

بررسی پخش بار در سیستم‌های قدرت

مؤلف: لین پاول

مترجمان:

دکتر حسن بهائی

استادیار گروه برق

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

مهندس وحید خرمشاهی

عضو هیأت علمی

دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

مهندس محمد نصیر

کارشناس ارشد مهندسی برق

سرشناسه: پاول، لین Powell, Lynn

عنوان و نام پدیدآور: بررسی پخش بار در سیستم‌های قدرت / مؤلف لین پاول؛ مترجمان حسن براتی، وحید خرمشاهی، محمد نصیر.
مشخصات نشر: دزفول: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول، ۱۳۹۵.

مشخصات ظاهری: م، ۲۶۶ ص.

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۴۴۰۸-۶ ریال: ۱۴۵۰۰۰

وضعیت فهرست نویسی: فیا

یادداشت: عنوان اصلی: Power system load flow analysis, c۲۰۰۵.

یادداشت: کتاب حاضر اولین بار با عنوان «آنالیز پخش بار در سیستم‌های قدرت» مهیار عباسی ... [و دیگران] توسط انتشارات قدیس در سال ۱۳۹۵ گرفته است.

یادداشت: واژه‌نامه.

یادداشت: کتابنامه: ص. ۲۵۴.

عنوان دیگر: آنالیز پخش بار در سیستم‌های قدرت.

موضوع: برق - سیستم - تقسیم بار

موضوع: Electric power systems - Load dispatching

شناسه افزوده: براتی، حسن، مترجم

شناسه افزوده: خرمشاهی، وحید، مترجم

شناسه افزوده: نصیر، محمد، مترجم

شناسه افزوده: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد دزفول

رده بندی کنگره: ب۳۹۵ ۱۳۸/پ۱۰۰۵

رده بندی دیویی: ۶۲۱/۳۱۷

شماره کتابشناسی ملی: ۴۵۰۶۰۱۱

شناسنامه کتاب

عنوان: بررسی پخش بار در سیستم‌های قدرت

مؤلف: لین پاول

مترجمان: دکتر حسن براتی، وحید خرمشاهی و محمد نصیر

ویراستار ادبی: دکتر مسعود خردمندپور

ناشر و محل توزیع: انتشارات دانشگاه آزاد اسلامی واحد دزفول

نوبت و تاریخ چاپ: اول / ۱۳۹۵

تیراژ: ۲۰۰۰ نسخه

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۴۴۰۸-۶

قیمت: ۱۴۵۰۰۰ ریال

پیشگفتار مؤلف

ایده این کتاب برگرفته از منابع متعددی است. در تمام دوران شغلی‌ام به مهندسی قدرت علاقه و اشتیاق خاصی داشته‌ام و حل ریاضی مسائل سیستم‌های قدرت بخش عمده‌ای از آن علاقه بوده است.

آشنایی با این موضوع به سران کارآموز صنعت برق مهم و اساسی بود. ضرورت آن واضح بود و برنامه‌ریزی برای رسیدن به این مقصود برایم جالب و مهیج بود. نهال این کار کاشته شد ولی هیچ بیدی رشدش نداشت.

البته این موضوع چندان طول نکشید و در پایان دوره این مقطع با شخصی آشنا شدم که تنها با شدت علاقه خود باعث پرورش و رشد این نهال شد. در آن زمان "درک جرمن"^۱ سخنران ارشد کالج تکنولوژی پیسرفته و لایب و من باید همیشه قدردان او باشم.

سال‌ها بعد، در دوره کارشناسی‌ارشد مهندسی سیستم‌های قدرت در انستیتوی تکنولوژی و علوم دانشگاه منچستر، خوش‌شانس بودم که با "آلفر برامکلر"^۲ مؤلف جهانی در زمینه سیستم‌های قدرت و تحلیل عددی ملاقات کردم و به آسانی راه خود را ادامه دادم. هرچند این نوشته برای قدردانی از ایشان بسیار کوتاه است ولی برای همیشه از ایشان تشکر می‌کنم.

^۱ Derek German

^۲ Alfred Bramciller

این دو مرد باعث اشتیاق وافر من بوده‌اند.

