهای تبدیل متفاوت. (الف) نمودار تک خطی؛ (ب) نمودار رکتانسه ها بر حسب در-یکی. نسبت تبدیل $1/a$ برابر است با n/n' .



شکل ۸-۱۴ نمودار تفصیلی رکتانسه های در-یکی برای ترانسفورماتور شکل ۸-۱۳ (ب) که نسبت تبدیلیش $1/a$ است.

نمایش می‌دهد. ادمیتانس Y در این شکل، عکس امیدانس در یکی ترانسفورماتور است. چون ادمیتانس Y در طرف گره ۱ ترانسفورماتور نشان داده شده است، طرف سرک-تعویض شونده (یا طرف مربوط به n')، آن است که به گره ۲ متصل است. این انتخاب در هنگام به کار بردن معادله‌هایی که قرار است به دست آوریم اهمیت دارد. اگر ترانسفورماتور را با نسبت تبدیل و رای نامی در نظر بگیریم، a مساوی n'/n است. اگر ترانسفورماتور تنظیم داشته باشیم، a ممکن است حقیقی یا موهومی باشد، مثل ۱۰۰۲ به ازای ۲% افزایش در اندازه و لثاژ یا $j\pi/۶۰$ به ازای ۳ درجه تغییر برفاز.

در شکل ۸-۱۴ جریانهای I_1 و I_2 از دو گره می‌آیند و ولتاژهای V_1 و V_2 نسبت به گره مرجع سنجیده می‌شوند عبارت مختلط توان ورودی به ترانسفورماتور ایدئال از گره‌های ۱ و ۲ به ترتیب عبارت است از

$$S_1 = \frac{V_1}{a} I_1^* \quad (۳۲-۸)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* \quad (۳۳-۸)$$

چون فرض کرده‌ایم که ترانسفورماتور، ایدئال و بی اتلاف است باید توانی که از گره (۱) به ترانسفورماتور می‌آید برابر باشد با توانی که از ترانسفورماتور به گره (۲) می‌رود. و بنابراین

$$\frac{V_2}{a} I_1^* = -V_2 I_2^* \quad (۳۴-۸)$$

و

$$I_1 = -a^* I_2 \quad (۳۵-۸)$$

جریان I_1 را می‌توان به صورت زیر بیان کرد

$$I_1 = \left(V_1 - \frac{V_2}{a} \right) Y \quad (۳۶-۸)$$

یا اینکه

$$I_1 = V_1 Y - V_2 \frac{Y}{a} \quad (۳۷-۸)$$

گذاردن $-a^* I_2$ به جای I_1 و حل معادله برای تعیین I_2 نتیجه می‌دهد

$$I_2 = -V_1 \frac{Y}{a^*} + V_2 \frac{Y}{aa^*} \quad (۳۸-۸)$$

باتوجه به اینکه $aa^* = |a|^2$ از مقایسه معادله‌های (۳۷-۸) و (۳۸-۸)، ادمیتانسهای گره‌ها به شرح زیر به دست می‌آیند

$$\begin{aligned}
 Y_{11} &= Y & Y_{22} &= \frac{Y}{|a|^2} \\
 Y_{12} &= -\frac{Y}{a} & Y_{21} &= -\frac{Y}{a^*}
 \end{aligned}
 \quad (39-8)$$

تنها در صورتی که a حقیقی باشد، و در نتیجه $Y_{12} = Y_{21}$ می توان مقدار π معادل این ادمیتانسهای گرهها را به دست آورد. اگر ترانسفورماتور، تغییر دهنده اندازه ولتاژ باشد و نه تغییر دهنده فاز، مقدار معادل مطابق شکل ۸-۱۵ خواهد بود. این مدار، اگر Y ، مؤلفه ای حقیقی داشته باشد نمی تواند واقعیت بیابد زیرا نیاز به مقاومتی منفی پیدا می کند. لیکن، عامل مهم این است که اکنون می توانیم ترانسفورماتورهای تغییر دهنده اندازه ولتاژ، و فاز را با نسبت تبدیل و رای نامی در محاسبات لازم برای به دست آوردن Y_{bus} و Z_{bus} به حساب آوریم.

