۱

زمینهٔ عمومی

توسعهٔ منابع انرژی به‌منظور انجام کار مفید، کلید پیشرفت صنعتی و درنتیجه، بهبود سطح زندگی مردم است. برخی از بزرگترین مشکلاتی که جهان امروز با آنها مواجه است عبارت‌اند از: کشف منابع جدید انرژی، یافتن منبع انرژی عملا فناناپذیر برای آینده، رساندن انرژی به‌هرجا که بدان نیاز باشد و تبدیل انرژی از یك شکل به‌شکل دیگر و استفاده از آن بدون ایجاد آلودگیهایی که محیط زیست را تباه می‌سازند. سیستم قدرت الکتریکی یکی از ابزارهای تبدیل و انتقال انرژی است که نقش مهمی در مقابله با این مشکلات بازی می‌کند. صنعت برق براساس برخی معیارها گسترده‌ترین صنعت جهان است. به‌منظور توسعه و کاربرد پیشرفتهای علم در حل مشکلات صنعت برق، به‌مهندسینی ورزیده نیاز است تا قابلیت اطمینان بالایی برای سیستم تضمین کنند و بیشترین دقت را در حفاظت محیط زیست به‌عمل آورند.

(سیستم قدرت الکتریکی، سه قسمت اساسی دارد: نیروگاهها، خطهای انتقال، و سیستمهای توزیع). چگونگی استفاده از انرژی تحویلی به‌شرکتهای بهره‌برداری کننده، از جمله مسئولیتهای شرکتهای تولیدی نیست و در این کتاب از آنها بحث نمی‌شود.[1] خطهای

---

۱. در ایران برخلاف کشورهایی نظیر امریکا، صنعت برق دولتی است و کار شرکتهای بهره‌برداری کننده و شرکتهای تولیدی را به‌ترتیب، شرکتهای برق منطقه‌ای و شرکت توانیر انجام می‌دهند.

انتقال، رابط بین نیروگاهها وسیستمهای توزیع ونیز بین سیستمهای قدرت بهم پیوسته اند. سیستم توزیع تمام بارهای مجزا را از طریق پستها، کـه تبدیل ولتاژ و عملیات کلیدزنی را انجام می‌دهند، به‌خطهای انتقال متصل می‌سازد.

هدف این کتاب، ارائهٔ روشهای تحلیل است ودر آن بیشتر به‌خطهای انتقال وعملکرد سیستم توجه می‌شود و سیستمهای توزیع با هرجنبه‌ای از نیروگاههای قدرت جزمشخصات الکتریکی ژنراتورها، بررسی نخواهد شد.

۱ـ۱ رشد سیستمهای قدرت برق

توسعهٔ سیستمهای ac در ایالات متحده از سال ۱۸۸۵ یعنی از زمـانی آغاز شدکه جرج وستینگهاوس امتیاز استفاده از سیستم انتقال ac را که ل. گالارد و ج. د. گیبس پاریسی طراح آن بودند، خریداری کرد. ویلیام استانلی شرکت قدیمی وستینگهاوس ترانسفورماتورها را در آزمایشگاه خود واقع در گریت بارینگتون[1] ماساچوست آزمایش کرد. استانلی در همان‌شهر و در زمستان ۱۸۸۵ـ۱۸۸۶ اولین سیستم توزیع ac آزمایشی‌را که ۱۵۰ لامپ را در شهر تغذیه می کرد برپا داشت. اولین خط انتقال ac در ایالات متحده به‌سال ۱۸۹۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفت تا انرژی الکتریکی تولیدشده ازقدرت آبی‌را به‌مسافت ۱۳ مایل از ویلامت‌فالز[2] به‌پرتلند[3] واقع در اُرگون[4] ببرد.

اولین خطوط انتقال تکفاز بود و انرژی معمولا فقط مصرف روشنایی داشت. حتی اولین موتورها نیز تکفاز بودند اما در ۱۶ مه سال ۱۸۸۸ نیکلاتسلا مقاله‌ای درتوصیف موتورهای القایی و سنکرون دوفاز ارائه داد. مزایای موتورهای چند فاز به‌سرعت آشکار شد و یك سیستم توزیع ac دوفاز به‌سال ۱۸۹۳ در نمایشگاه کلمبیایی در شیکاگو برای عموم مردم به‌معرض نمایش گذارده شد. ازآن پس به‌تدریج انتقال انرژی الکتریکی بـا جریان متناوب به‌ویژه جریان سه‌فاز جای سیستمهای dc راگرفت. در ژانویهٔ ۱۸۹۴ پنج نیروگاه چند فاز در ایالات‌متحده وجود داشت‌که یکی ازآنها دوفاز و بقیه سه‌فاز بودند. انتقال انرژی الکتریکی در ایالات‌متحده تقریباً به‌کلی با جریان متناوب صورت می گیرد. یکی از علتهای پذیرش سریع سیستمهای ac، وجود ترانسفورماتور بودکه انتقال انرژی الکتریکی را در ولتاژی بالاتر از ولتاژ تولیدی یا مصرفی‌که مزیتش بیشترکردن ظرفیت انتقال است، ممکن می‌سازد.

درسیستم انتقال dc، ژنراتورهـای ac از طـریق ترانسفورمـاتور و یکسوکنندهٔ الکترونیکی‌خط dc را تغذیه می کنند یك موجیگرالکترونیکی جریان مستقیم را درانتهای خط به‌جریان متناوب تبدیل می کند و به این ترتیب می‌توان ولتاژ را بـا ترانسفورماتور کاهش داد. بـا بهره‌گیری از دوعمل یکسوکردن و موج‌دادن در هـرطرف خط، می‌توان

1. Great Barrington 2. Willamette Falls
3. Portland 4. Oregon

قدرت را در هردوجهت انتقال داد. بررسیهای اقتصادی نشان داده است که انتقال با خط هوایی dc در ایالات متحده برای مسافتهای کمتر از ۳۵۰ مایل به‌صرفه نیست. در اروپا که خط انتقال عموماً بسیار طولانی‌تر از امریکاست بهره‌برداری از خطوط انتقال dc در چندین محل به‌کمك تأسیسات زیرزمینی و هوایی انجام می‌شود. درکالیفرنیا یك خط ۵۰۰ کیلوولت ac، مقدار قدرت آبی زیادی را درامتداد ساحل از پاسیفیك نورث‌وست به‌قسمتهای جنوبی کالیفرنیا و در اعماق کشور از راه نوادا با جریان مستقیم در ولتاژ خط به‌خط ۸۰۰ kV، انتقال می‌دهد.

گزارشهای آماری از سال ۱۹۲۰ تا اوایل دههٔ ۱۹۷۰–۱۹۸۰ آهنگ تقریباً ثابتی برای افزایش ظرفیت تولید نصب شده و تولید سالانهٔ انرژی نشان می‌دهد بدین‌معنی که در طی هرده سال به‌نزدیك دوبرابر مقدار قبلی خویش می‌رسد. سپس افزایش، بی‌نظم‌تر و غیرقابل پیش‌بینی و به‌طورکلی کمی کندتر می‌شود.

در روزهای اولیهٔ انتقال قدرت ac در ایالات متحده، ولتاژ کار به‌سرعت افزایش یافت. در سال ۱۸۹۰ خط ویلامت ـ پرتلند با ولتاژ ۳۳۰۰V کار می‌کرد. درسال ۱۹۰۷ خطی با ولتاژ ۱۰۰ kV به‌بهره‌برداری رسید. ولتاژ درسال ۱۹۱۳ به ۱۵۰ kV، درسال ۱۹۲۳ به ۲۲۰ kV، درسال ۱۹۲۶ به ۲۴۴ kV، و درسال ۱۹۳۶ درخطی از سد هوور به‌لوس آنجلس به ۲۸۷ kV رسید. در سال ۱۹۵۳ اولین خط ۳۴۵ kV به‌میدان آمد. درسال ۱۹۶۵ اولین‌خط ۵۰۰ kV به‌بهره‌برداری‌رسید. چهارسال بعد در ۱۹۶۹ اولین خط ۷۶۵ kV برپا شد.

تاسال ۱۹۱۷، سیستمهای الکتریکی معمولا به‌صورت‌واحدهای‌جدا ازهم‌کارمی‌کردند زیرا این واحدها به شکل سیستمهای مجزا کار خود را شروع‌کرده بودند و تنها برای زیرپوشش گرفتن همهٔ کشور، به‌تدریج گسترش یافته بودند. نیاز به‌قدرتهای زیاد و قابلیت اطمینان بیشتر، به‌هم پیوستگی سیستمهای مجاور را مطرح ساخت. به‌هم پیوستگی از نظر اقتصادی به‌صرفه‌است زیرا ماشینهای ذخیرهٔ کمتری برای بار حداکثر (ظرفیت ذخیره‌ای) لازم می‌شود و به ماشینهای بدون بارکمتری برای مقابله با افزایش ناگهانی و غیرمنتظرهٔ بار (ذخیرهٔ چرخشی) احتیاج‌خواهدبود. ازآنجاکه هرشرکت معمولا می‌تواند ازشرکتهای مجاور، قدرت اضافی تقاضا کند کاهش تعداد ماشینها میسر است. به‌هم پیوستگی، همچنین شرایطی را فراهم‌می‌آوردکه هرشرکت از باصرفه‌ترین منابع قدرت استفاده‌کند. بنابراین ممکن است دربعضی فواصل زمانی، برای شرکت، خرید مقداری قدرت از به‌کارگیری تولید شخصی ارزانتر تمام شود. به‌هم پیوستگی تا جایی پیش‌رفته است که امروزه تبادل قدرت بین نواحی مختلف به عنوان مسئله‌ای عادی تلقی می‌شود. به‌هنگام کاهش بی‌رویه و غیرعادی آب، ارائهٔ کار سیستمهایی که قسمت عمده‌ای از تولیدشان متکی به‌قدرت آبی است، فقط به‌کمك جذب قدرت از سیستمهای به‌هم پیوسته امکان دارد.

به‌هم پیوستگی سیستمها مشکلات تازه‌ای به‌دنبال آورد اما اغلب آنها به‌نحو رضایتبخشی حل شده‌اند. به‌هم پیوستگی، جریان ناشی از اتصال کوتاه را در سیستم افزایش می‌دهد و

این نیز به‌نوبهٔ خود نصب مدارشکنهای با قدرت قطع جریان بالاتری را ضروری می‌سازد. اگر رله‌ها و مدارشکنهای مناسب، درمحلهای به‌هم پیوستگی به‌کاربرده نشوند ممکن است اختلال ناشی از اتصال کوتاه در یك سیستم به سیستمهای پیوسته به‌آن نیز سرایت کند. سیستمهای به‌هم پیوسته نه‌تنها باید دارای یك فرکانس نامی باشند، بلکه باید ژنراتورهای سنکرون هر سیستم نیز با ژنراتورهای سنکرون تمامی سیستمهای به‌هم‌پیوسته، همزمان بمانند.

برنامه‌ریزی‌کار، پیشرفت، وگسترش هرسیستم‌قدرت، نیاز به‌بررسی بار، محاسبات عیب، طراحی راههای حفاظت سیستم درمقابل صاعقه و امواج کلیدزنی و اتصال‌کوتاهها، و مطالعات پایداری سیستم دارد. مسئلهٔ مهم در کارکرد مؤثر سیستم، تعیین نحوهٔ تقسیم کل تولید مورد نیاز در هر زمان، بین نیروگاههای مختلف و بین واحدهای هر نیروگاه است. در این فصل پس از بحث مختصری دربارهٔ تولید، انتقال و توزیع‌انرژی، به‌بررسی‌ماهیت کلی این نوع مسائل می‌پردازیم و به‌کمکهای بزرگ کامپیوترها در برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستمهای قدرت، اشاره خواهیم کرد.

۱ـ۲ تولید انرژی

بیشتر قدرت الکتریکی در ایالات متحده در نیروگاههای با توربین بخار تولید می‌شود. قدرت آبی به‌کمتر از ۲۰٪ مقدارکل بالغ می‌شود. این درصد حتی کاهش می‌یابد زیرا بیشتر منابع قابل دسترسی قدرت آبی به‌بهره‌برداری رسیده‌اند. توربینهای‌گازی به‌نسبتی کمتر، در فواصل‌کوتاهی‌که سیستم حداکثر بار را حمل می‌کند به‌کار می‌روند.

زغال سنگ، پرکاربردترین سوخت در نیروگاههای بخار است.[1] با وجود اینکه نیروگاههای هسته‌ای که با سوخت اورانیوم کارمی‌کنند با سیرمدام صعودی در تغذیهٔ بار سهیم می‌شوند، مشکلاتی وجود دارندکه ساخت آنها راکُندو نامطمئن می‌سازند این مشکلات عبارت‌اند از: دشواریهای افزایش سرمایه‌که باید برای تأمین هزینهٔ ساخت سریعاً درحال رشد صورت بگیرد، توقعات فزایندهٔ ایمنی‌که موجب طراحی دوباره می‌شوند، مخالفت عمومی با کار نیروگاهها و تأخیر درصدور پروانه.

بین سالهای ۱۹۷۰ و ۱۹۷۲، نیروگاههای زیادی به‌شکل نفت‌سوز درآمدند اما درمقابل افزایش مداوم بهای نفت و ضرورت‌کاهش وابستگی به‌نفت خارجی، درهرجاکه ممکن بود زغال‌سنگ دوباره جانشین نفت شد.

منابع اورانیوم محدود است اما رئکتورهای فزاینده[2] که اکنون در ایالات متحده ممنوع‌اند مجموع انرژی قابل دریافت از اورانیوم را در سطح اروپا به‌میزان زیادی افزایش داده‌اند. جوش هسته‌ای[3] امید بزرگی برای‌آینده است، اما انتظار نمی‌رود انجام

---

۱. در ایران، نفت سنگین وگاز طبیعی، سوخت نیروگاههای حرارتی را تشکیل می‌دهند.

2. breeder reactor 3. Nuclear fusion

یك فرایند قابل‌کنترل‌جوش درمقیاسی اقتصادی پیش از گذشت زمانی نسبتاً طولانی پس‌از سال۲۰۰۰، میسر باشد. به‌هرحال آن سال اکنون یك‌تاریخ مورد انتظار برای ارائهٔ اولین مدل آزمایشی یك رئکتور جوش قابل‌کنترل است. همینکه این مسئله صورت واقع به‌خود بگیرد، سیستمهای قدرت الکتریکی نیز باید به‌رشد خود ادامه دهند و کاربردهـای مستقیم سوخت را در دست‌بگیرند. برای مثال احتمالا خودروی‌الکتریکی به‌طور وسیعی به‌کار گرفته خواهد شد تا سوختهای فسیلی (شامل نفت خام و گاز به‌دست‌آمده از زغال سنگ) برای مصرف هواپیما و حمل و نقل‌کامیونی راههای دور، ذخیره شوند.

انرژی زیرزمینی به‌شکل بخار زنده و فعال خارج‌شونده از زمین در ایالات متحده وکشورهای دیگر مصرف خاصی پیداکرده است. انرژی خورشیدکه هم‌اکنون تنها برای گرمایش مستقیم آب مصارف مسکونی‌کاربرد دارد، سرانجام باید از طریق تحقیقات روی سلولهای فوتوولتائیك کـه نور خورشید را مستقیماً به الکتریسیته تبدیل می‌کنند، عملی و قابل کاربرد شود.[1] پیشرفت زیادی در افزایش بازدهی و کاهش قیمت این سلولها به‌دست آمده اما هنوز راهی‌که باید طی شود طولانی است. در چندین محل، ژنراتورهایی کـه محرك آنها آسیای بادی است برای تهیهٔ مقادیرکوچك قدرت‌کار می‌کنند. تلاشهایی برای کسب قدرت از جذر و مدهای متغیر و امواج دریا صورت می‌گیرد. الکل به‌دست‌آمده از دانهٔ گیاهان شکل غیرمستقیمی از انرژی خورشیدی است‌که مخلوط آن با بنزین، سوخت قابل‌قبولی برای خودروها به‌وجود می‌آورد. گاز به‌دست‌آمده از زباله و فاضلاب، شکل غیرمستقیم دیگری از انرژی خورشیدی است.