انگیزه دیگر من برای قلم به دست گرفتن و تالیف کتاب، به این خاطر بود که بوسیله آن می‌توانستم این موضوع را به دانشجویان منتقل کنم؛ از واژه "یاد دادن" نمی‌توانم استفاده کنم چون قانون تدریس در سطح دانشگاهی انتقال است نه یاد دادن. با توجه به گستردگی موضوعات و لزوم پوشش آنها در زمان بسیار کوتاه، تنها امکان ارائه موضوع مطالعه میسر است، و دانشجو مجبور است خود جزئیات را یاد بگیرد. اما متوجه شدم که بسیاری از دانشجویان نه می‌توانستند مباحث اساسی را به خوبی ترسیم کنند و نه در چنین پوشش خلاصه‌ای متوجه شوند، و نه وقت آن را داشتند که در درباره درسی پر حجم خود، تحقیق بیشتری در این زمینه انجام دهند.

به همان طریق، کتاب‌های تخصصی مهندسی سیستم قدرت شامل یک فصل درباره موضوع پخش بار می‌باشند که پوشش کلی مطالب در آنها می‌تواند محدود گردد. با این وجود، انتشارات فهرست شده در پایان کتاب منابع باارزشی هستند که در برخی موارد جزئیات جالبی ارائه داده‌اند. احساس کردم زمان آن است که کاری در زمینه تحلیل پخش بار به طور اختصاصی انجام دهم و به برخی موضوعات به صورت جزئی‌تر، بویژه در مثال‌های عددی بپردازم. این کتاب چیزی است که سعی کردم انجام دهم و امیدوارم که برای دانشجویان علاقه‌مند به این موضوع، بینش لازم را فراهم آورد.

لین پاول

ویلت شایر، ۲۰۰۴

پیشگفتار مترجمان

مطالعات پخش توان، بخش مهمی از تجزیه و تحلیل سیستم قدرت را تشکیل داده، و نقش اساسی را در بررسی وضعیت فعلی یک سیستم قدرت و تصمیم‌گیری در مورد بهترین شرایط بهره‌برداری از آن بعهده دارد. در واقع طراحی و توسعه آتی سیستم با توجه به رشد بار و لزوم توسعه تجهیزات شبکه‌ای، بدون مطالعه پخش بار امکان‌پذیر نمی‌باشد. استفاده از برنامه پخش بار می‌تواند برای طراحی سیستم، برنامه‌ریزی اقتصادی، کنترل سیستم موجود و همچنین برنامه‌ریزی توسعه آینده سیستم قدرت مفید باشد.

از آنجا که مهمترین اطلاعات شبکه، شامل داده‌های زاویه ولتاژ شین‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو عبوری از خطوط، با مطالعه پخش بار یک سیستم بدست می‌آید، و از طرفی یک سیستم قدرت شامل مقدار زیادی ژنراتور ترانسفورماتور و ... می‌باشد، استفاده از برنامه‌های کامپیوتری در محاسبات پخش بار ضرورت دارد. ازاینرو مدل‌سازی مناسب اجزاء شبکه و فرمول‌بندی معادلات شبکه در یک برنامه کامپیوتری سودمند باشد.

می‌تواند در تهیه برنامه کامپیوتری سودمند باشد. کتاب حاضر که حاصل تجربیات و تألیف آقای مهندس لین پاول است، روش‌های تحلیل گره‌ای پخش بار را بصورت ریاضی و فلوچارت‌های ساده و قابل فهم ارائه نموده است.

از آنجا که مطالعات پخش بار در رشته مهندسی برق قدرت در سطح کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری کاربرد دارد، مترجمین اقدام به ترجمه کتاب نموده‌اند. در پایان از خوانندگان محترم سپاسگزار خواهیم بود که در صورت وجود اشکال در کتاب و انتقادات سازنده، مترجمین را با استفاده از پست الکترونیکی (barati216@gmail.com) از نظرات ارزشمند خود بهره‌مند فرمایند.