مثال ۳-۸ دو ترانسفورماتور با اتصال موازی، امپدانسی نسبت به خنثی در هر فاز را که معادل $0.8 + j0.6 \text{ pu}$ است با ولتاژ 100 pu تغذیه می کنند. ترانسفورماتور T_6 که نسبت ولتاژی معادل نسبت ولتاژهای مبنای دو طرف ترانسفورماتور دارد دارای امپدانسی معادل 0.1 pu با مبنای مناسب است. ترانسفورماتور دوم T_6 در سمت بار به میزان 1.05 برابر T_6 ولتاژ را افزایش می دهد (سیم پیچهای ثانویه اش بر روی سرب 1.05 قرار دارند)، و امپدانش با مبنای مدار واقع در طرف فشار ضعیفش 0.1 pu است. شکل ۸-۱۶، مدار معادلی را نشان می دهد که در آن ترانسفورماتور T_6 با امپدانش ویک ترانسفورماتور ایدئال ارائه شده است. توان مختلطی را که از طریق هر ترانسفورماتور به بار نقل می شود به دست آورید.

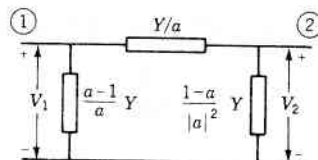
حلی:

$$I_2 = -\frac{100}{0.8 + j0.6} = -0.8 + j0.6$$

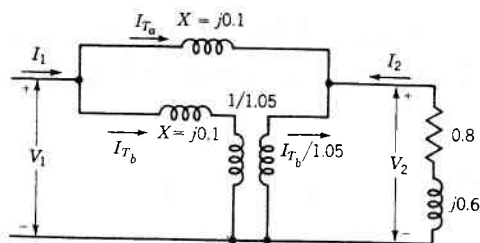
$$a = 1.05$$

برای تعیین جریان در هر ترانسفورماتور باید V_1 را از معادله زیر به دست آوریم

$$I_2 = V_1 Y_{21} + V_2 Y_{22}$$



شکل ۸-۱۵ مدار شامل ادمیتانسهای گرههای معادله (۳۹-۸) در صورتی که a حقیقی باشد.



شکل ۸-۱۶ مدار مثال ۸-۳. مقادیر بر حسب در-یک.

که در آن ادmittانسهای گره‌ها ادmittانسهای مربوط به ترکیب موازی دو ترانسفورماتورند.
برای ترانسفورماتور T_a به تنهایی

$$Y_{\tau 1} = -\frac{1}{j0.1} = j10$$

$$Y_{\tau 2} = \frac{1}{j0.1} = -j10$$

و برای ترانسفورماتور T_b به تنهایی

$$Y_{\tau 1} = -\frac{1/j0.1}{1.05} = j9.52$$

$$Y_{\tau 2} = \frac{1/j0.1}{|1.05|^2} = -j9.07$$

برای دو ترانسفورماتور موازی

$$Y_{\tau 1} = j10 + j9.52 = j19.52$$

$$Y_{\tau 2} = -j10 - j9.07 = -j19.07$$

سپس، از روی معادله گره برای I_T

$$-0.08 + j0.06 = V_1(j19.52) - j19.07 \times 1.0$$

$$V_1 = 1.0008 + j0.0041$$

$$V_1 - V_2 = 0.0008 + j0.0041$$

در نتیجه،

$$I_{Ta} = (V_1 - V_2)(-j10) = 0.041 - j0.008$$

مطابق معادله (۸-۳۵)، جریان ورودی به شینه ۲ از ترانسفورماتور T_b عبارت است از I_{Tb}/a^* و از روی شکل ۸-۱۶، این جریان عبارت است از $-(I_{Ta} + I_\gamma)$ ، که نتیجه می‌دهد

$$\frac{I_{Tb}}{a^*} = -I_\gamma - I_{Ta} = 0.08 - j0.06 - (0.041 - j0.08) = 0.039 - j0.02$$

توانهای مختلط عبارت انداز

$$S_{Ta} = V_\gamma I_{Ta}^* = 0.041 + j0.08 \text{ در-يك}$$

$$\square \quad S_{Tb} = V_\gamma \left(\frac{I_{Tb}}{a^*} \right)^* = 0.039 + j0.02 \text{ در-يك}$$