نهایتاً در تولید انرژی به‌هروسیله، حفاظت محیط زیست اهمیت بسیار دارد. کاملا واضح است‌که کشورهای صنعتی عامل آلودگی جوی‌اند. آلـودگی حرارتی کمتر آشکار است. امـا مسئلهٔ تأمین آب خنك‌کننده بـرای رئکتورهای هسته‌ای اهمیت بسیار دارد و هزینه‌های ساخت را به‌میزان‌زیادی افزایش‌می‌دهد. ازدیاد بیش‌از حد دمای آب رودخانه‌ها برای مـاهیها زیان‌آور است و دریاچه‌های مصنوعی بـرای آب خنك‌کننده نیز زمینهای تولیدی فراوانی را به‌زیر آب برده و تلف می‌کنند. در این‌جا به‌نظرمی‌رسدکـه برجهای خنك‌کننده با وجود قیمت گرانشان، راه‌حلی بـرای خنك‌کردن در نیروگاههای هسته‌ای باشند.

۱ـ۳ انتقال و توزیع

ولتاژ ژنراتورهای‌بزرگ‌معمولا درمحدودهٔ ۱۳٫۸kV تا ۲۴kV است. اما ژنراتورهای بـزرگ امروزی بـرای پهنهٔ ولتاژ ۱۸kV تـا ۲۴kV ساخته می‌شوند. و هیچ ولتاژ استانداردی برای ژنراتورها پذیرفته نشده است.

---

۱. هم‌اکنون این پدیده عملی‌شده و مزارع خورشیدی (Solar Farms) در ایالات متحده به تولید انرژی الکتریکی خورشیدی مشغول‌اند.

ولتاژ ژنراتور تـا سطوح انتقال در پهنهٔ ۱۱۵ kV تا ۷۶۵ kV افزایش می‌یابد. مقدار استاندارد ولتاژهای بالا ۱۱۵، ۱۳۸، و ۲۳۰ کیلوولت است. ولتاژهای بسیار بالا (E H V) عبارت‌اند از: ۳۴۵، ۵۰۰، ۷۶۵ کیلوولت. تحقیق روی خطوطی بـا سطوح ولتاژ بسیار بسیار بالا (U H V) از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ کیلوولت جریـان دارد.[۱] مزیت سطوح بالاتر ولتاژ این است که توانایی انتقال خط را ـ برحسب مگاولت‌آمپر (MVA) ـ افزایش می‌دهد. توانایی خطوط با طول یکسان، تقریباً با آهنگی قدری بزرگتر از مربع ولتاژ تغییر می‌کند. با این‌همه نمی‌توان توانایی معینی را برای یک‌خط ـ صرف‌نظر از ولتاژ آن ـ تعریف کرد زیرا توانایی بستگی دارد به: ۱ـ محدوده‌هـای حرارتی هادی ۲ـ افت ولتاژ مجاز ۳ـ قابلیت اطمینان ۴ـ نیازمندیهای حفظ همزمانی بین ماشینهای سیستم کـه پایداری خوانده می‌شود. بیشتر این عوامل به‌طول خط بستگی دارند.

به‌نظر می‌رسد توسعه و استفاده از کابلهای زیرزمینی برای یک ولتاژ خاص، حـدود ده سال پس از به‌کارگیری خطوط بـا سیم لخت در همان ولتاژ، شروع شده باشد. انتقال زیرزمینی با اینکه از نظر مساحت ناچیز است محسوساً رو به‌افزایش است. این انتقال، اغلب در مناطق شهری پرجمعیت یا در زیرسطحهای پهناور آب به‌کار می‌رود.

اولین کاهش ولتاژ از سطح ولتاژ انتقال، در پست اصلی صورت می‌گیرد که البته میزان کاهش در ارتباط بـا ولتاژ خط انتقال و در پهنهٔ ۳۴٫۵ تـا ۱۳۸ کیلوولت است. امکان دارد بعضی از مشتریهای صنعتی را درهمین سطوح ولتاژ تغذیه کـرد. کاهش بعدی ولتاژ در پست توزیع انجام می‌شود. به‌طوری کـه ولتاژ خطوط خروجی از این پست در محدودهٔ ۴ تا ۳۴٫۵ کیلوولت و عمومـاً بین ۱۱ و ۱۵ کیلوولت است. این همان سیستم توزیـع اولیه است. در این سطح، یک ولتاژ بسیار متداول ۱۲۴۷۰V خط به‌خط و یـا ۷۲۰۰V خط به خنثی است. ایـن ولتاژ معمولا به شکل ۱۲۴۷۰Y/۷۲۰۰V تـوصیف می‌شود. یـک ولتاژ پـایین‌تـر در سیستم توزیـع اولیه کـه کمتر بـه‌کار می‌رود، ولتاژ ۴۱۶۰Y/۲۴۰۰V است. سیستم تـوزیـع اولیه عـلاوه بـراکثر بـارهـای صنعتی، ترانسفورماتورهای توزیعی را تغذیه می‌کند که ولتاژهای ثانویهٔ آنها با مدارهای سه‌سیمهٔ تکفاز به‌مصارف مسکونی بسته می‌شود. درحـالت اخیر ولتاژ بین دوسیم ۲۴۰V، و بین هرکدام ازدوسیم با سیم‌سوم‌متصل به‌زمین، ۱۲۰V است. مدارهای ثانویهٔ دیگر عبارت‌اند از: سیستمهای چهارسیمهٔ سه‌فاز با مقدار نامی ۲۰۸Y/۱۲۰V، یا ۴۸۰Y/۲۷۷V.[۲]

۱ـ۴ بررسی بار

بررسی بار عبارت از تعیین ولتاژ، جریان، توان و ضریب توان یا توان واکنشی در نقاط

---

۱. سطوح ولتاژ ذکرشده در این فصل منحصر به امریکاست و لزومـاً درکشورهای دیگر به‌کار نمی‌رود و ولتاژهای استاندارد توزیع و انتقال در ایران عبارت‌انداز: ۱۱، ۲۰، ۶۳، ۱۳۲، ۲۳۰ و ۴۰۰ kV.

۲. مقدار این ولتاژها در ایران ۳۸۰/۲۲۰ ولت است.

مختلف شبکهٔ الکتریکی در شرایط موجود یا مورد انتظار بهره‌برداری عادی است. بررسی بار در طراحی گسترش آتی سیستم، دارای نقش عمده‌ای است زیرا کارکرد رضایتبخش سیستم بستگی به‌شناخت آثار به‌هم‌پیوستگی با سیستمهای قدرت دیگر، بارهای تازه، نیروگاههای نو، و خطوط انتقال جدید قبل از آن‌که تأسیس شوند دارد.

پیش از توسعهٔ کامپیوترهای رقمی بزرگ، بررسی پخش بار بر روی تابلوهای محاسبه‌کنندهٔ ac که با اتصال عناصر مداری و منابع ولتاژ، نسخهٔ تکفاز وکوچك مقیاس سیستمهای حقیقی را فراهم می‌کردند انجام می‌گرفت. از این‌رو تشکیل اتصالات، تصحیح کردن آنها و خواندن داده‌ها، خسته‌کننده و وقت‌گیر بود. امروزه کامپیوترهای رقمی برای بررسی پخش بار در سیستمهای پیچیده راه‌حلهایی ارائه می‌دهند. به‌عنوان مثال ممکن‌است برنامهٔ کامپیوتری بیش از ۱۵۰۰ شینه، ۲۵۰۰ خط، ۵۰۰ ترانسفورماتور که امکان تعویض سرك در زیر بار دارند و ۲۵ ترانسفورماتور تغییردهندهٔ فاز را بررسی کند و نتایج کامل را به‌سرعت و ارزان چاپ کند.

طراحان سیستم علاقه دارند سیستم قدرت را آن‌گونه‌که در ۱۰ یا ۲۰ سال آینده وجود خواهد داشت بررسی کنند. زیرا مثلا از شروع طرح یك نیروگاه هسته‌ای جدید تا به‌مدار آوردن آن زمانی بیش از ۱۰ سال طول می‌کشد. هرشرکت برق باید از خیلی‌قبل، از مسائل مربوط به‌محل برپایی نیروگاه و بهترین آرایش خطوط برای ارسال قدرت به‌مراکز باری‌که به‌هنگام طراحی وجود ندارند آگاه باشد.

درفصل ۸ چگونگی‌انجام بررسی پخش بار با کامپیوتر را خواهیم‌دید. شکل ۸–۲ **برون‌نوشتهٔ کامپیوتری پخش**بار یك سیستم کوچك را که بررسی خواهیم کرد نشان می‌دهد.

۱–۵ تسهیم اقتصادی بار

شاید تصور شود در صنعت برق رقابت نیست. این عقیده از آنجا سرچشمه می‌گیرد که کارکرد هرشرکت در منطقهٔ جغرافیایی مستقلی است که شرکتهای دیگر به آن سرویس نمی‌دهند. اما رقابت درجذب صنایع‌جدید به‌منطقه وجود دارد. تعرفه‌های‌الکتریکی مناسب، عاملی وادارنده در انتخاب محل واحدهای صنعتی است هرچند این عامل در موقع رشد سریع هزینه‌ها و نامشخص بودن نرخ تعرفه‌های قدرت، اهمیت‌کمتری دارد تا درمواقع شرایط اقتصادی پایدار.در هرصورت مقررات تعرفه‌ای کمیسیونهای ایالتی شرکتهای تولیدی، فشار مداومی به‌شرکتها وارد می‌آورد تا حداکثر مسائل اقتصادی را رعایت‌کنند و سود عادلانه‌ای درمقابل هزینه‌های از پیش پرداختهٔ تولید به‌دست‌آورند.

توزیع بارکل سیستم، بین نیروگاههای مختلف برای دست‌یابی به **صرفه‌ترین کارکرد**، **تسهیم اقتصادی** نام دارد. خواهیم دیدکه کامپیوتر، پیوسته تمامی نیروگاههای سیستم را به‌هنگام تغییر بار، کنترل می‌کند به‌طوری‌که تولید در صرفه‌ترین کارکرد صورت می‌گیرد.

۱ـ۶ محاسبات عیب

عیب در مدار عبارت از هرنقصی است کـه مانع عبور عـادی جریان شود. اکثر عیبهای خطوط انتقال kV ۱۱۵ و بـالاتـر، از صاعقه ناشی می‌شود کـه بـه شعله‌کشی مقره‌هـا می‌انجامد. ولتاژ بالا، بین هـادی و برج نگهدارندهٔ زمین شده، یونش به‌وجود می‌آورد. این امر برای بارهـای القایی ناشی‌از ضربهٔ صاعقه، مسیری به‌طرف زمین ایجاد می‌کند. به‌محض برقراری مسیر یونی‌شده به‌طرف زمین، امپدانس کم این مسیر، اجازهٔ عبورجریان قدرت را از هادی به زمین و ازآنجا به‌نقطهٔ خنثای زمین شدهٔ ترانسفورماتور یا ژنراتور می‌دهـد و به‌این‌ترتیب مدار کامل می‌شود. عیبهای خط به‌خط یعنی بدون دخـالت زمین، کمتر رخ می‌دهند. بـه منظور جداسازی قسمت معیوب خط از بقیهٔ سیستم، مـدارشکنهای بازکننده،عبورجریان را درمسیر یونی‌شده قطع کرده و اجازه می‌دهند تا یونیدگی برطرف شود. بعد از فاصلهٔ زمانی حدود ۲۰ سیکل کـه یونیدگی برطرف شد، مدارشکنها معمولا می‌توانند بدون برقراری مجدد قوس دوباره بسته شوند. تجربهٔ کارکرد خطوط انتقال نشان داده است کـه مدارشکنهای دوباره بند بسیار سریع، بعد از اکثر عیبها بـا موفقیت بسته می‌شوند. تعداد زیادی ازحالاتی را کـه دوباره بستن درآنها موفق نیست عیبهای دائمی به‌وجود می‌آورندکه وصل‌مجدد صرف‌نظر ازفاصلهٔ زمانی بین بازکردن و بستن، غیرممکن است. عیبهای دائمی براثرافتادن خطوط روی زمین، شکست زنجیرهٔ مقره‌ها براثر بارهای یخ، خسارت دائمی به‌برجها، و نقص برقگیرها، به‌وجود می‌آیند. تجربه نشان داده است که بین ۷۰ تا ۸۰ درصد عیبهای خط انتقال ازنوع تک‌خط به‌زمین‌اند که براثرشعله‌کشی یك خط با برج و زمین ایجاد می‌شوند. تعداد کمی از عیبها ـ درحدود ۵٪ ـ هر سه‌فاز را دربرمی‌گیرند و عیبهای سه فاز نامیده می‌شوند. انواع دیگرعیبهای خط انتقال عبارت‌اند از خط به‌خط بدون دخالت زمین، و دو خط به‌زمین. تمام این عیبها ـ به استثنای نوع سه فاز ـ نامتقارن‌اند. و تعادل فازها را برهم می‌زنند.

جریانی که بلافاصله بعداز وقوع عیب از قسمتهای مختلف یك‌سیستم‌قدرت‌می‌گذرد با جریان گذرنده پس از چند سیکل ـ درست قبل از اینکه مدارشکنها برای بازکردن خط از دوطرف عیب فراخوانده شوند ـ متفاوت است و هردوی این جریانها با جریان حالت مانا درصورتی کـه عیب بـا عمل مدارشکنها، از بقیهٔ سیستم جدا نشود، تفاوت عمده‌ای دارند. از عواملی کـه انتخاب صحیح مدارشکنها وابسته به‌آنهاست یکی جریان گذرنده بلافاصله پس از وقوع عیب است و دیگری جریانی است کـه مدارشکن باید قطع کند. محاسبات عیب، مبتنی است برتعیین این جریانها به‌ازای عیبهای گوناگونی که درمحلهای مختلف سیستم رخ می‌دهند. همچنین اطلاعات به‌دست آمده ازمحاسبات عیب درتعیین تنظیم رله‌هایی که مدارشکنها را کنترل می‌کنند به‌کارمی‌روند.

تحلیل با مؤلفه‌های متقارن روش مؤثری است که بعداً بررسی خواهد شد و محاسبهٔ عیبهای نامتقارن را تقریباً تـا حد محاسبهٔ عیبهای سه‌فاز ساده می‌کند. کامپیوتر رقمی در

محاسبات عیب نیز کارایی ارزشمندی از خود نشان می‌دهد. عملیات اصلی را که مستلزم برنامه‌های کامپیوتری است بعداً بررسی خواهیم کرد.

۱ـ۷ حفاظت سیستم

عیبها می‌توانند برای سیستمهای قدرت بسیار مخرب باشند. بررسی فراوان، توسعهٔ لوازم، و در نظرگرفتن تـدابیر حفاظت موجب شده‌اند تـا در جلوگیری از وارد آمدن خسارت به‌خطوط انتقال و تجهیزات و پیشگیری از قطع تولیدـ به‌دنبال وقوع عیبـ بهبود مداوم حاصل شود.

مسئلهٔ پدیده‌های گذرا درخط انتقال را دریك‌حالت بسیار ساده شده، بررسی‌خواهیم کرد. این مطالعه ما را به بحث دربارهٔ چگونگی حفاظت برقگیرهـا از تجهیزاتی مـانند ترانسفورماتورهای واقع در شبکهٔ نیروگاهها و پستها در مقابل‌ضربه‌های ولتاژ بالای‌ناشی از صاعقه، و درمورد خطوط EHV و UHV ناشی از کلیدزنی، خواهدکشاند.

عیبهای ناشی از ضربه‌ها معمولا آن‌قدر کوتاه مدت‌اندکه هرمدار شکنی کـه ممکن باشد بازکند بعد از چندسیکل به‌طورخودکار بسته‌خواهدشد تا سیستم به‌کارعادی برگردد. اگر برقگیرها نباشند یا عیبها دائمی‌باشند برای‌حفظ کارعادی‌بقیهٔ سیستم، قسمتهای عیب‌دار باید از آن جدا شوند.

کارکرد مدارشکنها بـا رله‌هایی کـه عیب را حس می‌کنندکنترل می‌شود. درعمل، تعیین نواحی حفاظت رله‌ها مشخص می‌کند کـه رله‌هـای مختلف، مسئول کدام قسمتهای سیستم‌اند. موقعی‌که یك رله قادر به پاسخگویی به‌عیب وقوع یافته در ناحیهٔ خود نیست، رلهٔ ناحیه یا نواحی مجاور، ازآن پشتیبانی خواهدکرد. درفصل ۱۳ پس‌از بحث درمورد مشخصات انواع اصلی رله‌ها، نگاهی‌نیز به‌برخی مثالهای عددی دربارهٔ کاربرد وهماهنگی آنها خواهیم کرد.

۱ـ۸ بررسی پایداری

جریان یك ژنراتور ac یا موتور سنکرون بستگی‌دارد به‌اندازهٔ ولتاژ تولیدی (یا داخلی) آن، اختلاف فاز ولتاژ داخلی آن نسبت به‌ولتاژ داخلی‌ماشینهای دیگرسیستم، و مشخصات شبکه و بارها. برای مثال دو ژنراتور ac که موازی کار می‌کنند ولی به‌هیچ مدار خارجی غیراز مدار موازی‌کنندهٔ خود وصل نیستند، درصورتی‌که ولتاژ داخلی آنها از نظر اندازه و فاز مساوی باشند، جریانی نخواهند داشت. اما اگرولتاژهای داخلی‌آنها دارای اندازهٔ مساوی و فازهای نامساوی باشند، تفاضل ولتاژ آنها صفر نخواهد بود و جریانی برقرار خواهد شد که از تفاضل ولتاژها و امپدانس مدار تعیین می‌شود. توان لازم یك ماشین را ماشین دیگر تحویل می‌دهد یعنی ماشین اول به جای ژنراتور بودن به‌صورت موتور عمل خواهدکرد.

زاویهٔ فاز ولتاژهای داخلی به‌وضعیت نسبی روتورماشینها بستگی دارد. اگرهمزمانی بین ژنراتورهای یك سیستم قدرت حفظ نشود زاویه فاز ولتاژهای داخلی، مدام نسبت به یکدیگر تغییرمی‌کنند و کار رضایتبخش ممکن نخواهد بود.

زاویه فاز ولتاژهای داخلی ماشینهای همزمان فقط تا زمانی‌ثابت می‌ماندکه سرعت ماشینهای مختلف در سرعتی متناظر با فرکانس فاز بردار مرجع، ثـابت بماند. وقتی بار یکی از ژنراتورها یا به‌طورکلی بار سیستم تغییرمی‌کند، جریان آن ژنراتور یا سیستم‌نیز تغییرمی‌کند. تغییرجریان اگر موجب تغییر اندازهٔ ولتاژ داخلی ماشینها نشود اجباراً زاویه فاز آنها را تغییرمی‌دهد. بنابراین‌تغییرات لحظه‌ای سرعت برای تنظیم زاویه فاز ولتاژها نسبت به‌هم‌ضروری است. زیرا این زوایا را وضعیت نسبی روتورها تعیین می‌کند. وقتی ماشینها خود را با زاویهٔ فازهای جدید تطبیق داده‌اند یا وقتی اختلال مسبب تغییر لحظه‌ای سرعت، برطرف شده است ماشینها باید دوباره در سرعت همزمان کارکنند. در یك سیستم درست طراحی‌شده، اگر هرماشین، همزمانی با بقیهٔ سیستم را حفظ نکند، جریان گردشی زیادی پدید می‌آید کـه با به‌کار انداختن رله‌ها و مدارشکنها مـاشین را از سیستم جدا می‌کند. مسئلهٔ پایداری عبارت از حفظ همزمانی ژنراتورها و موتورهای سیستم است.

بررسیهای پایداری برحسب اینکه مربوط به‌حالت مانا یـا گذرا باشند، طبقه‌بندی می‌شوند. توانی‌که یك ژنراتور ac می‌تواند تحویل دهد یا باری کـه یك موتور همزمان می‌تواند بکشد حدی دارد. اقـدام به افزایش ورودی مکانیکی ژنراتور یـا بار مکانیکی موتور بیش از این‌حد معین‌که حد پایداری نام دارد، ناپایداری پدید می‌آورد. حتی بـا تغییر تدریجی بار نیز به‌یك قدرت حد می‌رسیم. اختلالات سیستم در اثر اعمال ناگهانی بـار، وقوع عیب، حـذف شدن جریان تحریك ژنراتور، و کلیدزنی ممکن است بـاعث ازدست رفتن همزمانی شود حتی درحالتی‌که تغییرناشی از اختلال به‌گونه‌ای باشدکه اگر تـدریجی اعمال شود، از حـد پایداری تجاوز نکند. میزان قدرت حد، برحسب اینکه نقطهٔ ناپایداری ناشی از تغییر ناگهانی یا تغییرتدریجی شرایط سیستم باشد، حد پایداری گذرا یا حد پایداری مانا خوانده می‌شود.

خوشبختانه‌مهندسین، روشهایی برای بهبود پایداری و پیش‌بینی‌حدود عملکرد پایدار درحالت مانا و گذرا یافته‌اند. بررسی پایداری کـه برای سیستم دوماشینه انجام خواهیم داد ساده‌تر از بررسی سیستمهای چند ماشینه است. اما بسیاری از روشهای بهبود پایداری را می‌توان با تحلیل یك سیستم دوماشینه تشریح کرد. از کامپیوترهای رقمی در پیش‌بینی حدود پایداری سیستمهای پیچیده نیز استفاده می‌شود.

۱ـ۹ مهندس سیستم قدرت

در این فصل کوشیدیم تا اندکی ازتاریخچهٔ پیشرفتهای اساسی‌سیستمهای قدرت الکتریکی را شرح دهیم و مقداری از بررسیهای تحلیلی مهم در طراحی عملکرد، بهبود، و گسترش یك‌سیستم قدرت امروزی را توصیف کنیم. مهندس‌سیستم قدرت باید روشهای انجام‌بررسی

بار، تحلیل عیب، و بررسی پایداری و اصول تسهیم اقتصادی را بداند زیرا چنین بررسیهایی در طراحی و کار سیستم و در انتخاب وسایل کنترل آن تأثیر دارد. پیش از آنکه به‌تفصیل به‌این مسائل بپردازیم باید برخی از مفاهیم بنیادی مربوط به‌سیستمهای قدرت را بررسی کنیم تا دریابیم که چگونه این مفاهیم بنیادی در مسائل بزرگتر تأثیر دارند.

۱ـ۱۰ خواندنیهای اضافی

پانوشتهای داخل کتاب، منابعی را برای اطلاعـات بیشتر دربارهٔ بسیاری از موضوعـات مورد بحث به‌دست می‌دهند. علاوه‌براین نظر خواننده را به‌فهرست کتابهای زیر که اغلب دربارهٔ همان مطالب مطرح‌شده درکتاب‌اند جلب می‌کنیم اگرچه بعضی از آنها موضوعاتی دیگر یا همان موضوعات را عمیقتر بررسی می‌کنند.

Elgerd, O. I., "Electric Energy Systems Theory: An Introduction," 2d ed., McCraw-Hill Book Company, New York, 1982.

Gross, C. A., "Power System Analysis," John Wiley & Sons; New York, 1979.

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

Weedy, B. M., "Electric Power Systems," 3d ed., John Wiley & Sons Ltd., London, 1979.

۲

مفاهیم اساسی

کارکرد عادی سیستم قدرت نیز درست به اندازهٔ شرایط غیرعادی که ممکن است پیش آید مورد توجه مهندس سیستم قدرت است. بنابراین، او باید با کار مانای مدارهای جریان متناوب، به‌ویژه مدارهای سه‌فاز آشنایی کامل داشته باشد. موضوع این فصل، یادآوری بعضی از مفاهیم اساسی این مدارها، تثبیت نشانه‌گذاری مورد استفاده درکتاب و آشنایی با مقدار در-یکی ولتاژ، جریان، امپدانس، و توان است.

۲-۱ مقدمه

شکل موج ولتاژ در شینه‌های سیستم قدرت را می‌توان سینوسی کامل و با فرکانس ثابت فرض کرد. برای بیان بیشتر نظریه‌ها در این کتاب با نمایش فازبرداری ولتاژها و جریانها سروکار خواهیم داشت و برای نشان دادن این فازبردارها حروف بزرگ V و I را به‌کار خواهیم برد. اندازهٔ فازبردارهای V و I را با $|V|$ و $|I|$ مشخص خواهیم کرد. حروف کوچك مانند v و i نشان دهندهٔ مقادیر لحظه‌ای خواهند بود. برای مشخص کردن ولتاژ تولیدی («نیروی» محرکه الکتریکی[1]) به‌جای حرف V از E استفاده خواهد شد تا

---

۱. همچنانکه electromotance به‌جای emf پیشنهاد شده، می‌توان محرکهٔ الکتریکی به‌جای «نیروی» محرك الکتریکی به‌کار برد.ـو.

تأکید شود که منظور emf است نه اختلاف پتانسیل معمولی بین دو نقطه.
اگر ولتاژ و جریان به‌صورت توابعی از زمان نشان داده شوند، مثلا

$$v = ۱۴۱٫۴ \cos(\omega t + ۳۰^\circ)$$

و

$$i = ۷٫۰۷ \cos \omega t$$

واضح است که مقادیر ماکزیمم آنها به‌ترتیب $V_{max} = ۱۴۱٫۴\ V$ و $I_{max} = ۷٫۰۷ A$ است. زمانی که زیرنوشت max همراه با V و I برای نشان دادن مقادیر ماکزیمم به‌کار می‌رود دیگر نیازی به علامت قدرمطلق نیست. منظور از اندازهٔ ولتاژ و جریان، جذر میانگین مجذور (rms) یعنی $1/\sqrt{2}$ بار کمتر از مقدار ماکزیمم آنهاست. بنابراین درعبارت v و i بالا

$$|V| = ۱۰۰ V \quad و \quad |I| = ۵ A$$

اینها مقادیری است که با ولت‌سنج و آمپرسنج معمولی خوانده می‌شود. نام دیگر مقدار rms مقدار مؤثر است. توان میانگین مصرفی یك مقاومت عبارت است از $|I|^2 R$.
برای بیان کمیتها به‌صورت فازبردار، مرجعی باید انتخاب شود. اگر جریان، فازبردار مرجع باشد

$$I = ۵ \angle ۰^\circ = ۵ + j۰ A$$

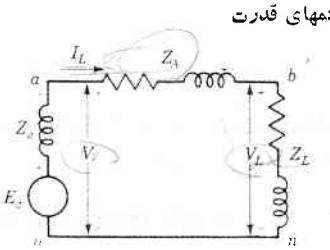
ولتاژی که به اندازهٔ ۳۰° نسبت به‌جریان پیش افت دارد عبارت است از

$$V = ۱۰۰ \angle ۳۰^\circ = ۸۶٫۶ + j۵۰ V$$

البته، ممکن است نه ولتاژ را به‌عنوان فازبردار مرجع انتخاب کنیم و نه جریان‌را، در آن صورت فازبردار آنها هرکدام زاویهٔ خاص خود را خواهد داشت.
غالباً در نمودار مدارها بهتر است در هنگام مشخص‌کردن ولتاژ، برای نشان دادن سری که مثبت فرض می‌شود از نشانه‌های قطبداشت به‌صورت علامتهای مثبت و منفی استفاده شود. یك علامت پیکان برروی نمودار مدار، جهت مثبت فرض شده برای عبور جریان را نشان می‌دهد. درمعادل تکفاز یك مدار سه‌فاز معمولا نشانه‌گذاری تك‌زیرنوشتی کافی است. اما در هنگام سروکار داشتن با هرسه فاز غالباً نشانه‌گذاری دو زیرنوشتی ساده‌تر است.

۲ـ۲ نشانه‌گذاری تك‌زیرنوشتی

شکل ۲ـ۱، مدار جریان متناوبی را نشان می‌دهد که در آن منبع با دایره نشان‌داده شده‌است.



شکل ۲-۱ مدار جریان متناوبی با محرکه الکتریکی E_g و امپدانس بار Z_L.

محرکهٔ الکتریکی بـا E_g، و ولتاژ بین نقاط a و o با V_t مشخص می‌شود. جریان مدار، I_L، و ولتاژ سرانهٔ Z_L، V_L است. لیکن، برای مشخص کردن فازبردار این ولتاژها علامتهای + و —، به‌نام نشانه‌های قطبداشت، و علامت پیکان بـرای جهت جریان برروی نمودار لازم است.

در هرمدار ac، سر مشخص‌شده با علامت + نسبت به‌سر مشخص‌شده بـا علامت — در یك نیم‌سیکل ولتاژ، مثبت و در نیم‌سیکل بعدی منفی است. بـا این علامت گذاری، زمانی‌که سرمثبت واقعاً پتانسیل بیشتری نسبت به‌سر منفی دارد ولتاژ بین دوسرمثبت است؛ بـرای مثال، درشکل ۲-۱ زمانی که سرمثبت واقعاً پتانسیل بیشتری نسبت به‌سرمنفی دارد ولتاژ لحظه‌ای v_t مثبت است. در طول نیم‌سیکل بعدی سر دارای علامت مثبت واقعاً منفی است، و v_t هم‌منفی است. در پاره‌ای نوشته‌ها یك پیکان به‌کار می‌رود در این صورت باید مشخص شود نوك پیکان سری را که ما در بالا مثبت علامت گذاری کردیم نشان می‌دهد یا سرمنفی را.

عـلامت پیکان جریان هم نقش مشابهی دارد. زیرنوشت، در این مورد L، ضروری نیست مگر اینکه جریانهای دیگری نیزموجود باشد. واضح‌است که در هرمدار ac، جهت واقعی جریان در هرنیم‌سیکل معکوس می‌شود. نوك پیکان جهتی را نشان می‌دهدکـه جهت مثبت جریان نام‌دارد. زمانی‌که جریان واقعاً درجهت عکس علامت پیکان می‌گذرد، جریان منفی است. به‌صورت فازبرداری

$$I_L=\frac{V_t-V_L}{Z_A} \qquad (۱-۲)$$

و

$$V_t=E_g-I_LZ_g \qquad (۲-۲)$$

چون گرههای معینی در مدار بـا حرف مشخص شده‌اند، ولتاژهـا را می‌توان بـا زیرنوشتهای تك‌حرفه نشان دادکه گرهی را مشخص می‌کند کـه ولتاژ آن نسبت به‌ولتاژ گره مرجـع بیان شده است. در شکل ۲-۱، ولتاژ لحظه‌ای v_a و ولتاژ فـازبرداری V_a نشان دهندهٔ ولتاژ نقطهٔ a نسبت به‌نقطهٔ مرجع o است، و زمانی‌که a پتانسیلی بیشتر از o دارد v_a، مثبت است. بنابراین

$$v_a = v_t \qquad v_b = v_L$$
$$V_a = V_t \qquad V_b = V_L$$

۲-۳ نشانه‌گذاری دوزیرنوشتی

با بهره‌گیری از نشانه‌گذاری دوزیرنوشتی می‌توان از به‌کارگیری نشانه‌های قطبداشت برای ولتاژ و علامت پیکان برای جریان پرهیز کرد. فهم مدارهای سه فاز با به‌کارگیری نشانه‌گذاری دوزیرنوشتی بسیار آسان‌تر می‌شود. قرارداد مربوط بسیار ساده است.

در هنگام مشخص کردن جریانها، ترتیب زیرنوشتهای نماد جریان، جهت جریان را زمانی که جریان مثبت فرض می‌شود معین می‌کند. در شکل ۲-۱، پیکانی که از a به‌سوی b نشانه می‌رود، جهت مثبت جریان I_L را مشخص می‌کند. جریان لحظه‌ای i_L، زمانی مثبت است که جریان واقعاً از a به‌سوی b می‌گذرد، و در نشانه‌گذاری دوزیرنوشتی، این جریان i_{ab} است. جریان i_{ab} برابر است با $-i_{ba}$.

در نشانه‌گذاری دوزیرنوشتی، زیرنوشتهای حرفی ولتاژها گرههایی را مشخص می‌کند که ولتاژ بین آنها برقرار است. بنابه‌قرارداد، زیرنوشت اول مشخص‌کنندهٔ ولتاژ گره مورد نظر است نسبت به‌نقطه‌ای که با زیرنوشت دوم مشخص می‌شود. پس در شکل ۲-۱، ولتاژ لحظه‌ای در دوسر Z_A عبارت است از ولتاژ نقطهٔ a نسبت به نقطهٔ b، و v_{ab} در نیم‌سیکلی که a پتانسیلی بیشتر از b دارد مثبت است. ولتاژ فازبرداری مربوط، V_{ab} است، و

$$V_{ab} = I_{ab} Z_A \qquad (۳-۲)$$

که در آن Z_A، امپدانس مختلط بین نقاط a و b است که جریان I_{ab} از آن می‌گذرد، و آن را می‌توان به‌صورت Z_{ab} نیز نشان داد.