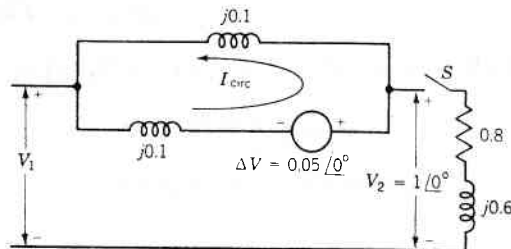
شکل ۸-۱۷ که با بستن کلید S ، مدار معادلی برای مسئله است اگر ولتاژ ΔV_{pu} در شاخهٔ مدار معادل ترانسفورماتور T_b ، برابر $1 - a$ باشد نیز می‌تواند راه حلی تقریبی برای مسئله به دست بدهد. به عبارت دیگر اگر در T_a ، نسبت ولتاژها ۵٪ بیشتر از T_b باشد a برابر است با ۱.۰۵ و ΔV برابر است با ۰.۰۵ در-يك. هرگاه بتوان گفت که جریان پدید آمده از ΔV ، وقتی کلید S باز است در حلقه‌ای که با I_{circ} نشان داده شده گردش می‌کند و قسمتی کلید S بسته است وارد امپدانس بار که از امپدانس ترانسفورماتور بسیار بزرگتر است نمی‌شود می‌توان اصل جمع آثار را به کار برد. بنابراین

$$I_{circ} = \frac{0.05}{j0.2} = -j0.25 \text{ در-يك}$$

وقتی ΔV اتصال کوتاه شود جریان در هر مسیر نصف جریان بار، یا $0.03 - j0.04$ ، است. لذا، با در نظر گرفتن جریان گردشی می‌توان نوشت

$$I_{Ta} = 0.04 - j0.03 - (-j0.25) = 0.04 - j0.08$$

$$I_{Tb} = 0.04 - j0.03 + (-j0.25) = 0.04 - j0.28$$



شکل ۸-۱۷ مداری که با بستن کلید S ، معادل مدار شکل ۸-۱۶ است.

به این ترتیب

$$S_{T_a} = 0.40 + j0.05 \text{ در-يك}$$

و

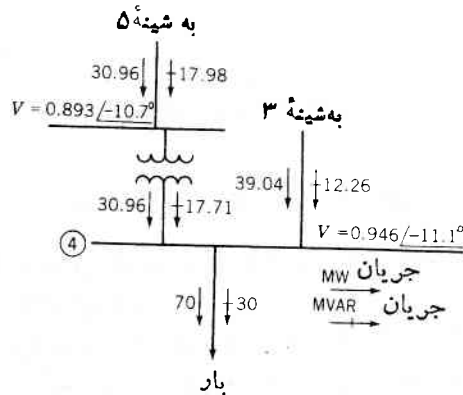
$$S_{T_b} = 0.40 + j0.55 \text{ در-يك}$$

از آنجا که مقادیر بالا با وجود تقریبی بودن به مقادیر قبلی بسیار نزدیک‌اند این روش به دلیل سادگی غالباً به کار می‌رود.

این مثال نشان می‌دهد که ترانسفورماتوری که تنظیم سرك بالاتری دارد بیشتر توان واکنشی بار را تأمین می‌کند. توان حقیقی به تساوی بین ترانسفورماتورها تقسیم می‌شود. چون ترانسفورماتورها هر دو يك امیدانس دارند، اگر نسبت تبدیل یکسانی هم داشتند توان حقیقی و واکنشی را به تساوی بین خود تقسیم می‌کردند. در آن صورت، هر دو با رثکنانس در-يكي ۱۰۵۰ بین دو شینه ارائه می‌شدند و جریان یکسانی را نیز عبور می‌دادند. پس زمانی که دو ترانسفورماتور با هم موازی‌اند، می‌توان با تنظیم نسبت اندازه ولتاژها توزیع توان واکنشی بین ترانسفورماتورها را تغییر داد و زمانی که دو ترانسفورماتور موازی با كيلو ولت آمپرهای یکسان به علت نابرابری امیدانسهایشان كيلو ولت آمپر را یکسان بین خود تقسیم نمی‌کنند، با تنظیم نسبت اندازه ولتاژها از طریق تعویض سركها می‌توان كيلو ولت آمپرهای آنان را تقریباً با هم برابر کرد.