معکوس کردن ترتیب زیرنوشتها چه در ولتاژ و چه در جریان، ولتاژ یا جریانی را به‌دست می‌دهد که با ولتاژ یا جریان پیشین ۱۸۰° اختلاف فاز دارد؛ یعنی،

$$V_{ab} = V_{ba} \angle 180^\circ = -V_{ba}$$

رابطهٔ بین نشانه‌گذاریهای تک‌زیرنوشتی و دوزیرنوشتی درشکل ۲-۱ چنین خلاصه می‌شود:

$$V_t = V_a = V_{ao} \qquad V_L = V_b = V_{bo}$$
$$I_L = I_{ab}$$

در نوشتن قانون ولتاژ کیرشهف، ترتیب زیرنوشتها همان ترتیب پیمودن مسیرهای بسته مدار است. برای شکل ۲-۱،

$$V_{oa}+V_{ab}+V_{bn}=0 \qquad (۴-۲)$$

گرههای n و o در این مدار یکی هستند، و گره n تنها به‌منظور مشخص کردن دقیقترمسیر معرفی‌شده است. اگر به‌جای V_{oa} بگذاریم $-V_{ao}$ و توجه‌کنیم که $V_{ab}=I_{ab}Z_A$، نتیجه می‌شود

$$-V_{ao}+I_{ab}Z_A+V_{bn}=0 \qquad (۵-۲)$$

و بنابراین

$$I_{ab}=\frac{V_{ao}-V_{bn}}{Z_A} \qquad (۶-۲)$$

۲ـ۴ توان در مدارهای تکفاز AC

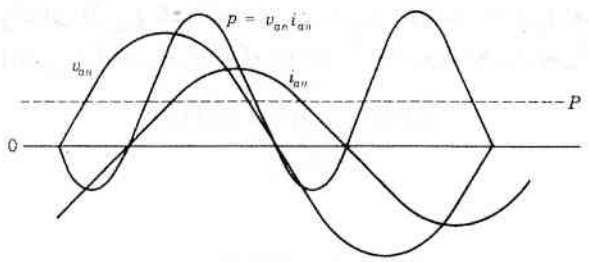
اگر چه نظریهٔ اساسی انتقال انرژی جابه‌جایی انرژی را برحسب برهم‌کنش میدانهای الکتریکی و مغناطیسی توضیح می‌دهد، مهندس سیستم قدرت عموماً با آهنگ تغییر انرژی نسبت به‌زمان (که همان‌تعریف‌توان است) برحسب‌ولتاژوجریان سروکاردارد.واحد سنجش توان وات است.) توانی‌که بار در هر لحظه برحسب وات مصرف می‌کند عبارت است از حاصل‌ضرب افت‌ولتاژ لحظه‌ای بین سرهای بار برحسب ولت و جریان لحظه‌ای بار برحسب آمپر. اگر دوسربار با a و n مشخص شود و اگر ولتاژ و جریان چنین بیان شوند

$$v_{an}=V_{\max}\cos\omega t \qquad \text{و} \qquad i_{an}=I_{\max}\cos(\omega t-\theta)$$

توان لحظه‌ای عبارت است از

$$p=v_{an}i_{an}=V_{\max}I_{\max}\cos\omega t\cos(\omega t-\theta) \qquad (۷-۲)$$

زاویهٔ θ در این‌معادلات برای پس‌افت جریان نسبت به‌ولتاژ، مثبت و برای پیش‌افت‌جریان نسبت به‌ولتاژ، منفی است) مقادیر مثبت p، بیان‌کنندهٔ آهنگ مصرف انرژی در بخشی از سیستم است‌که بین نقاط a و n قراردارد. واضح است‌که توان لحظه‌ای موقعی مثبت است که v_{an} و i_{an} هردومثبت یا هردومنفی‌اند اما زمانی‌که v_{an} و i_{an} علامتی مخالف هم دارند منفی می‌شود. شکل ۲ـ۲ این نکته را نشان‌می‌دهد. توان مثبت که به‌صورت $v_{an}i_{an}$ محاسبه می‌شود، زمانی پدید می‌آیدکه جریان درجهت افت ولتاژ می‌گذرد و عبارت از آهنگ انتقال انرژی به‌بار است. برعکس، توان منفی‌که به‌صورت $v_{an}i_{an}$ محاسبه می‌شود، زمانی پدید می‌آیدکه جریان درجهت افزایش ولتاژ می‌گذرد و عبارت از آهنگ انتقال انرژی از بار است به‌سیستم‌وصل به‌آن. اگر v_{an} و i_{an} چنانکه در بار مقاومتی‌خالص پیش‌می‌آید همفاز باشند توان لحظه‌ای هرگز منفی نخواهدشد. اگر جریان و ولتاژچنانکه درعناصر ایدئال



شکل ۲-۲ منحنیهای جریان، ولتاژ و توان برحسب زمان.

القایی خالص یا ظرفیتی خالص پیش می‌آید، ۹۰° نسبت به‌هم اختلاف فاز داشته باشند توان لحظه‌ای، نیم‌سیکلهای مثبت و منفی مساوی خواهد داشت و مقدار متوسط آن صفر خواهد شد.

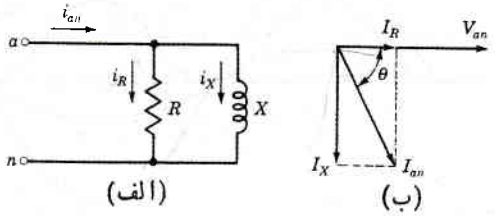
به‌کمك روابط مثلثاتی، معادلهٔ (۲-۷) بدین‌صورت درمی‌آید.

$$p = \frac{V_{\max} I_{\max}}{۲} \cos\theta (۱ + \cos ۲\omega t) + \frac{V_{\max} I_{\max}}{۲} \sin\theta \sin ۲\omega t \qquad (۸-۲)$$

که‌در آن‌می‌توان به‌جای $V_{\max} I_{\max} / ۲$ حاصل‌ضرب‌ولتاژجریان‌مؤثر، یعنی $|V_{an}| \cdot |I_{an}|$ یا $|V| \cdot |I|$، را گذاشت.

روش‌دیگر برخورد به‌رابطهٔ توان لحظه‌ای، درنظرگرفتن دومؤلفهٔ عمودبرهم‌جریان است که یکی همفاز با v_{an} و دیگری قائم بر v_{an} است. شکل ۲-۳ الف، مداری موازی را نشان می‌دهد که شکل ۲-۳ب، نمودار فازبرداری آن است. مؤلفه‌ای از i_{an} که با v_{an} همفاز است i_R است، و باتوجه به شکل ۲-۳ب، $|I_R| = |I_{an}| \cos\theta$. اگرمقدارماکزیمم i_{an}، $I_{\max}$ باشد مقدار ماکزیمم i_R می‌شود: $I_{\max} \cos\theta$. جریان لحظه‌ای i_R باید با v_{an} همفاز باشد. به‌ازای $v_{an} = V_{\max} \cos\omega t$،

$$i_R = \underbrace{I_{\max} \cos\theta}_{\max i_R} \cos\omega t \qquad (۹-۲)$$



شکل ۲-۳ مدار RL موازی و نمودار فاز برداری آن.

به‌همین‌ترتیب مؤلفه‌ای از i_{an} که ۹۰° نسبت به v_{an} پس‌افت دارد i_X است، که مقدار ماکزیممش $I_{\max}\sin\theta$ است. از آنجاکه i_X باید ۹۰° نسبت به v_{an} پس‌افت داشته باشد

$$i_X = \underbrace{I_{\max}\sin\theta}_{\max i_X}\sin\omega t \qquad (۲-۱۰)$$

و به‌این‌ترتیب

$$v_{an}i_R = V_{\max}I_{\max}\cos\theta\cos^2\omega t$$

$$= \frac{V_{\max}I_{\max}}{2}\cos\theta(1+\cos 2\omega t) \qquad (۲-۱۱)$$

که توان لحظه‌ای درمقاومت و جملهٔ اول معادلهٔ (۲-۸) است. شکل ۲-۴، تغییرات $v_{an}i_R$ را در برابر زمان نشان می‌دهد.

به‌همین‌ترتیب،

$$v_{an}i_X = V_{\max}I_{\max}\sin\theta\sin\omega t\cos\omega t$$

$$= \frac{V_{\max}I_{\max}}{2}\sin\theta\sin 2\omega t \qquad (۲-۱۲)$$

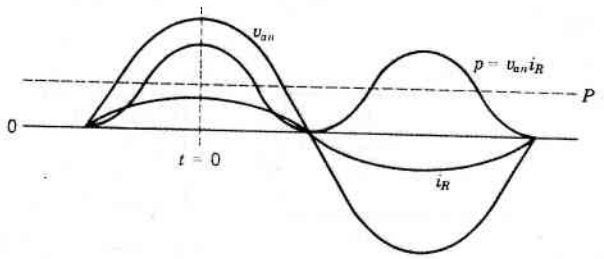
که توان لحظه‌ای در اندوکتانس و جملهٔ دوم معادلهٔ (۲-۸) است. شکل ۲-۵، تغییرات v_{an}، i_X و حاصل‌ضرب آنها را در برابر زمان نشان می‌دهد.

بررسی معادلهٔ (۲-۸) نشان‌می‌دهدکه‌جملهٔ اول این معادله، یعنی‌جمله شامل $\cos\theta$، همیشه مثبت است و مقدار متوسط آن عبارت است از

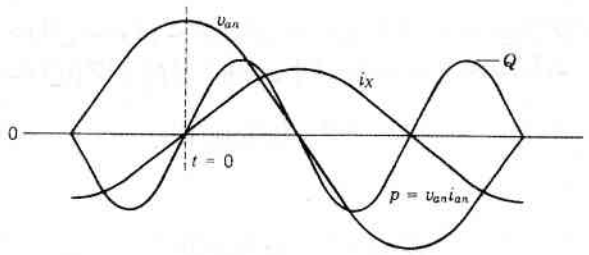
$$P = \frac{V_{\max}I_{\max}}{2}\cos\theta \qquad (۲-۱۳)$$

یا، اگرمقادیر مؤثر ولتاژ و جریان به‌کار رود

$$P = |V|\cdot|I|\cos\theta \qquad (۲-۱۴)$$



شکل ۲-۴ تغییرات ولتاژ، جریان همفاز با ولتاژ، و توان حاصل در برابر زمان.



شکل ۲–۵ تغییرات ولتاژ، جریان دارای ۹۰° پس‌افت نسبت به ولتاژ و توان حاصل در برابر زمان.

زمانی‌که از توان نام برده می‌شود بی‌آنکه صفتی به‌دنبال آن بیاید منظور همین P است. P، توان متوسط، توان حقیقی (یا آژیر) هم‌نامیده می‌شود. واحد اساسی برای توان لحظه‌ای و نیز توان متوسط، وات است. اما وات برای کمیتهای سیستمهای قدرت آن‌قدر واحد کوچکی است که P معمولا برحسب کیلو وات یا مگاوات سنجیده می‌شود.

کسینوس اختلاف فاز θ بین ولتاژ و جریان، ضریب توان نامیده می‌شود. ضریب توان مدار القایی را پس‌افتی و ضریب توان مدار ظرفیتی را پیش‌افتی گویند. به عبارت دیگر، عبارات ضریب توان پس‌افتی و ضریب توان پیش‌افتی، به‌ترتیب، نشان می‌دهند که جریان نسبت به‌ولتاژ اعمال شده پس‌افت یا پیش‌افت دارد.

جملهٔ دوم معادلهٔ (۲–۸)، یعنی جملهٔ شامل $\sin\theta$، متناوباً مثبت و منفی‌است و مقدار متوسطی معادل صفر دارد. این جمله از توان لحظه‌ای p، توان لحظه‌ای واکنشی (یا برآژیر) نامیده می‌شود و بیان‌کنندهٔ عبور انرژی به تناوب به‌داخل بار و از بار به‌خارج است. مقدار ماکزیمم این توان تپشی، که با Q مشخص می‌شود، توان واکنشی یا ولت‌آمپر واکنشی نامیده می‌شود و، چنانکه درمباحث آتی هرچه روشن‌تر خواهد شد، در تشریح عملکرد سیستم قدرت، بسیار مفید است. توان واکنشی (یا برآژیر) عبارت است از

$$Q = \frac{V_{max} I_{max}}{۲} \sin\theta \qquad (۱۵–۲)$$

یا

$$Q = |V| \cdot |I| \sin\theta \qquad (۱۶–۲)$$

جذر مجموع مربعات P و Q برابر است با حاصل‌ضرب $|V|$ و $|I|$، زیرا

$$\sqrt{P^۲ + Q^۲} = \sqrt{(|V| \cdot |I| \cos\theta)^۲ + (|V| \cdot |I| \sin\theta)^۲} = |V| \cdot |I| \qquad (۱۷–۲)$$

البته P و Q از نظر دیمانسیون یکسان‌اند، اما واحد سنجش Q، وار (برای ولت‌آمپر رئکتیو) نامیده می‌شود. واحدهای عملی‌تر برای Q کیلووار و مگاوار است.

در مدار متوالی ساده‌ای که Z برابر با $R+jX$ است، می‌توانیم در معادله‌های (۲–۱۴) و (۲–۱۶)، $|I| \cdot |Z|$ را به‌جای $|V|$ بگذاریم تا به‌دست آید

$$P = |I|^2 \cdot |Z| \cos\theta \qquad (۲–۱۸)$$

و

$$Q = |I|^2 \cdot |Z| \sin\theta \qquad (۲–۱۹)$$

سپس، با توجه به‌اینکه $R = |Z|\cos\theta$ و $X = |Z|\sin\theta$، چنانکه انتظار می‌رود خواهیم داشت

$$P = |I|^2 R \quad \text{و} \quad Q = |I|^2 X \qquad (۲–۲۰)$$

معادله‌های (۲–۱۴) و (۲–۱۶) روش دیگری برای محاسبهٔ ضریب توان به‌دست می‌دهد چون می‌بینیم که $Q/P = \tan\theta$. بنابراین ضریب توان عبارت است از

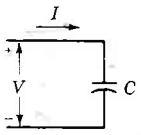
$$\cos\theta = \cos\tan^{-1}\frac{Q}{P}$$

یا از معادله‌های (۲–۱۴) و (۲–۱۷)

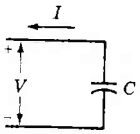
$$\cos\theta = \frac{P}{\sqrt{P^2+Q^2}}$$

اگر توان لحظه‌ای بیان شده با معادله (۲–۸)، توان در مداری با خاصیت ظرفیتی غالب باشد، θ منفی می‌شود و $\sin\theta$ و Q را نیز منفی می‌کند. اگر مدارهای القایی و ظرفیتی باهم موازی باشند، توان واکنشی لحظه‌ای مدار RL با توان واکنشی لحظه‌ای مدار RC، ۱۸۰° اختلاف فاز خواهد داشت. توان واکنشی کل، تفاضل Q مدار RL و Q مدار RC است. Q را برای بارالقایی، مثبت و برای بار ظرفیتی، منفی درنظر می‌گیرند.

مهندسین سیستم قدرت معمولاً به‌خازن بیشتر به‌چشم تولیدکنندهٔ توان واکنشی مثبت می‌نگرند تا بار نیازمند به‌توان واکنشی منفی. این برداشت کاملا منطقی است، زیرا خازن که Q منفی می‌کشد وقتی موازی با باری القایی قرار گیرد مقدار توانی واکنشی را که سیستم درصورت نبودن خازن می‌بایست برای بار القایی تأمین کند کاهش می‌دهد. به‌عبارت دیگر، خازن، Q مورد نیاز بار القایی را تأمین می‌کند. این درست مانند این است که چنانکه شکل ۲–۶ نشان می‌دهد خازن را وسیله‌ای فرض کنیم که جریان پس‌افتی تحویل می‌دهد نه وسیله‌ای که جریانی پیش‌افتی می‌کشد. برای مثال، خازن قابل تنظیمی را که موازی با باری القایی قرار گرفته‌است می‌توان طوری تنظیم کرد که جریان پیش‌افتی خازن از لحاظ اندازه، درست برابر مؤلفه‌ای از جریان بار القایی شود که نسبت به‌ولتاژ، ۹۰°



I نسبت به V، ۹۰° پیش‌افت دارد
(الف)



I نسبت به V، ۹۰° پس‌افت دارد
(ب)

شکل ۲ـ۶ خازن (الف) به‌عنوان عنصرمدار نافعال، جریان پیش‌افتی می‌کشد و (ب) به‌عنوان مولد، جریان پس‌افتی فراهم می‌کند.

پس‌افت دارد. به‌این ترتیب جریان برآیند با ولتاژ همفاز می‌شود. البته مدار القایی هنوز به توان واکنشی مثبت نیاز دارد، امـا توان واکنشی کل صفر است. به‌همین دلیل است که مهندس سیستم قدرت بهتر می‌داند کـه خازن را تأمین‌کنندهٔ توان واکنشی مورد نیاز بار القایی درنظر بگیرد. زمانی‌که کلمات مثبت و منفی به‌کارنمی‌رود منظور توان واکنشی مثبت است.

۲ـ۵ توان مختلط

اگر فازبردار ولتاژ و جریان‌معلوم باشد، محاسبهٔ توانهای حقیقی و واکنشی به‌صورت مختلط به‌سادگی انجام می‌پذیرد. اگر ولتاژ بین سرها و جریان ورودی به‌بار یا بخشی از مدار بـا $V=|V|\angle\alpha$ و $I=|I|\angle\beta$ بیان شود، حاصل‌ضرب ولتاژ و مزدوج جریان عبارت است از

$$VI^*=V\angle\alpha\times I\angle-\beta=|V|\cdot|I|\angle\alpha-\beta \qquad (۲۱-۲)$$

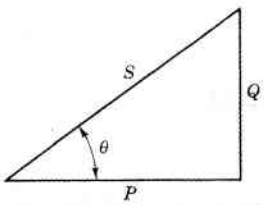
این کمیت راکه توان مختلط نامیده می‌شود معمولا با S نشان می‌دهند. درمختصات متعامد

$$S=|V|\cdot|I|\cos(\alpha-\beta)+j|V|\cdot|I|\sin(\alpha-\beta) \qquad (۲۲-۲)$$

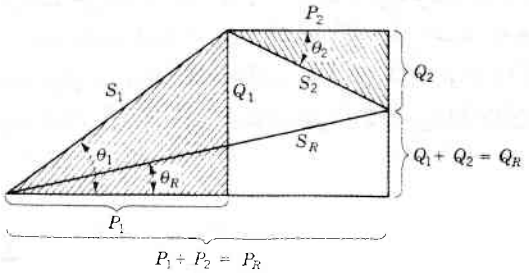
چون $\alpha-\beta$، اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان، همان θ در معادله‌های پیشین است،

$$S=P+jQ \qquad (۲۳-۲)$$

توان واکنشی Q زمانی مثبت است‌که اختلاف فاز $\alpha-\beta$ بین ولتاژ و جریان مثبت باشد، یعنی زمانی‌که $\alpha>\beta$، یا به‌عبارت دیگر زمانی‌کـه جریان نسبت به‌ولتاژ پس‌افت داشته باشد. برعکس، Q به‌ازای $\beta>\alpha$، که نشان دهندهٔ پیش‌افتی بودن جریان نسبت به ولتاژ است، منفی می‌شود. این موضوع با انتخاب علامت مثبت برای توان واکنشی درمدارهای القایی و انتخاب علامت منفی برای توان واکنشی در مدارهـای ظرفیتی همخوانی دارد. برای به‌دست‌آوردن علامت صحیح Q، لازم است S را بـه‌صورت VI^* حساب کرد نه به‌صورت V^*I، که علامت Q را درست نشان نمی‌دهد.



شکل ۲ـ۷ مثلث توان برای بار القایی.



شکل ۲ـ۸ مثلث توان برای بارهای مرکب. توجه کنید که Q_2 منفی است.

۲ـ۶ مثلث توان

معادلهٔ (۲ـ۲۳)، روش ترسیمی تعیین P و Q و زاویهٔ فاز کل را برای چند بار موازی با هم نشان می‌دهد زیرا $P/|S|$ همان $\cos\theta$ است. برای بار القایی می‌توان مثلث توانی مطابق شکل ۲ـ۷ رسم کرد. برای چند بار موازی بـا هم P کل مساوی مجموع توانهای متوسط تك تك بارهاست، کـه در روش ترسیمی باید در امتداد محور افقی رسم شوند. برای بار القایی، چون Q مثبت است در امتداد محور عمودی و به‌سمت بالا رسم می‌شود. بار ظرفیتی دارای Q منفی است و در امتداد محور عمودی به‌سمت پـایین رسم می‌شود. شکل۲ـ۸، مثلث توان حاصل از یك بار القایی با مشخصات P_1، Q_1 و S_1 را برای باری پس‌افتی و دارای زاویهٔ فاز مثبت θ_1 نشان می‌دهدکه با مثلث توان حاصل از یك بارظرفیتی با مشخصات P_2، Q_2 و S_2 با زاویهٔ فاز منفی θ_2 ترکیب شده است. مثلث توان حاصل‌از این دوبار موازی، دارای اضلاع P_1+P_2، Q_1+Q_2 و وتر S_R است. اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان فراهم‌شده برای مجموعهٔ دوبار، θ_R است.

۲ـ۷ جهت‌گذر توان

زمانی‌که گذر توان را در سیستمی بررسی می‌کنیم، رابطهٔ بین P، Q و ولتاژ شینه، V، یا

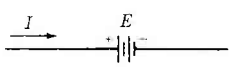
ولتاژ تولیدشده، E، با توجه به‌علامتهای P و Q معنی پیدا می‌کند. مسئله، عبارت ازجهت گذر توان است، به‌این‌معنی‌که به‌ازای یك‌ولتاژ و جریان مشخص، آیا توان تولید می‌شود یا جذب می‌شود.

در سیستم dc، مسئلهٔ دادن توان به‌مدار یا جذب توان از مدار، نسبتاً روشن است. رابطهٔ جریان و ولتاژ شکل ۲ـ۹ را، که درآن جریان dc از باتری می‌گذرد در نظر بگیرید. اگر $I=10\text{A}$ و $E=100\text{V}$ باشد، باتری با سرعت 1000W درحال شارژ شدن (جذب انرژی) است. درمقابل، درحالی‌که علامت پیکان همین‌جهت را نشان می‌دهد جریان ممکن است $I=-10\text{A}$ باشد. در این حالت، جهت قراردادی جریان عکس آن است که پیکان نشان می‌دهد، باتری درحال تخلیه‌شدن (دادن انرژی) است، و حاصل‌ضرب E و I، برابر -1000W است. اگر شکل ۲ـ۹ را چنان رسم‌کنیم‌که جریان درباتری از سرمثبت به‌سرمنفی بگذرد ظاهراً شارژ شدن باتری را نشان داده‌ایم، امـا این موضوع تنهادرصورتی‌صحیح است‌که E و I و در نتیجه توان محاسبه شده به‌صورت حاصل‌ضرب آنها مثبت باشد. با چنین رابطه‌ای بین E و I، علامت مثبت برای توان نشان دهندهٔ شارژ شدن باتری است.

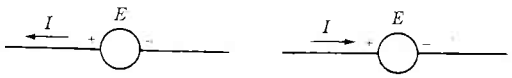
اگر جهت پیکان را درشکل ۲ـ۹، وارونه‌کنیم، علامت مثبت برای I و برای توان، نشان دهندهٔ تخلیه شدن باتری خواهد بود. بنابراین، نمودار مدار است‌کـه تعیین می‌کند علامت مثبت برای توان، نشان‌دهندهٔ شارژشدن باتری است یا تخلیه‌شدن آن. این‌توضیح، غیرضروری به نظر می‌رسد امـا از آن بـرای تعبیر روابط موجود در مـدار ac استفاده خواهیم‌کرد.

شکل۲ـ۱۰، منبع ولتاژ ایدئالی را (با دامنهٔ ثابت، فرکانس‌ثابت و امپدانس‌صفر) دریك سیستم ac نشان می‌دهد. نشانه‌های قطبداشت، طبق معمول، سری را نشان می‌دهد که در نیم‌سیکل مثبت ولتاژ لحظه‌ای، مثبت است. البته سری که بـا علامت مثبت مشخص شده است در طـی نیم‌سیکل منفی ولتاژ لحظه‌ای، در واقـع منفی است. عـلامت پیکان نیز، به‌همین‌ترتیب، جهت جریان را در طی نیم‌سیکل مثبت جریان لحظه‌ای نشان می‌دهد.

شکل ۲ـ۱۰ الف می‌بایست نشان دهندهٔ یك ژنراتور باشد زیرا جریان زمانی‌کـه ازسر با علامت مثبت بیرون می‌آید مثبت‌است. لیکن، سر با علامت مثبت ممکن است‌زمانی که جریان از آن بیرون می‌آید منفی باشد. برای درك این مسئله باید فـازبردار I را به دومؤلفه یکی در امتداد فازبردار E و دیگری قائم بر E تجزیه کرد. حاصل‌ضرب $|E|$ و اندازهٔ مؤلفهٔ جریان در امتداد E، عبارت است از P. حـاصل‌ضرب $|E|$ و اندازهٔ مؤلفهٔ جریان قائم بر E، عبات است از Q. اگر مؤلفهٔ I در امتداد E، بـا E همفاز باشد P،



شکل ۲ـ۹ ارائه dc شارژشدن باتری زمانی‌که E و I هردومثبت یا هردومنفی‌اند.



(الف) (ب)

شکل ۲ـ۱۰ نمودار مدار ac یك emf و جریان برای نمایش نشانه‌های قطبداشت.

توان تولیدی است که به‌سیستم تحویل داده می‌شود، زیرا این مؤلفهٔ جریان همیشه زمـانی از سر مثبت بیرون می‌آید که آن سر واقعاً مثبت باشد (و زمانی از آن سر وارد می‌شود که آن سر منفی باشد). در این حالت، P، قسمت حقیقی EI^*، مثبت است.

اگر مؤلفهٔ جریان در امتداد E، منفی باشد (180° با E اختلاف فاز داشته‌باشد)، توان جذب می‌شود و وضعیت، مربوط به‌یك موتور است. در این‌حالت، P، قسمت حقیقی EI^*، منفی می‌شود.

رابطهٔ جریان و ولتاژ ممکن است مطابق شکل ۲ـ۱۰ ب بـاشد، و شکل می‌تواند بیانگر یك موتور باشد. لیکن جذب توان متوسط تنها درحالتی صورت می‌پذیردکه مؤلفهٔ I در امتداد E، با E همفاز باشد (نه اینکه با E 180° اختلاف فاز داشته‌باشد) و به‌این ترتیب این مؤلفهٔ جریان همیشه درجهت افت پتانسیل‌است. دراین‌حالت، P، قسمت حقیقی EI^*، مثبت می‌شود. در اینجا P منفی نشان دهندهٔ توان تولیدی خواهد بود.

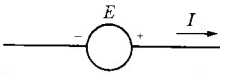
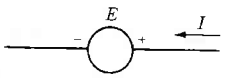
برای بـررسی علامت Q از شکل ۲ـ۱۱ کمك می‌گیریم. در شکل ۲ـ۱۱ الف، توان واکنشی مثبتی معادل $X|I|^2$ به اندوکتانس داده می‌شود،زیرا اندوکتانس، Q مثبت، جـذب می‌کند. پس I، 90° نسبت به E، پس‌افت دارد و Q، قسمت موهومی EI^*، مثبت است. در شکل ۲ـ۱۱ ب، توان واکنشی منفی باید به‌ظرفیت داده شود، یا به‌عبارت دیگر منبع E درحال دریافت Q مثبت از خازن است. در اینجا I، 90° نسبت به E، پیش‌افت دارد.

اگرجهت پیکان‌درشکل ۲ـ۱۱ الف عکس‌شود، I از E به اندازهٔ 90° پیش‌خواهد افتاد و قسمت موهومی EI^* منفی می‌شود. اندوکتانس را می‌توان دهندهٔ Q منفی، به جای گیرندهٔ Q مثبت، فرض کرد. جدول ۲ـ۱ این روابط را خلاصه می‌کند.

(الف) (ب)

شکل ۲ـ۱۱ emf متناوب‌اعمال‌شده (الف) به‌عنصر القایی‌خالص؛ (ب) به‌عنصرظرفیتی‌خالص.

جدول ۲-۱

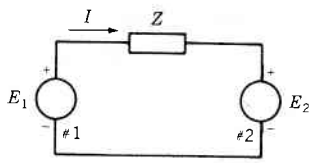
نمودار مداری	نتیجه از محاسبهٔ EI^*
 به‌فرض‌کار ژنراتور	اگر P، + باشد emf، توان تولید می‌کند اگر P، − باشد emf، توان مصرف می‌کند اگر Q، + باشد emf، توان واکنشی تولید می‌کند (I نسبت به E، پس‌افت دارد.) اگر Q، − باشد emf، توان واکنشی مصرف می‌کند (I نسبت به E پیش افت دارد.)
 به‌فرض کار موتور	اگر P، + باشد emf، توان مصرف می‌کند اگر P، − باشد emf، توان تولید می‌کند اگر Q، + باشد emf، توان واکنشی مصرف‌می‌کند (I نسبت به E پس‌افت دارد.) اگر Q، − باشد emf، توان واکنشی تولید می‌کند (I نسبت به E پیش‌افت دارد.)

مثال ۲-۱ دومنبع ولتاژ ایدئال که آنها را ماشینهای ۱ و ۲ می‌نامیم مطابق شکل ۲-۱۲ از طریق امپدانس Z به هم وصل شده‌اند. به فرض $E_1 = 100\angle 0^\circ$ V و $E_2 = 100\angle 30^\circ$ V و $Z = 0 + j5\ \Omega$، تعیین کنید (الف) آیا هر ماشین، تولیدکنندهٔ توان است یا مصرف کنندهٔ آن و به‌چه مقدار، (ب) آیا هر ماشین گیرندهٔ توان واکنشی است یا دهندهٔ آن و به‌چه مقدار، (ج) P و Q جذب‌شده امپدانس چقدر است.

حل:

$$I = \frac{E_1 - E_2}{Z} = \frac{100 + j0 - (86.6 + j50)}{j5}$$

$$= \frac{13.4 - j50}{j5} = -10 - j2.68 = 10.35\angle 195^\circ$$



شکل ۲-۱۲ منبع ولتاژهای ایدئال متصل به‌هم ازطریق امپدانس Z.

$$E_1 I^* = 100(-10 + j2.68) = -1000 + j268$$

$$E_2 I^* = (86.6 + j50)(-10 + j2.68)$$

$$= -866 + j232 - j500 - 134 = -1000 - j268$$

$$|I|^2 X = 10.35^2 \times 5 = 536 \text{ var}$$

با توجه به‌جهت جریان و نشانه‌های قطبداشت ممکن است انتظار برود که ماشین ۱، مولد باشد. اماچون P منفی و Q مثبت‌است، با توجه به‌جدول ۲–۱، ماشین درحال مصرف انرژی با سرعت ۱۰۰۰ W و دادن ۲۶۸ var توان واکنشی است. بنابراین ماشین در واقع، موتور است.

ماشین ۲ که انتظارمی‌رود یك‌موتور باشد، دارای P منفی و Q منفی‌است. درنتیجه، با توجه به‌جدول ۲–۱، این ماشین درحال تولید انرژی با سرعت ۱۰۰۰ W و دادن ۲۶۸ var توان واکنشی است. بنابراین این ماشین در واقع، ژنراتور است.

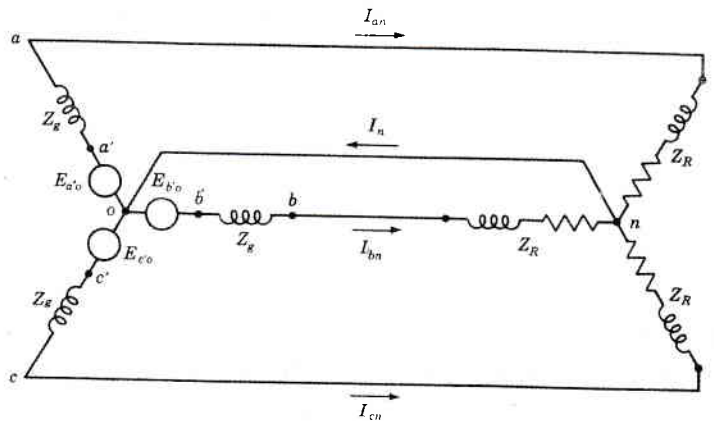
توجه‌کنیدکه توان واکنشی فراهم‌شده، ۵۳۶ var است‌که مورد نیاز رئکتانس‌القایی ۵ Ω است. چون امپدانس Z واکنشی خالص است، هیچ توان حقیقی مصرف نمی‌کند و تمام P تولیدشدهٔ ماشین ۲ به ماشین ۱ انتقال می‌یابد. □

۲–۸ ولتاژ و جریان در مدارهای سه‌فاز متعادل

سیستمهای قدرت الکتریکی را ژنراتورهای سه‌فاز تغذیه می‌کنند. این ژنراتورها معمولا بارهای سه‌فاز متعادل را، که در هرسه فاز، امپدانسهای یکسان دارند تغذیه می‌کنند. البته بارهای روشنایی و موتورهای کوچك تکفازند اما سیستمهای توزیع، طوری طرح ریزی می‌شوندکه نهایتاً فازهای سیستم تقریباً متعادل شود. شکل ۲–۱۳، ژنراتوری را با اتصال ستاره‌ای و نقطهٔ خنثای o نشان می‌دهد که یك بار متعادل ستاره‌ای با نقطهٔ خنثای n را تغذیه می‌کند. دربررسی این مدار فرض خواهیم‌کرد که امپدانسهای اتصالات بین سرهای ژنراتور و سرهای بار، همچنین امپدانس اتصال مستقیم بین نقاط o و n ناچیز است.