اگر خط انتقال خاصی توانی واکنشی بیش از اندازه یا کمتر از اندازه می‌کشد، می‌توان ترانسفورماتور تنظیمی برای تنظیم اندازه ولتاژ در يك سر خط کار گذاشت تا انتقال توان واکنشی را کمتر و یا بیشتر کند. این مطلب را می‌توان با در نظر گرفتن تعویض خودکار سركها در برنامه بخش بار بر روی کامپیوتر رقمی بررسی کرد. برای مثال، در مثال ۸-۱ می‌توانیم با وارد کردن يك ترانسفورماتور تنظیم اندازه ولتاژ در خط از شینه ۵ به شینه ۴ در محل شینه ۴، به طوری که کامپیوتر این ترانسفورماتور را يك LTC با تنظیم سرك برای نگهداشتن ولتاژ شینه در حدود ۹۵۰ pu در نظر بگیرد، ولتاژ شینه ۴ را افزایش داد. چون بین هر دو تنظیم سرك متوالی اختلاف معینی وجود دارد، ولتاژ لزوماً درست ۹۵۰ pu نخواهد شد. نتایج به دست آمده در شینه ۴ بر روی نمودار تك خطی شکل ۸-۱۸ نشان داده شده است. رثکنانس در-يكي LTC، برابر ۰.۰۸ دره فرض شده است.

زمانی که ولتاژ شینه ۴ به كمك LTC در خط ۴-۵ افزایش می‌یابد، افت ولتاژ در طول خط ۳-۴ باید کمتر باشد و انتظار می‌رود که این با کاهش گذر توان واکنشی از خط با تنها اندکی تغییر در توان حقیقی به وقوع بپیوندد. مقایسه شکل ۸-۱۸ با شکل ۸-۹ (الف) نشان می‌دهد که Q گذرنده به شینه ۴ از طریق خط ۳-۴ بدون تغییر چندانی در P از ۱۸۹۰ به ۱۲۲۴ مگاوار کاهش یافته است. اکنون، برای تأمین ۳۰ Mvar مورد نیاز بار، ۱۷۷۱ Mvar از طریق خطی که از شینه ۵ و LTC می‌آید به شینه ۴ می‌گذرد. مگاوار افزایش یافته خط باعث می‌شود که ولتاژ در طرف فشار ضعیف LTC بسیار پایین



شکل ۸-۱۸ گذر P و Q در شینه ۴ سیستم شکل ۸-۱ زمانی که ترانسفورماتور تنظیمی در خط ۴-۵ در محل شینه ۴ اندازه V_4 را به 946 pu افزایش دهد.

باشد، اما ترانسفورماتور با انتخاب تنظیم سرک مناسب این ولتاژ را در شینه ۴ به 946 pu افزایش می‌دهد.

ولتاژ شینه ۵ از مقدار نخستین 968 pu به 962 pu کاهش یافت. به عنوان مقایسه، در بخش ۸-۹ دیدیم که ولتاژ شینه ۵، زمانی که خازنهای به شینه ۴ افزوده شد، به 976 pu افزایش یافت. دلیل کاهش در ولتاژ شینه ۵ در مورد فعلی این است که توان واکنشی اضافه‌ای که از شینه ۵ به شینه ۴ آمده توان واکنشی را که می‌بایست از شینه‌های با تنظیم ولتاژ ۱ و ۳ به شینه ۵ برود افزوده است.

برای تعیین تأثیر ترانسفورماتورهای تغییر فاز کافی است تنها در معادله (۸-۳۹)، a را کمیتی مختلط با قدر مطلق یک فرض کنیم.

مثال ۸-۴ مثال ۸-۳ را تکرار کنید جز اینکه T_b شامل ترانسفورماتوری با نسبت تبدیل برابر با T_a و ترانسفورماتور تنظیمی با تغییر فاز $(\frac{\pi}{3})$ است. $(a = e^{j\pi/6} = 1 \angle 30^\circ)$ است. امپدانس هر دو جزء تشکیل دهنده T_b بامبتای T_a برابر 10 pu است. حل: برای ترانسفورماتور T_a به تنهایی، مانند مثال ۸-۳

$$Y_{21} = j10 \quad Y_{22} = -j10$$

و برای ترانسفورماتور T_b

$$Y_{21} = \frac{j10}{a} = 10 \angle 93^\circ$$

$$Y_{22} = \frac{-j10}{|1 \angle 30^\circ|^2} = -j10$$

ترکیب موازی دو ترانسفورماتور نتیجه می‌دهد

$$Y_{Y1} = 10 \angle 90^\circ + 10 \angle 93^\circ = -0.523 + j2.00$$

$$Y_{Y2} = -j10 - j10 = -j20$$

با دنبال کردن روش کار مثال ۸-۳، داریم

$$-0.08 + j0.06 = V_1(-0.523 + j2.00) + (-j20)(1.00)$$

$$V_1 = \frac{-0.08 + j2.006}{-0.523 + j2.00} = \frac{0.418 - j1.077 + j1.600 + 41.20}{4.00}$$