مدار معادل ژنراتور سه‌فاز، شامل یك محرکهٔ الکتریکی در هریك از سه فاز است که درشکل با دایره مشخص شده است. هر emf با یك مقاومت و رئکتانس القایی‌که امپدانس Z_g را تشکیل‌می‌دهند متوالی است. نقاط a' و b' و c' فرضی‌هستند، زیرا محرکهٔ الکتریکی تولیدشده را نمی‌توان از امپدانسهای هر فاز جدا کرد. سرهای ژنراتور، نقاط a و b و c است. این‌مدار معادل را در یکی از فصلهای بعدی بیشتر بررسی خواهیم کرد. محرکه‌های الکتریکی $E_{a'o}$، $E_{b'o}$، $E_{c'o}$ در ژنراتور از لحاظ اندازه مساوی‌اند اما اختلاف فاز ۱۲۰° نسبت به‌یکدیگر دارند. اگر اندازهٔ هریك ۱۰۰ ولت و $E_{a'o}$ مرجع فرض شود،

$$E_{a'o} = 100\angle 0^\circ \text{ V} \qquad E_{b'o} = 100\angle -240^\circ \text{ V} \qquad E_{c'o} = 100\angle 120^\circ \text{ V}$$



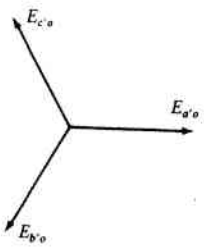
شکل ۲–۱۳ نمودار مداری ژنراتوری با اتصال ستاره‌ای متصل به یك بار ستاره‌ای متعادل.

واین درصورتی‌است‌که توالی فاز abc باشد، یعنی $E_{a'o}$ نسبت به $E_{b'o}$ به اندازهٔ 120° پیش‌افت، و $E_{b'o}$ نیز نسبت به $E_{c'o}$ به اندازهٔ 120° پیش‌افت داشته باشد. نمودار مدار، توالی فاز را نشان نمی‌دهد. اما شکل ۲–۱۴ این محرکه‌های الکتریکی را با توالی فاز abc نشان می‌دهد.

ولتاژ سرهای ژنراتور (که دراین مورد همان سرهای بار هم هستند) نسبت به‌نقطهٔ خنثی عبارت‌اند از

$$\begin{aligned} V_{ao} &= E_{a'o} - I_{an}Z_g \\ V_{bo} &= E_{b'o} - I_{bn}Z_g \\ V_{co} &= E_{c'o} - I_{cn}Z_g \end{aligned} \qquad (۲۴–۲)$$

چون o و n هم‌پتانسیل‌اند V_{ao}، V_{bo} و V_{co} به‌ترتیب با V_{an}، V_{bn} و V_{cn} برابرند وجریان خطها (که در اتصال ستاره‌ای جریان فازها هم هستند) عبارت‌اند از



شکل ۲–۱۴ نمودارفازبرداری محرکه‌های الکتریکی‌مدار نشان داده‌شده درشکل۲–۱۳.

$$I_{an}=\frac{E_{a'o}}{Z_g+Z_R}=\frac{V_{an}}{Z_R}$$
$$I_{bn}=\frac{E_{b'o}}{Z_g+Z_R}=\frac{V_{bn}}{Z_R} \qquad (۲-۲۵)$$
$$I_{cn}=\frac{E_{c'o}}{Z_g+Z_R}=\frac{V_{cn}}{Z_R}$$

چون $E_{a'o}$، $E_{b'o}$ و $E_{c'o}$ ازنظر اندازه با هم برابرند و ۱۲۰° نسبت به‌هم‌اختلاف فاز دارند و امپدانسهایی هم‌که این محرکه‌های الکتریکی‌می‌بینند یکسان‌اند، جریانها هم از لحاظ اندازه با هم مساوی و دارای ۱۲۰° اختلاف فاز نسبت به‌هم خواهند بود. این‌امر، برای V_{an}، V_{bn} و V_{cn} نیز درست است. در این‌صورت، ولتاژها و جریانها را متعادل می‌خوانیم. شکل ۲-۱۵ الف، سه جریان خط یك سیستم متعادل را نشان می‌دهد. شکل ۲-۱۵ ب نشان می‌دهد که مجموع این جریانها که یك مثلث بسته تشکیل می‌دهند صفر است. بنابراین در شکل ۲-۱۳، جریان I_n در اتصال بین نقاط خنثای ژنراتور و بار باید مساوی صفر باشد. پس اتصال بین نقاط n و o می‌تواند هر امپدانسی‌داشته باشد، یا حتی باز باشد، و باز هم نقاط n و o هم‌پتانسیل باقی خواهند ماند.

اگر بار نامتعادل باشد، مجموع جریانها صفر نخواهد شد و جریانی بین نقاط o و n برقرار خواهد شد. درحالت بار نامتعادل، در غیاب اتصال با امپدانس صفر، نقاط o و n هم‌پتانسیل نخواهند بود.

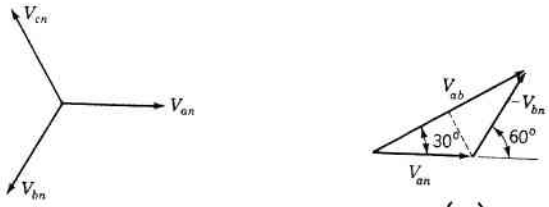
ولتاژهای خط به‌خط عبارت‌اند از V_{ab}، V_{bc} و V_{ca}. با دنبال‌کردن مسیری از a به b از طریق n درشکل ۲-۱۳ نتیجه می‌شود

$$V_{ab}=V_{an}+V_{nb}=V_{an}-V_{bn} \qquad (۲-۲۶)$$

اگرچه $E_{a'o}$ و V_{an} همفاز نیستند، می‌توان برای تعریف ولتاژها به‌جای $E_{a'o}$ ولتاژ مرجع

(الف) (ب)

شکل ۲-۱۵ نمودار فازبرداری جریانها در بارسه‌فاز متعادل؛ (الف) فازبردارها ازیك نقطهٔ مشترك رسم‌شده‌اند؛ (ب) جمع فازبردارها تشکیل مثلثی بسته‌می دهد.



شکل ۲ـ۱۶ ولتاژهای مدار سه فاز متعادل: (الف) ولتاژها نسبت به‌نقطهٔ خنثی؛ (ب) رابطهٔ بین ولتاژ خط و ولتاژ نسبت به‌نقطهٔ خنثی.

را V_{an} فرض کرد. شکل ۲ـ۱۶ الف، نمودار فازبرداری ولتاژهای سیستم را نسبت به‌نقطهٔ خنثی و شکل ۲ـ۱۶ب، چگونگی به‌دست آوردن V_{ab} را نشان می‌دهد. اندازهٔ V_{ab} عبارت است از

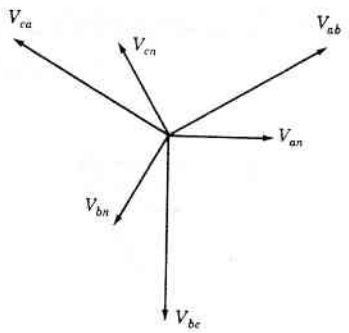
$$|V_{ab}| = ۲|V_{an}| \cos ۳۰^\circ$$

$$= \sqrt{۳}|V_{an}| \qquad (۲۷-۲)$$

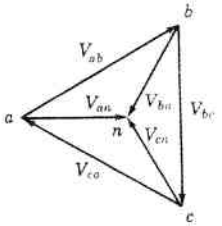
V_{ab} به‌عنوان یك فازبردار به اندازهٔ ۳۰° نسبت به V_{an} پیش‌افت دارد، و بنابراین

$$V_{ab} = \sqrt{۳} V_{an} \angle ۳۰^\circ \qquad (۲۸-۲)$$

ولتاژهای خط به‌خط دیگر نیز به همین ترتیب به‌دست می‌آیند. شکل ۲ـ۱۷، همه ولتاژهای خط به‌خط و ولتاژهای خط به‌خنثی را نشان می‌دهد. این حقیقت که اندازهٔ ولتاژهای خط به‌خط در هرمدار سه‌فاز متعادل، $\sqrt{۳}$ برابر اندازهٔ ولتاژهای خط به‌خنثی است، بسیار اهمیت دارد.



شکل ۲ـ۱۷ نمودار فازبرداری ولتاژها درمدار سه‌فاز متعادل.



شکل ۲-۱۸ روش دیگر رسم فازبردارهای شکل ۲-۱۷.

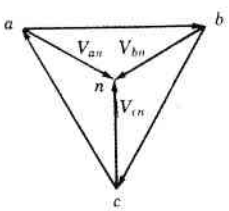
شکل ۲-۱۸، روش دیگر نمایش ولتاژهای خط به خط و خط به خنثی است. فازبردار ولتاژهای خط به‌خط به‌صورت یك مثلث بسته در تطابق بـا ولتاژ مرجع، یعنی V_{an}، رسم شده‌اند. رأسهای این مثلث طوری نامگذاری شده‌اند که هر فازبردار از رأسی شروع و بـه رأسی ختم می‌شود کـه بـا ترتیب زیرنوشتهای آن ولتاژ فازبرداری مطابقت دارد. فازبردار ولتاژهـای خط به خنثی از رأسهای مثلث به سمت مرکز آن رسم شده‌اند. این نمودار فازبرداری ـ اگر خوب فهمیده شود ـ آسان‌ترین راه برای تعیین ولتاژهای مختلف است.

ترتیب به‌دنبال هم آمدن رأسهای a، b و c، وقتی مثلث درجهت پادساعتگرد به‌دور n می‌چرخد مشخص کنندهٔ توالی فاز سیستم است. درآینده، زمانی‌که به‌بررسی مؤلفه‌های متقارن به‌عنوان وسیله‌ای بـرای تحلیل عیبهای نـامتعادل در سیستم قدرت می‌پردازیـم، نمونه‌ای از اهمیت توالی فاز را خواهیم دید.

می‌توان نمودار جریانها را نیزجداگانه رسم کرد تا موقعیت جریان هرفاز را نسبت به ولتاژ مربوطه‌اش نشان می‌دهد.

مثال ۲-۲ در مدار سه فـاز متعادلی ولتاژ V_{ab} برابر $۲۷۳ر۲ \angle ۰^\circ$ V است. همهٔ ولتاژها و جریانها را در یك بار اتصال‌ستاره‌ای بـا امپدانس $Z_L = ۱۰ \angle ۲۰^\circ\ \Omega$ تعیین کنید. توالی فاز، abc فرض می‌شود.

حل: نمودار فازبرداری ولتاژها را مطابق شکل ۲-۱۹ رسم می‌کنیم کـه از آن ولتاژهای مختلف چنین تعیین می‌شوند



شکل ۲-۱۹ نمودار فازبرداری ولتاژهای مثال ۲-۲.

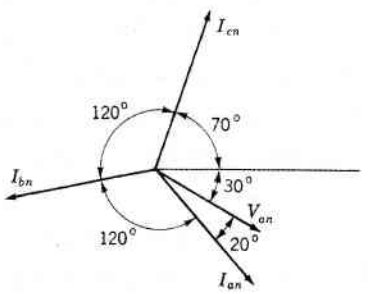
$$V_{ab} = ۱۷۳ر۲ \angle ۰^\circ \text{V} \qquad V_{an} = ۱۰۰ \angle -۳۰^\circ \text{V}$$
$$V_{bc} = ۱۷۳ر۲ \angle ۲۴۰^\circ \text{V} \qquad V_{bn} = ۱۰۰ \angle ۲۱۰^\circ \text{V}$$
$$V_{ca} = ۱۷۳ر۲ \angle ۱۲۰^\circ \text{V} \qquad V_{cn} = ۱۰۰ \angle ۹۰^\circ \text{V}$$

جریان هرفاز بار نسبت به ولتاژ دوسر آن ۲۰° پس‌افت دارد، و اندازهٔ هـر یك از جریانها ۱۰A است. شکل ۲ـ۲۰، نمودار فازبرداری جریانها را نشان می‌دهد

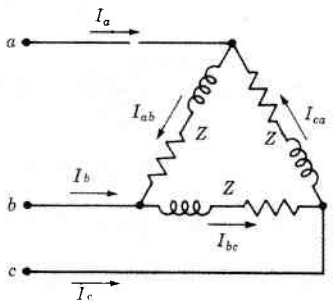
□ $I_{an} = ۱۰ \angle -۵۰^\circ \text{A} \qquad I_{bn} = ۱۰ \angle ۱۹۰^\circ \text{A} \qquad I_{cn} = ۱۰ \angle ۷۰^\circ \text{A}$

بارهای متعادل غالباً به‌صورت △ (مثلثی) متصل می‌شوند، همچنانکه درشکل ۲ـ۲۱ دیده می‌شود. می‌توان نشان دادکه اندازهٔ جریان هرخط مثلا I_a مساوی $\sqrt{۳}$ برابر اندازهٔ جریان هرفاز مثلا I_{ab} است و I_a زمانی کـه توالی فاز، abc است به اندازهٔ ۳۰° نسبت به I_{ab} پس‌افت دارد.

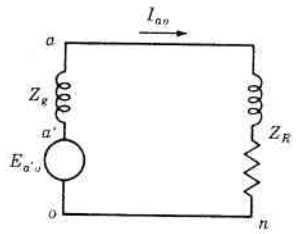
هنگام حل مدارهای سه‌فاز متعادل، هیچ‌گاه لازم‌نیست همهٔ مدار سه‌فاز شکل ۲ـ۱۳



شکل ۲ـ۲۰ نمودار فازبرداری جریانها برای مثال ۲ـ۲.



شکل ۲ـ۲۱ نمودارمداری بار سه‌فاز اتصال‌مثلثی.



شکل ۲ـ۲۲ یك‌فاز از مدار شکل ۲ـ۱۳.

را درنظر بگیریم. برای حل مدار، فرض می‌شود که سیم خنثایی بـا امپدانس صفر وجود دارد که مجموع جریانهای سه‌فاز را، کـه البته در مدار متعادل صفر است، از خود عبور می‌دهد. حل مدار از طریق اعمال قانون ولتاژ کیرشهف به مسیر بسته‌ای شامل یك فاز و سیم خنثی صورت می‌گیرد. چنین مسیر بسته‌ای درشکل ۲ـ۲۲ دیده می‌شود. این مدار، معادل تکفاز مدار شکل ۲ـ۱۳ است. محاسبات انجام شده بـرای این مسیر، با توجه به اینکه جریانهای دوفاز دیگر از نظر اندازه با جریان فاز محاسبه‌شده برابرند و ۱۲۰° و ۲۴۰° با آن اختلاف فاز دارند، به‌کل‌مدار سه‌فاز بسط داده می‌شود. اهمیتی ندارد که بار سه‌فاز متعادل که با ولتاژ خط به خط، توان کل و ضریب توانش مشخص می‌شود اتصال ـ مثلثی یا اتصال‌ـستاره‌ای بـاشد. زیرا به‌جای مثلث، همیشه می‌تـوان در انجـام محاسبات، ستارهٔ معادلش را گـذاشت. امپدانس هرفاز ستارهٔ معادل، یك سوم امپدانس هرفاز مثلث تبدیل شده است.

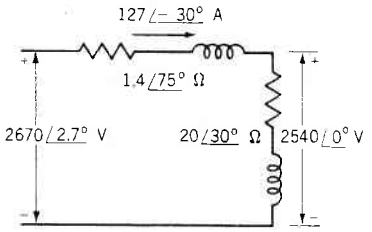
مثال ۲ـ۳ ولتاژ خط به‌خط دوسرباری اتصال‌ـ ستاره‌ای که از سه امپدانس مساوی $۲۰\angle ۳۰°\ \Omega$ تشکیل شده $۴ر۲\ \mathrm{kV}$ است. امپدانس هریك از سه‌خطی که بار را به‌شینه‌ای واقـع در یك پست برق وصل می‌کنند $Z_L = ۱ر۴\angle ۷۵°\ \Omega$ است. ولتاژ خط به‌خط را در شینهٔ پست برق به‌دست آورید.