$$= 10.3 + j0.013$$

$$V_1 - V_2 = 0.03 + j0.013$$

$$I_{Ta} = (0.03 + j0.013)(-j10) = 0.13 - j0.30$$

$$\frac{I_{Tb}}{a^*} = 0.08 - j0.06 - (0.13 - j0.30) = 0.067 - j0.30$$

$$S_{Ta} = 0.13 + j0.30 \text{ در-يك}$$

$$S_{Tb} = 0.067 + j0.30 \text{ در-يك}$$

مانند مثال ۸-۳، می‌توانیم راه حلی تقریبی برای مسئله با وارد کردن منبع ولتاژ ΔV متوالی با امپدانس ترانسفورماتور T_b به دست آوریم. ولتاژ در-یکی مناسب عبارت است از

$$a-1 = 10 \angle 3^\circ - 10 \angle 0^\circ = (2 \sin 1.5^\circ) \angle 91.5^\circ = 0.0524 \angle 91.5^\circ$$

$$I_{\text{circ}} = \frac{0.0524 \angle 91.5^\circ}{0.2 \angle 90^\circ} = 0.262 + j0.0069$$

$$I_{Ta} = 0.04 - j0.03 - (0.262 + j0.007) = 0.138 - j0.307$$

$$I_{Tb} = 0.04 - j0.03 + (0.262 + j0.007) = 0.0662 - j0.293$$

بنابراین

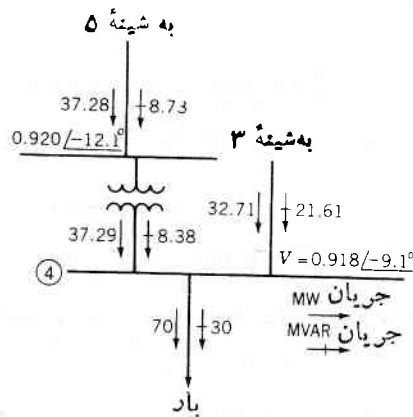
$$S_{Ta} = 0.138 + j0.307 \text{ در-يك}$$

$$S_{Tb} = 0.0662 + j0.293 \text{ در-يك}$$

□

در اینجا نیز مقادیر تقریبی به مقادیر قبلی به دست آمده نزدیک اند.

این مثال نشان می‌دهد که ترانسفورماتور فاز گردان برای کنترل گذر توان حقیقی



شکل ۸-۱۹ گذر P و Q از شینۀ ۴ در سیستم شکل ۸-۱، هنگامی که یک ترانسفورماتور تنظیم گر در خط ۴-۵ از شینۀ ۴ باعث 3° تغییر فاز بین سرهایش می شود.

مفید است اما تأثیر کمتری برگذر توان واکنشی دارد. هر دو مثال ۸-۳ و ۸-۴، دو خط انتقال موازی با هم را با ترانسفورماتور تنظیمی در یکی از خطها به نمایش می گذارند. برای مثال، معادله های (۸-۳۹) در مورد خط انتقالی صادق اند که در یک سر خود، ترانسفورماتور تنظیم یا ترانسفورماتور با نسبت تبدیل ورای نامی دارند، و ادmittانس موازی و امپدانس ترانسفورماتور نادیده گرفته شده یا اینکه در امپدانس متوالی خط گنجانده شده است. در آن صورت، Y در معادله های (۸-۳۹) عبارت از عکس امپدانس متوالی خط بر حسب دریک است. در بررسی کامپیوتری پخش بار، ترانسفورماتور واقع در یک سر خط را می توان با افزودن یک شینه به طوری که ترانسفورماتور از هر دو طرف مستقیماً به دو شینه متصل باشد به حساب آورد.

شکل ۸-۱۹، گذر توان حقیقی و واکنشی و ولتاژ شینۀ ۴ سیستم مثال ۸-۱ را زمانی که یک ترانسفورماتور فازگردان بر روی خط ۴-۵ در محل شینۀ ۴ نصب شود نشان می دهد. داده های ورودی به کامپیوتر مشخص می کنند که ترانسفورماتور، فاز را 3° تغییر می دهد. حاصل، عبارت از نقل توان حقیقی از خط ۳-۴ به خط ۵-۴ است، که با توجه به بحث ترانسفورماتورها یا خطوط انتقال موازی باهم نیز انتظارش می رفت. در این حالت، دو خط مقایسه شونده باهم موازی نیستند و تغییر قابل توجهی (در حدود نصف میزان تغییر در P) در توان واکنشی در خطوط منتهی به شینۀ ۴ وجود دارد. این تغییر در Q ، اگرچه از مقاومت چشم پوشی نکرده ایم، با معادله (۸-۲۹) مطابقت دارد و با کاهش δ بین شینه های ۳ و ۴ که Q را در طول آن خط افزایش می دهد توصیه می شود.