حل: اندازهٔ ولتاژخط به‌خنثی درسرباری، $۴۴۰۰/\sqrt{۳} = ۲۵۴۰\mathrm{V}$ است. اگر V_{an}، ولتاژ بین سرهای بار را مرجع بگیریم،

$$V_{an} = ۲۵۴۰\angle ۰°\mathrm{V} \quad و \quad I_{an} = \frac{۲۵۴۰\angle ۰°}{۲۰\angle ۳۰°} = ۱۲۷ر۰\angle -۳۰°\mathrm{A}$$

ولتاژ خط به‌خنثی در پست برق عبارت است از

$$\begin{aligned} V_{an} + I_{an}Z_L &= ۲۵۴۰\angle ۰° + ۱۲۷\angle -۳۰° \times ۱ر۴\angle ۷۵° \\ &= ۲۵۴۰\angle ۰° + ۱۷۷ر۸\angle ۴۵° \\ &= ۲۶۶۶ + j۱۲۵ر۷ = ۲۶۷۰\angle ۲ر۷۰°\mathrm{V} \end{aligned}$$



شکل ۲-۲۳ نمودار مدار و مقادیر مسئلهٔ ۲-۳. □

و اندازهٔ ولتاژ خط به‌خط در شینهٔ پست برق عبارت است از

$$\sqrt{۳} \times ۲۶۷ = ۴۶۲ \text{ kV}$$

شکل ۲-۲۳، مدار و مقادیر مربوط به‌آن را نشان می‌دهد.

۲-۹ توان در مدارهای سه‌فاز متعادل

کل توانی که ژنراتور سه فاز می‌دهد و یا بار سه فاز می‌گیرد به‌سادگی با جمع کردن توانهای فازها به‌دست می‌آید. درمدار متعادل، چون توان فازها برابر است، می‌توان توان کل را ازضرب کردن توان یك‌فاز در ۳ به‌دست آورد.

اگر اندازهٔ ولتاژهای خط به‌خنثی، V_p، برای بار اتصال-ستاره‌ای چنین باشد

$$V_p = |V_{an}| = |V_{bn}| = |V_{cn}| \qquad (۲-۲۹)$$

و اگر اندازهٔ جریان فاز I_p برای بار اتصال-ستاره‌ای عبارت باشد از

$$I_p = |I_{an}| = |I_{bn}| = |I_{cn}| \qquad (۲-۳۰)$$

توان کل سه‌فاز عبارت است از

$$P = ۳V_p I_p \cos\theta_p \qquad (۲-۳۱)$$

که در آن θ_p، زاویهٔ پس‌افت جریان فاز نسبت به ولتاژ فاز، یعنی زاویهٔ امپدانس هر فاز است. اگر V_L و I_L به‌ترتیب اندازه‌های ولتاژ خط به‌خط و جریان خط باشند،

$$V_p = \frac{V_L}{\sqrt{۳}} \quad ، I_p = I_L \qquad (۲-۳۲)$$

با گذاردن آنها در معادلهٔ (۲-۳۱) خواهیم داشت

$$P = \sqrt{۳} V_L I_L \cos\theta_p \qquad (۲-۳۳)$$

توان واکنشی کل نیز عبارت است از

$$Q=3V_pI_p\sin\theta_p \qquad (۳۴-۲)$$

$$Q=\sqrt{3}V_LI_L\sin\theta_p \qquad (۳۵-۲)$$

و توان ظاهری بار عبارت است از

$$|S|=\sqrt{P^2+Q^2}=\sqrt{3}V_LI_L \qquad (۳۶-۲)$$

معادله‌های (۲-۳۳)، (۲-۳۵) و (۲-۳۶) معادله‌های معمول برای محاسبهٔ P، Q و $|S|$ درشبکه‌های سه‌فاز متعادل‌اند، زیرا مقادیر معلوم شبکه معمولا ولتاژ خط به‌خط، جریان خط، و ضریب توان یعنی $\cos\theta_p$ است. هنگام صحبت از یك سیستم سه‌فاز، فرض برمتعادل‌بودن سیستم است. مگراینکه توضیحی به‌جزاین داده شود و مراد ازولتاژ، جریان و توان، ولتاژ خط به‌خط، جریان خط و توان کل‌سه‌فاز است مگراینکه هویتی‌دیگر به‌آنها داده شود.

اگر بار، اتصال-مثلثی باشد ولتاژ بین سرهای هر امپدانس، همان ولتاژ خط به‌خط و جریان هرامپدانس برابر با اندازه جریان خط تقسیم بر $\sqrt{3}$ است، یا

$$V_p=V_L \quad ، \quad I_p=\frac{I_L}{\sqrt{3}} \qquad (۳۷-۲)$$

توان کل سه‌فاز عبارت است از

$$P=3V_pI_p\cos\theta_p \qquad (۳۸-۲)$$

و با گذاردن مقادیر V_p و I_p از معادلهٔ (۲-۳۷) در این معادله خواهیم داشت

$$P=\sqrt{3}V_LI_L\cos\theta_p \qquad (۳۹-۲)$$

که همان معادلهٔ (۲-۳۳) است. پس نتیجه می‌گیریم که معادله‌های (۲-۳۵) و (۲-۳۶) نیز صرف‌نظر از اینکه یك‌بار خاص، اتصال-مثلثی باشد یا اتصال-ستاره‌ای،معتبرند.

۲-۱۰ مقادیر در-یکی

در سطوح ولتاژ کار خطهای انتقال قدرت، مناسبترین واحد برای بیان ولتاژ، کیلوولت است. واحد سنجش توان نیز، به‌علت حجم بسیار زیاد توان انتقالی، معمولا کیلووات یا مگاوات وکیلوولت‌آمپر یا مگاولت‌آمپراست. لیکن‌این کمیتها، وهمچنین‌جریان و امپدانس، غالباً به‌صورت درصدی یا در-یکی مقداری مبنا یا مرجع که برای هریك مشخص می‌کنند بیان می‌شوند. برای مثال، اگر ولتاژ مبنا برابر ۱۲۰ kV انتخاب شود، ولتاژهای ۱۰۸،

۱۲۰ و ۱۲۶ کیلوولت به‌ترتیب ۹۰، ۱۰۰ و ۱۰۵ درصد و یا ۰٫۹، ۱ و ۱٫۰۵ در-یک می‌شوند. مقدار در-یکی هر کمیت به‌صورت عددی اعشاری که نسبت آن کمیت به مقدار مبنایش است تعریف می‌شود. همین نسبت برحسب درصد، ۱۰۰ برابر مقدارش برحسب در-یک است. هردوروش در-یکی و درصدی برای انجام محاسبات از به‌کارگیری مقادیر واقعی جریانها، ولتاژها و امپدانسها ساده‌ترند. مزیت روش در-یکی نسبت به‌روش درصدی این است که حاصل‌ضرب دو کمیت که برحسب در-یک بیان شده‌اند خود نیز برحسب در-یک خواهد بود، درصورتی که حاصل‌ضرب دو کمیت که برحسب درصد بیان شده‌اند را باید بر ۱۰۰ تقسیم کرد تا حاصل برحسب درصد شود.

ولتاژ، جریان، کیلوولت آمپر و امپدانس طوری به‌هم وابسته‌اند که انتخاب مقادیر مبنا برای هردو کمیتی از آنها مقادیر مبنا را برای دوتای دیگر تعیین خواهد کرد. اگر مقادیر مبنای ولتاژ و جریان را مشخص کنیم، مقادیر مبنای کیلوولت آمپر و امپدانس را می‌توان از روی آنها تعیین کرد. امپدانس مبنا چنان امپدانسی است که اگر جریان مبنا از آن بگذرد افت ولتاژ در آن برابر ولتاژ مبنا باشد. کیلوولت آمپر مبنا در سیستمهای تکفاز برابر است با حاصل‌ضرب ولتاژ مبنا برحسب کیلوولت و جریان مبنا برحسب آمپر. معمولا مگاولت آمپر مبنا و ولتاژ مبنا برحسب کیلوولت مقادیری هستند که به عنوان مبنا انتخاب می‌شوند. برای سیستمهای تکفاز، یا سیستمهای سه‌فازی که در آنها مراد از جریان، ولتاژ و کیلوولت آمپر؛ جریان خط، ولتاژ خط به‌خنثی و کیلوولت آمپر هرفاز است رابطه‌های زیر بستگی این مقادیر را به‌هم نشان می‌دهد.

$$\text{جریان مبنا} = \frac{\text{مبنا } \mathrm{kVA}_{1\phi}}{\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LN}} \mathrm{A} \qquad (۲-۴۰)$$

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{\text{مبنا } \mathrm{V}_{LN}}{\text{جریان مبنا}} \Omega \qquad (۲-۴۱)$$

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LN})^2 \times 1000}{\text{مبنا } \mathrm{kVA}_{1\phi}} \Omega \qquad (۲-۴۲)$$

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(\mathrm{kV}_{LN})^2}{\text{مبنا } \mathrm{MVA}_{1\phi}} \Omega \qquad (۲-۴۳)$$

$$\text{توان مبنا} = \text{مبنا } \mathrm{kVA}_{1\phi} \quad \mathrm{KW}_{1\phi} \qquad (۲-۴۴)$$

$$\text{توان مبنا} = \text{مبنا } \mathrm{MVA}_{1\phi} \quad \mathrm{MW}_{1\phi} \qquad (۲-۴۵)$$

$$\text{امپدانس در-یکی هر عنصر مدار} = \frac{\text{امپدانس واقعی}}{\text{امپدانس مبنا}} \qquad (۲-۴۶)$$

در این معادله‌ها وقتی برای مدارهای سه‌فاز به‌کار می‌روند، زیرنوشتهای 1ϕ و LN به‌ترتیب

به‌مفهوم «هرفاز» و «خط به‌خنثی» خواهند بود. اگر این معادله‌ها بـرای مدارهای تکفاز به‌کار روند، kV_{LN} به معنی ولتاژ خط تکفاز، یا اگر یك طرف زمین شده باشد بـه معنی ولتاژ خط به زمین خواهدبود.

چون مدارهای سه‌فاز به‌صورت یك تك‌خط با برگشت خنثی حل می‌شوند، مبناهای مقادیر در نمودار امپدانس عبارت است از کیلوولت آمپر هرفاز وکیلوولت خط به‌خنثی. داده‌هـای سیستم معمولا به‌صورت کیلوولت آمپر یـا مگاولت آمپر کـل سه‌فاز وکیلوولت خط به‌خط است. این سنت، یعنی مشخص کردن کیلوولت آمپر یا مگاولت آمپر سه‌فاز وکیلو ولت خط به‌خط ممکن است بـاعث سردرگمی در رابطهٔ بین مقدار در-یکی ولتاژ خط و مقدار در-یکی ولتاژ فازشود. اگرچه‌می‌توان ولتاژ خط را به‌عنوان‌ولتاژ مبنا مشخص کرد، لیکن این ولتاژ نسبت به خنثی است کـه برای حل مدار تکفاز به‌کار می‌آید. مقدار مبنای ولتاژ خط به خنثی بـرابـر است با مقدار مبنای ولتاژ خط بـه خط تقسیم بـر $\sqrt{۳}$. امـا چون‌همین‌نسبت هم‌بین ولتاژهای‌خط به‌خط خنثای‌سیستم سه‌فازمتعادل برقرار است، در یك سیستم سه‌فاز متعادل، مقدار در-یکی ولتاژ خط بـه خنثی در هـر نقطه بر مبنای ولتاژ خط بـه خنثی برابر است بـا مقدار در-یکی‌ولتاژ خط بـه خط در همان نقطه بـرمبنای ولتاژ خط به‌خط. به‌همین ترتیب، کیلوولت‌آمپر سه فاز، سه‌برابر کیلوولت‌آمپر هرفاز و مبنای کیلوولت‌آمپر سه‌فـاز نیز سه برابر مبنای‌کیلوولت آمپر هـرفـاز است. بنابراین، مقدار در-یکی کیلوولت‌آمپر سه فاز بر مبنای کیلوولت‌آمپر سه‌فاز، بـرابـراست بـامقدار در-یکی کیلوولت‌آمپر هرفاز برمبنای کیلوولت‌آمپر هرفاز.

مثالی عددی می‌تواند به‌روشن‌کردن روابط مورد بحث کمك کند. برای مثال، اگر

$$\text{مبنا } kVA_{۳\phi} = ۳۰۰۰۰ \text{ kVA}$$

و

$$\text{مبنا } kV_{LL} = ۱۲۰ \text{ kV}$$

که در آنها زیرنوشتهای ۳ϕ و LL به‌ترتیب «سه‌فاز» و «خط به‌خط» معنیٔ می‌دهد

$$\text{مبنا } kVA_{۱\phi} = \frac{۳۰۰۰۰}{۳} = ۱۰۰۰۰ \text{ kVA}$$

و

$$\text{مبنا } kV_{LN} = \frac{۱۲۰}{\sqrt{۳}} = ۶۹٫۲ \text{ kV}$$

بـرای ولتاژ واقعی خط به خط ۱۰۸ kV، ولتاژ خط به خنثی $۱۰۸/\sqrt{۳} = ۶۲٫۳$ kV است، و

$$\text{ولتاژ در-یکی} = \frac{۱۰۸}{۱۲۰} = \frac{۶۲٫۳}{۶۹٫۲} = ۰٫۹۰$$

برای توان کل سه‌فاز ۱۸۰۰۰ kW، توان هرفاز ۶۰۰۰ kW است، و

$$\text{توان در-یکی} = \frac{۱۸۰۰۰}{۳۰۰۰۰} = \frac{۶۰۰۰}{۱۰۰۰۰} = ۰٫۶$$

البته در این بحث می‌توان به‌جای مقادیر کیلووات، وکیلوولت‌آمپر، مقادیر مگاوات و مگاولت‌آمپر گذاشت. در سیستمهای سه‌فاز، مقداری که برای ولتاژ مبنا داده می‌شود ولتاژ خط به‌خط و مقداری که برای کیلوولت‌آمپر یا مگاولت‌آمپر مبنا داده می‌شود کیلوولت‌آمپر یا مگاولت‌آمپر مبنای کل سه‌فاز است مگر اینکه خلاف اینها ذکر شود.

امپدانس مبنا و جریان مبنا را می‌توان مستقیماً از روی مقادیر سه فاز کیلوولت مبنا و کیلوولت‌آمپر مبنا محاسبه کرد. اگر کیلوولت آمپر مبنا و ولتاژ مبنا برحسب کیلوولت را کیلوولت آمپر مبنای کل سه‌فاز و ولتاژ مبنای خط به خط معنی کنیم، خواهیم داشت

$$\text{جریان مبنا} = \frac{\text{مبنا } \mathrm{kVA}_{3\phi}}{\sqrt{۳} \times (\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LL})} \qquad (۲-۴۷)$$

و از معادلهٔ (۲-۴۲)

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LL}/\sqrt{۳})^{۲} \times ۱۰۰۰}{\text{مبنا } \mathrm{kVA}_{3\phi}/۳} \qquad (۲-۴۸)$$

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LL})^{۲} \times ۱۰۰۰}{\text{مبنا } \mathrm{kVA}_{3\phi}} \qquad (۲-۴۹)$$

$$\text{امپدانس مبنا} = \frac{(\text{مبنا } \mathrm{kV}_{LL})^{۲}}{\text{مبنا } \mathrm{MVA}_{3\phi}} \qquad (۲-۵۰)$$

به‌جز درمورد زیرنوشتها، معادله‌های (۲-۴۲) و (۲-۴۳) به‌ترتیب، درست‌همان‌معادله‌های (۲-۴۹) و (۲-۵۰) اند. کاربرد زیرنوشت، در این‌روابط، برای تأکید بروجه‌تمایز بین کار با مقادیر سه‌فاز وکار با مقادیر تکفاز است. ما این معادله‌ها را بدون زیرنوشت به‌کار خواهیم برد، اما باید (۱) کیلوولت خط به‌خط را همراه باکیلوولت‌آمپر یا مگاولت‌آمپر سه‌فاز و (۲) کیلوولت خط به‌خنثی را همراه با کیلوولت‌آمپر یا مگاولت‌آمپر هرفاز به‌کارگیریم. معادلهٔ (۲-۴۰)، جریان مبنا را برای سیستمهای تکفاز یا برای سیستمهای سه‌فازی که درآنها مبناها به‌صورت کیلوولت‌آمپر هرفاز وکیلوولت خط به‌خنثی مشخص شده‌اند تعیین می‌کند. معادلهٔ (۲-۴۷)، جریان مبنا را برای سیستمهای سه‌فازی که درآنها مبناها به صورت کیلوولت‌آمپر کل سه‌فاز و کیلوولت خط به خط مشخص شده‌اند تعیین می‌کند.