۸-۱۱ خلاصه

این فصل علاوه بر بحث درباره چگونگی انجام دادن بررسیهای کامپیوتری پخش بار،

بعضی روشهای کنترل ولتاژ و گذر توان را از نظر درک اینکه این کنترل چگونه انجام می‌شود ارائه داده‌است. بررسی کامپیوتری بخش بار بهترین راه برای دستیابی به پاسخهای کمی به تأثیر عملیات کنترل خاص است.

بررسی تأثیر تحریک ژنراتور سنکرون متصل به شینه‌ای با ولتاژ ثابت که در فصل ۶ از آن بحث شد به ژنراتوری تعمیم داده شده است که سیستمی را که با معادل توننش ارائه شده است تغذیه می‌کند.

از به کار بردن خازن در محل بار دریافتیم که توان واکنشی ناشی از خازن باعث افزایش ولتاژ در محل بار می‌شود. چون افزایش تحریک ژنراتور سنکرون، توان واکنشی به سیستم می‌دهد این امر به منزله افزودن خازن است و باعث افزایش ولتاژ شینه ژنراتور می‌شود مگر اینکه سیستم بسیار بزرگ باشد.

چون اندازه ولتاژ و میزان توان حقیقی تحویلی ژنراتور معمولاً برای بررسی بخش بار داده می‌شوند، دیدیم که چگونه تحریک ژنراتور باید تغییر کند تا ولتاژ مشخص شده شینه به ازای P ثابت از ژنراتور تأمین شود. وبالاخره، روابطی برای P و Q خروجی ژنراتور بر حسب $|V|$ ، $|E_f|$ و زاویه توان δ به دست آوردیم تا وابستگی توان حقیقی به δ را نشان دهیم.

نتایج موازی کردن دو ترانسفورماتور را هنگامی که نسبت اندازه‌های ولتاژ آنها متفاوت باشد یا هنگامی که یکی از آنها فاز را تغییر دهد بررسی کردیم. معادله‌های (۳۹-۸)، معادله‌های لازم برای ادمیتانسهای گره‌های مدار معادل چنین ترانسفورماتورهایی را به دست می‌دهد. مثالهای ارائه شده نشان دادند که ترانسفورماتورهای LTC کنترل کننده اندازه ولتاژ و ترانسفورماتورهای تنظیم از نوع تغییر دهنده اندازه و فاز می‌توانند گذر توان حقیقی و واکنشی را در خطهای انتقال کنترل کنند.

مسائل

۱-۸ مقدار $\Delta P_f^{(0)}$ را در ادامه مثال ۱-۸ حساب کنید.

۲-۸ در ادامه مثال ۱-۸، مقدار عنصر $(\partial P_f / \partial \delta_f)$ ستون سوم و سطر دوم ژاکوبین را برای بساورد اول تعیین کنید.

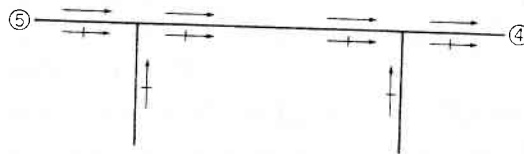
۳-۸ عنصر واقع در ستون سوم و سطر سوم ژاکوبین مثال ۱-۸ را برای بساورد اول حساب کنید.

۴-۸ عنصر واقع در ستون ششم و سطر سوم ژاکوبین مثال ۱-۸ را برای بساورد اول حساب کنید.

۵-۸ به کمک اطلاعات حاصل از بیرون نگاشت بخش بار در شکل ۲-۸، نموداری شبیه

شکل ۸-۳ برای شینه ۳ سیستم مثال ۸-۱ رسم کنید. اختلاف ظاهری بین مگاوات و مگاوار ورودی و خروجی این شینه چقدر است؟

۸-۶ شکل ۸-۲ را دوباره رسم کنید و بر روی آن مقادیر زیر را ذکر کنید: (الف) P و Q تحویلی از شینه ۵ به خط ۴-۵، (ب) Q ناشی از خازن ثابت π نامی خط ۴-۵ در محل شینه ۵ (باید دانست که این مقدار Q با $|V_5|^2$ تغییر می کند). (ج) P و Q در دو سر بخش متوالی π نامی خط. (د) Q ناشی از خازن ثابت π نامی خط ۴-۵ در محل شینه ۴. (ه) P و Q در روی از خط ۴-۵ به شینه ۴.



شکل ۸-۲ نمودار مسئله ۸-۶.

۸-۷ به عنوان بخشی از پاسخ بخش بار مثال ۸-۱، کامپیوتر، کسل اتلاف خط را 7 MW و 9 داده است. چگونه این مقدار با مجموع اتلافهایی که از صورت نتایج بخش بار برای تک تک خطها به دست می آید مقایسه می شود؟

۸-۸ تأثیر تحریک را که در بخش ۴-۶ شرح دادیم اکنون می توان محاسبه کرد. ژنراتوری را با رثکتانس سنکرون $p u$ ۱۰، وصل به سیستم بزرگی در نظر بگیرید. از مقاومت می توان صرف نظر کرد. اگر ولتاژ شینه $p u$ 90° باشد و ژنراتور، جریان $p u$ ۱۰ را با ضریب توان پس افتی ۰٫۸ به شینه بدهد، اندازه و زاویه ولتاژ بی باری E_g ژنراتور و P و Q داده شده به شینه را به دست آورید. سپس زاویه δ بین E_g و ولتاژ شینه، جریان I_g ، و Q داده شده به شینه از ژنراتور را به دست آورید. اگر توان خروجی ژنراتور ثابت بماند اما تحریک ژنراتور (الف) برای ۱۵٪ کمتر شدن $|E_g|$ ، کاهش یابد و (ب) برای ۱۵٪ زیادتر شدن $|E_g|$ ، افزایش یابد. درصد تغییر در Q بر اثر کاهش و افزایش $|E_g|$ چقدر است؟ آیا نتایج این مسئله با نتیجه گیرهای حاصل در بخش ۴-۶ مطابقت دارد؟

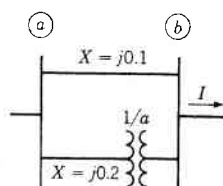
۸-۹ سیستم قدرتی را که قرار است ژنراتوری به شینه معینی از آن وصل شود می توان با ولتاژ تون $E_{th} = 90^\circ$ متوالی با $p u$ 90° $Z_{th} = 25$ نمایش داد. E_g ژنراتور زمانی که به سیستم وصل می شود $p u$ 30° ۱۴ است. رثکتانس سنکرون ژنراتور بامبنای سیستم، $p u$ ۱۰ است. (الف) ولتاژ شینه، V_t ، و P و Q نقل شده به سیستم در این شینه را به دست آورید؛ (ب) اگر قرار باشد ولتاژ شینه به ازای همان توان P نقل شده به سیستم به $p u$ ۱۰ $|V_t|$ افزایش یابد، مقدار E_g لازم و مقدار Q

نقل شده به سیستم در این شینه را به دست آورید. فرض کنید همهٔ دیگر-مجرکه‌های الکتریکی سیستم از نظر اندازه و زاویه تغییر نمی‌کنند یعنی Z_{th} و E_{th} ثابت‌اند.

۸-۱۰ در مسئلهٔ ۷-۱۰، ولتاژهای سه شینه را قبل و بعد از وصل کردن خازن بین نقطهٔ خنثی و شینهٔ ۳ محاسبه کردیم. P و Q ورودی به یا خروجی از شینهٔ ۳ را از طریق خطوط انتقال، از طریق رئکتانس متصل بین شینه و نقطهٔ خنثی، و از طریق خازن قبل و بعد از نصب خازن تعیین کنید. فرض کنید ولتاژهای تولیدی از لحاظ اندازه و زاویه ثابت می‌مانند. نمودارهایی شبیه شکل ۸-۹ برای نمایش مقادیر محاسبه شده رسم کنید.

۸-۱۱ شکل ۸-۹ نشان می‌دهد که خازن متصل به شینهٔ ۴ سیستم 50 Hz شکل ۸-۱۱ باید 15.3 Mvar تأمین کند تا ولتاژ شینه به 950 pu افزایش یابد. اگر ولتاژ مبنا 138 kV باشد، ظرفیت خازن هر فاز را اگر خازن‌ها (الف) ستاره‌ای و (ب) مثلثی بسته شده باشند به دست آورید.