مثال ۲-۴ مثال ۲-۳ را درسیستم در-یکی با استفاده ازمبنای ۴٫۴ kV و ۱۲۷A

حل کنید به‌طوری که اندازه‌های هم‌ولتاژ و هم‌جریان pu ۱ شود. در اینجا به‌جای کیلوولت‌آمپر از جریان به‌عنوان مبنا استفاده شده است زیرا در این‌مسئله با کیلوولت آمپر سروکار نداریم.

حل: امپدانس مبنا عبارت است از

$$\frac{۴۴۰۰/\sqrt{۳}}{۱۲۷} = ۲۰ر۰\,\Omega$$

و به‌این‌ترتیب اندازهٔ امپدانس بارهم pu ۱ است. امپدانس خط عبارت است از

$$Z = \frac{۱ر۴\ \angle ۷۵^\circ}{۲۰} = ۰ر۰۷\ \angle ۷۵^\circ\ \text{pu}$$

$$V_{an} = ۱ر۰\angle ۰^\circ + ۱ر۰\angle -۳۰^\circ \times ۰ر۰۷\angle ۷۵^\circ$$
$$= ۱ر۰\angle ۰^\circ + ۰ر۰۷\angle ۴۵^\circ$$
$$= ۱ر۰۴۹۵ + j۰ر۰۴۹۵ = ۱ر۰۵۱\ \angle ۲ر۷۰^\circ\ \text{pu}$$

$$V_{LN} = ۱ر۰۵۱ \times \frac{۴۴۰۰}{\sqrt{۳}} = ۲۶۷۰\ \text{V}, \quad \text{یا} \quad ۲ر۶۷\ \text{kV}$$

$$V_{LL} = ۱ر۰۵۱ \times ۴ر۴ = ۴ر۶۲\ \text{kV} \qquad \square$$

وقتی مسائلی که باید حل کرد پیچیده‌تر باشند و به‌ویژه وقتی ترانسفورماتور نیز مطرح شود مزیتهای محاسبه در-یکی روشن‌تر خواهد شد.

۲-۱۱ تغییر مبنا در مقادیر در-یکی

گاهی امپدانس در-یکی عنصری از یك سیستم با مبنایی غیر از مبنای انتخاب شده برای آن بخش از سیستم که عنصر مذکور در آن قرارداد داده می‌شود. چون در هنگام انجام محاسبه، همهٔ امپدانسهای تمام اجزای یك سیستم باید در یك مبنا بیان شوند، لازم است بتوانیم امپدانسهای در-یکی را از یك مبنا به‌مبنایی‌دیگر تبدیل کنیم. گذاردن مقدار امپدانس مبنا از معادلهٔ (۲-۴۲) یا (۲-۴۹) در معادلهٔ (۲-۴۶) نتیجه می‌دهد

$$\text{امپدانس در-یکی هرعنصر مدار} = \frac{(\text{امپدانس واقعی})\,(\text{مبنا kVA})}{(\text{مبنا kV})^2 \times ۱۰۰۰} \qquad (۲-۵۱)$$

که نشان می‌دهدکه امپدانس در-یکی مستقیماً با کیلوولت‌آمپرمبنا و معکوساً با مربع‌ولتاژ مبنامتناسب‌است. بنابراین، برای تغییرمبنای امپدانس در-یکی،معادلهٔ زیر به‌کار می‌رود:

$$\left(\frac{\text{جدید kVA مبنا}}{\text{داده‌شده kVA مبنا}}\right)\left(\frac{\text{داده‌شده kV مبنا}}{\text{جدید kV مبنا}}\right)^{2} \text{داده‌شده } Z \text{ در-یکی} = \text{جدید } Z \text{ در-یکی} \qquad (۵۲-۲)$$

این معادله هیچ ارتباطی با انتقال مقدار اهمی امپدانس از یک‌سوی ترانسفورماتور به‌سوی دیگر آن ندارد، بلکه تنها برای تبدیل امپدانس در-یکی داده شده بـا مبنایی جدید به‌کار می‌رود.

البته برای تغییر مبنا می‌توان، به‌جای استفاده از معادلـهٔ (۲-۵۲)، از روی مقدار در-یکی با مبنای داده شده مقدار اهمی امپدانس را محاسبه وسپس آن را بر امپدانس مبنای جدید تقسیم کرد.

مثال ۲-۵ رئکتانس یک ژنراتور کـه بـا X'' مشخص‌شده بـا مبنای ۱۸ kV و ۵۰۰ MVA، کـه مقادیر نامی پلاک مشخصات ژنراتورند بـه صورت ۰٫۲۵ pu داده شده است. مبنای انجام محاسبات ۲۰ kV و ۱۰۰ MVA است. X'' را در مبنای جدیـد به‌دست آورید.

حل: با استفاده از معادلهٔ (۲-۵۲)

$$X'' = ۰٫۲۵\left(\frac{۱۸}{۲۰}\right)^{۲}\left(\frac{۱۰۰}{۵۰۰}\right) = ۰٫۰۴۰۵ \text{ pu}$$

یا با محاسبهٔ مقدار اهمی X'' و تقسیم آن بر امپدانس مبنای جدید

$$X'' = \frac{۰٫۲۵(۱۸^{۲}/۵۰۰)}{۲۰^{۲}/۱۰۰} = ۰٫۰۴۰۵ \text{ pu} \qquad \square$$

مقاومت رئکتانس درصدی یا در-یکی هر دستگاه را معمولا تولیدکننده در اختیار ما قرار می‌دهد. البته، مبنای مقادیر داده‌شده، کیلوولت‌آمپر وکیلوولت نـامی دستگاه است. جـدولهای پ-۴ و پ-۵ در پیوست کتاب، بعضی مقادیر نمونه‌وار را بـرای رئکتانس ژنراتورها و ترانسفورماتورها به‌دست می‌دهند. درفصل ۶، هنگام بررسی ترانسفورماتور، بحث دربارهٔ مقادیر در-یکی را دنبال خواهیم کرد.

مسائل

۲-۱ درمداری $v = ۱۴۱٫۴ \sin(\omega t + ۳۰^\circ)$ V و $i = ۱۱٫۳۱ \cos(\omega t - ۳۰^\circ)$ A. بـرای این کمیات مطلوب است تعیین (الف) مقدار مـاکزیمم، (ب) مقدار مؤثر، و (ج) عبارت فـازبرداری درشکل قطبی و متعامد درصورتی که ولتاژ، مرجع فرض شود. آیـا مدار، القایی است یا ظرفیتی؟

۲-۲ اگر مدار مسئلهٔ ۲-۱ از یك عنصر مقاومتی خالص و یك عنصر واکنشی خالص تشکیل شده باشد، R و X را پیدا کنید (الف) درصورتی‌که این عناصر با هم متوالی باشند، (ب) درصورتی‌که این عناصر با هم موازی باشند.

۲-۳ در یك مدار تکفاز نسبت به گره مرجع o، $V_a = 120 \angle 45^\circ$ V و $V_b = 100 \angle -15^\circ$ V. V_{ba} را درشکل قطبی به‌دست آورید.

۲-۴ یك ولتاژ ac تکفاز ۲۴۰V به مداری متوالی دارای امپدانس $10 \angle 60^\circ \Omega$ اعمال می‌شود. R، X، P، Q و ضریب توان مدار را به‌دست آورید.

۲-۵ اگر خازنی با مدار مسئلهٔ ۲-۴ موازی باشد، و اگر این خازن ۱۲۵۰ var تولید کند، P و Q تولیدشدهٔ منبع ۲۴۰ ولتی و ضریب توان کل مدار را به‌دست آورید.

۲-۶ بار القایی تکفازی، توانی معادل ۱۰ MW با ضریب توان ۰٫۶ پس‌افتی جذب می‌کند. مثلث توان را رسم کنید و توان واکنشی خازنی را تعیین کنید که باید موازی با این بار بسته شود تا ضریب توان به ۰٫۸۵ افزایش یابد.

۲-۷ موتور القایی تکفازی قسمت اعظم هر روز را با باری بسیار سبك کار می‌کند و ۱۰A جریان از شبکه می‌کشد. وسیله‌ای پیشنهاد می‌شود تا بازدهی موتور را افزایش دهد. درطی یك آزمایش، این وسیله با موتور موازی می‌شود و جریان کشیده‌شده از شبکه را به ۸ A کاهش می‌دهد. زمانی که دوعدد از این وسیله‌ها را با موتور موازی می‌کنیم، جریان به ۶A کاهش می‌یابد. چه وسیلهٔ ساده‌ای می‌تواند باعث این کاهش جریان شود؟ در مورد مزیتهای این وسیله بحث کنید. آیا این وسیله، بازدهی موتور را افزایش می‌دهد؟ (به‌خاطر داشته باشید که موتور القایی جریان پس‌افتی از شبکه می‌کشد).

۲-۸ اگر امپدانس بین ماشینهای ۱ و ۲ درمثال ۲-۱، $Z = 0 - j5\ \Omega$ باشد تعیین کنید (الف) آیا هرکدام ازماشینها توان تولید می‌کند یامصرف و به‌چه مقدار (ب) آیا هرکدام از ماشینها توان واکنشی مثبت دریافت می‌کند یا تحویل می‌دهد و به‌چه‌مقدار، و (ج) مقدار P و Q مصرفی هر امپدانس را.

۲-۹ مسئلهٔ ۲-۸ را به‌فرض $Z = 5 + j0\ \Omega$ تکرار کنید.

۲-۱۰ از منبع ولتاژ $E_{an} = 120 \angle 210^\circ$ V، جریان $I_{na} = 10 \angle 60^\circ$ A می‌گذرد. مقادیر P و Q را به‌دست آورید و معین کنید که منبع این مقادیر را تحویل می‌دهد یا دریافت می‌کند.

۲-۱۱ مثال ۲-۱ را به‌فرض $E_1 = 100 \angle 0^\circ$ V و $E_2 = 120 \angle 30^\circ$ V حل کنید. نتایج را با مثال ۲-۱ مقایسه کنید. تغییر اندازهٔ E_2 در این مدار چه نتایجی به‌بار می‌آورد؟

۲-۱۲ سه امپدانس یکسان $10 \angle -15^\circ \Omega$ به‌صورت ستاره‌ای به‌یك ولتاژ سه‌فاز متعادل

۲۰۸V خط به‌خط متصل شده‌اند. فازبردارهای همهٔ ولتاژها و جریانهای خط و فاز را به‌صورت قطبی، هرگاه V_{ca}، مرجع و توالی فاز abc باشد به‌دست آورید.

۲-۱۳ در سیستم سه‌فاز متعادلی سه امپدانس یکسان $10\angle 30^\circ\ \Omega$، اتصال ستاره‌ای دارند. به‌ازای $V_{bc} = 416\angle 90^\circ\ V$، I_{cn} را به‌صورت قطبی مشخص کنید.

۲-۱۴ سرهای یک‌منبع سه‌فاز باحروف a، b و c مشخص شده‌اند. یک‌ولت‌سنج بین‌هرجفت از این سرها ۱۱۵V نشان می‌دهد. یک‌مقاومت ۱۰۰ Ω متوالی با یک خازن ۱۰۰ Ω در فرکانس شبکه بین a و b وصل شده‌اند، طوری‌که مقاومت به‌سر a وصل‌است. نقطهٔ اتصال این دوعنصر به یکدیگر n نامگذاری شده است. با روش ترسیمی، خواندهٔ ولت‌سنج را بین نقاط c و n، برای توالی فاز abc و توالی فاز acb تعیین کنید.

۲-۱۵ تعیین کنید یک‌موتور سه‌فاز ۱۵-hp وقتی در بار کامل، بازدهی ۹۰٪، و ضریب توان پس‌افتی ۸۰٪ کار می‌کند چه جریانی از یک خط سه‌فاز ۴۴۰V می‌کشد. مقادیر P و Q کشیده شده از خط را نیز به‌دست آورید.

۲-۱۶ اگر امپدانس هریک از سه‌خطی که موتور مسئلهٔ ۲-۱۵ را به شبینه وصل می‌کنند $1\Omega + j0.3$ باشد، ولتاژخط به‌خط شبینه‌ای را که به‌موتور، ۴۴۰V می‌رساند به‌دست آورید.

۲-۱۷ یک بار متعادل مثلثی، متشکل از مقاومتهای خالص ۱۵ Ω در هر فاز، با یک‌بار متعادل ستاره‌ای که امپدانس هرفازش $8 + j6\ \Omega$ است موازی بسته شده است. سه‌خطی که مجموعهٔ این بارهارا به‌یک‌منبع سه‌فاز ۱۱۰V وصل می‌کنند، هرکدام، امپدانس $2 + j5\ \Omega$ دارند. جریانی‌که منبع تحویل می‌دهد و ولتاژ خط در محل بارها را به‌دست آورید.

۲-۱۸ بارسه‌فازی، توان ۲۵۰ kW با ضریب‌توان پس‌افتی ۰٫۷۰۷ ازیک‌خط ۴۴۰V می‌گیرد. موازی با این‌بار، مجموعه خازن سه‌فازی‌قراردارد‌که ۶۰ kVA دریافت می‌کند. جریان وضریب توان‌کل را حساب‌کنید.

۲-۱۹ یک موتور سه‌فاز، ۲۰ kVA با ضریب توان پس‌افتی ۰٫۷۰۷ از یک منبع ۲۲۰ V دریافت می‌کند. مقدار کیلو ولت آمپر خازنهای لازم را برای رساندن ضریب توان به ۰٫۹ پس‌افتی به‌دست آورید. جریان خط قبل و بعد از افزودن خازنها چقدراست؟

۲-۲۰ یک ماشین زغال سنگ‌کنی در معدنی روباز، زمانی که زغال سنگ از دیوارهٔ معدن می‌کند ۰٫۹۲ MVA باضریب توان پس‌افتی ۰٫۸ مصرف می‌کند، وزمانی‌که بیل پرشده‌اش تحت تأثیر وزن خود از دیوارهٔ معدن دور می‌شود ۰٫۱ MVA باضریب‌توان پیش‌افتی ۰٫۵ تولید می‌کند (به‌شبکهٔ برق می‌دهد). درپایان مرحلهٔ کندن سنگ ازدیواره، تغییراندازهٔ جریان تغذیهٔ ماشین می‌تواند باعث عمل‌کردن رلهٔ الکترونیکی حفاظت شود. بنابراین برای آنکه تغییر اندازهٔ جریان به‌حداقل رسانده شود خازنهایی به‌سرهای ماشین

وصل می‌شود، مقدار تصحیح ظرفیتی (برحسب kvar) لازم را برای حذف تغییر دراندازهٔ جریان مانا به‌دست آورید. ماشین ازیك منبع سه فاز ۳۶٫۵ kV تغذیه می‌شود. حل مسئله را با درنظرگرفتن Q به‌عنوان کل مگاوار سه فاز خازنهای متصل بـه‌سرهای ماشین آغاز کنید، وعبارت جریانـی راکه ماشین ازخط می‌کشد بـرحسب Q برای هر دوحالت کندن زغال سنگ ومولد بودن بنویسید.

۲-۲۱ مشخصات نامی یك ژنراتور (که می‌تواند با محرکه‌ای الکتریکـی متوالی با یك رئکتانس‌القایی نمایانده شود) ۵۰۰ MVA و ۲۲ kV است. سیم‌پیچهای‌اتصال‌ستاره‌ای آن رئکتانس درـیکی ۱٫۱ دارند. مقدار اهمی رئکتانس سیم‌پیچها را به‌دست آورید.

۲-۲۲ ژنراتور مسئلهٔ ۲-۲۱ درمـداری قرار داردکه مقادیر مبنای آن ۱۰۰ MVA و ۲۰ kV است. از روی مقدار درـیکی رئکتانس سیم پیچهای ژنراتورکه درمسئلهٔ ۲-۲۱ داده شده است، مقدار درـیکی آنها را با مبنای جدید به‌دست آورید.

۲-۲۳ مدار معادل تکفاز موتور (یك emf متوالی بایك رئکتانس القایی‌که با Z_m نشان داده می‌شود) مـورد بحث در مسائل ۲-۱۵ و ۲-۱۶ و اتصال آن را به منبع ولتاژ رسم کنید. بر روی این نمودار، مقادیر درـیکی امپدانس خط و ولتاژ اعمالی به موتور را با مبنای ۲۰ kVA و ۴۴۰ V ذکر کنید. سپس با استفاده از مقادیر درـیکی، ولتاژ منبع را برحسب درـیك به‌دست آورید ومقدار درـیکی ولتاژ منبع را به‌ولت تبدیل کنید.