۸-۱۲ دو شینهٔ a و b از طریق دوامپدانس موازی باهم $X_1 = 0.1$ و $X_2 = 0.2$ در-یک، به هم وصل شده‌اند. شینهٔ b ، شینهٔ باری است که جریان $I = 100 \angle -30^\circ\text{ pu}$ را به سیستم می‌دهد و ولتاژش، $V_b = 100 \angle 0^\circ\text{ pu}$. معین کنید P و Q ورودی به شینهٔ b را از طریق هر یک از شاخه‌های موازی (الف) در مدار وصف شده بالا، (ب) اگر ترانسفورماتور تنظیمی را از خط دارای رئکتانس بالاتر به شینهٔ b وصل کنیم تا اندازهٔ ولتاژ بار را 3% بیفزاید ($a = 100.3$)، و (ج) اگر ترانسفورماتور تنظیم، فاز را 2° پیش‌افت دهد ($a = 100.3$) برای قسمت‌های (ب) و (ج) روش جریان گردشی را به کار برید و فرض کنید که V_a برای هر قسمت مسئله طوری تنظیم می‌شود که V_b ثابت باقی بماند. شکل ۸-۲۱، نمودار تک خطی است که شینه‌های a و b سیستم را همراه با ترانسفورماتور تنظیم نشان می‌دهد. از امپدانس ترانسفورماتور صرف نظر کنید.



شکل ۸-۲۱ مدار مسئلهٔ ۸-۱۲.

۸-۱۳ دورئکتانس $X_1 = 0.08$ و $X_2 = 0.12$ در-یک، موازی هم، بین دو شینهٔ a و b در یک سیستم قدرت بسته شده‌اند. اگر $V_b = 100 \angle 0^\circ$ و $V_a = 100.5 \angle 10^\circ$ در-یک باشند، نسبت تبدیل ترانسفورماتور تنظیمی را بیابید که باید متوالی با X_2 به شینهٔ b بست تا هیچ ولت آمپر واکنشی از طریق شاخهٔ دارای رئکتانس X_1 ، به شینهٔ b وارد نشود.

روش جریان گردشی را به کار برید، و از رثکنانس ترانسفورماتور تنظیم صرف نظر کنید. P و Q بار و V_b ثابت می مانند.

۸-۱۴ دو ترانسفورماتور، هر يك با ولتاژهای نامی $132/115 \text{ kV}$ ، موازی با هم 35 MVA و 132 kV را با ضریب توان 0.8 پس افتی تغذیه می کنند. اندازه های ترانسفورماتور ۱، 20 MVA و $X = 0.09 \text{ pu}$ و از آن ترانسفورماتور ۲، 15 MVA و $X = 0.07 \text{ pu}$ است. مطلوب است تعیین اندازه جریان گذرنده از هر ترانسفورماتور بر حسب در-يك مگا وولت آمپر خروجی هر ترانسفورماتور، و مگا وولت آمپری که بار کل باید در آن حد محدود باشد تا هیچ کدام از ترانسفورماتورها اضافه بار نشوند. اگر سرکهای ترانسفورماتور يك بر روی 111 kV تنظیم شود تا ولتاژ را 3% در طرف فشار ضعیف آن ترانسفورماتور در مقایسه با ترانسفورماتور ۲، که بر روی 115 kV باقی می ماند افزایش دهد، تعیین کنید مگا وولت آمپر خروجی هر ترانسفورماتور را، به ازای همان بار کل اولیه 35 MVA و حداکثر مگا وولت آمپر بار کلی که ترانسفورماتورها را اضافه بار نکند. از مبنای 35 MVA و 132 kV در طرف فشار ضعیف استفاده کنید. روش جریان گردشی برای این مسئله رضایت بخش است.

۸-۱۵ اگر امپدانس بار بر روی شینه b مدار وصف شده در مسئله ۸-۱۲، معادل $0.5 + j0.866$ و $\angle 50^\circ$ $V_a = 104$ در-يك باشند (ولتاژ V_b و جریان بار، دیگر مشخص نشده اند)، مقدار V_b را در حالت قسمتهای (الف)، (ب) و (ج) مسئله ۸-۱۲ به دست آورید. همچنین P و Q ورودی به شینه b از طریق هر يك از شاخه های موازی را در هر سه حالت به دست آورید. معادله های (۸-۳۹) باید در این مسئله به کار روند، و امپدانس بار را می توان در Y_{pp} معادله های ادمیتانس گره مدار کامل گنجانند.