حسن براتی

وحید خرمشاهی

محمد نصیر

فهرست مطالب

۱	مقدمه
۹	فصل ۱: نمایش سیستم
۹	۱-۱ مقدمه
۱۰	۲-۱ سیستم نسبت به واحد (پریونیت)
۱۴	۳-۱ نمایش پریونیت ترانسفورماتور
۱۸	۴-۱ نمایش پریونیت سیستم قدرت
۲۵	فصل ۲: مسأله پخش بار
۲۵	۱-۲ بیان فیزیکی مسأله
۲۷	۲-۲ بیان ریاضی مسأله
۳۱	۳-۲ نمایش عناصر سیستم
۳۱	۱-۳-۲ خطوط و کابل ها
۳۳	۲-۳-۲ ژنراتورها

۳-۳-۲ ترانسفورماتورها ۳۴

۴-۳-۲ بارها ۳۴

۵-۳-۲ عناصر موازی ۳۴

فصل ۳: سیستم مرجع ۳۷

۳-۳ مقدمه ۳۷

۲-۳ مآختمان سیستم ۳۷

۳-۳ فرمول بندی سیستم ۳۸

فصل ۴: روش ژاکوبی ۴۵

۱-۴ مقدمه ۴۵

۲-۴ بسط الگوریتم ۴۶

۳-۴ حل روش ژاکوبی برای سیستم مرجع ۵۰

فصل ۵: روش گوس - سایدل ۵۹

۱-۵ مقدمه ۵۹

۲-۵ بسط الگوریتم ۵۹

۳-۵ حل روش گوس - سایدل برای سیستم مرجع ۶۳

۴-۵ افزایش سرعت ۶۵

فصل ۶: روش های ماتریس - Z ۷۳

۱-۶ مقدمه ۷۳

۷۳	۲-۶ بسط روش
۷۷	۳-۶ روش ماتریس Z : الگوریتم جایگزینی بلوک
۸۰	۴-۶ حل ماتریس Z (جایگزینی بلوک) برای سیستم مرجع
۸۴	۵-۶ روش ماتریس Z : الگوریتم جایگزینی مستقیم
۸۵	۶-۶ حل روش ماتریس Z (جایگزینی مستقیم) برای سیستم مرجع
۹۵	فصل ۷: روش نیوتن - رافسون
۹۵	۱-۷ حل معادله $V = f(X)$
۹۸	۲-۷ حل معادلات غیر خطی چند متغیره
۱۰۳	۳-۷ نیوتن - رافسون و مسئله پخش بار
۱۰۷	فصل ۸: روش نیوتن - رافسون با استفاده از مختصات دکارتی
۱۰۷	۱-۸ بسط الگوریتم
۱۱۳	۲-۸ حل نیوتن - رافسون (مختصات دکارتی) برای سیستم مرجع
۱۲۱	فصل ۹: روش نیوتن - رافسون با استفاده از مختصات قطبی
۱۲۱	۱-۹ توسعه الگوریتم
۱۳۲	۲-۹ حل نیوتن - رافسون (مختصات قطبی) برای سیستم مرجع
۱۴۱	فصل ۱۰: روش مجزای سریع
۱۴۱	۱-۱۰ مقدمه
۱۴۳	۲-۱۰ روش نیوتن - رافسون مجزا

۱۰-۳ توسعه روش مجزای سریع ۱۴۵

۱۰-۴ توسعه الگوریتم ۱۴۹

۱۰-۵ حل مجزای سریع برای سیستم مرجع ۱۵۰

فصل ۱۱: پخش بار DC ۱۶۳

۱۱-۱ مقدمه ۱۶۳

۱۱-۲ توسعه روش ۱۶۴

۱۱-۳ توسعه الگوریتم ۱۶۷

۱۱-۴ حل پخش بار I C برای سیستم مرجع ۱۶۹

فصل ۱۲: کنترل ولتاژ (۱) در اتورها ۱۷۵

۱۲-۱ مقدمه ۱۷۵

۱۲-۲ عملکرد یک ماشین سنکرون ۱۷۶

۱۲-۳ ژنراتور در مسأله پخش بار ۱۸۱

۱۲-۴ حل برای سیستم مرجع، شامل شین ژنراتور ۱۸۵

فصل ۱۳: کنترل ولتاژ (۲): ترانسفورماتورهای تغیردهنده تپ زیر بار

(OLTC) ۱۹۷

۱۳-۱ مقدمه ۱۹۷

۱۳-۲ توسعه مدار معادل ترانسفورماتور برای تغیردهنده تپ ۱۹۹

۱۳-۳ تغیردهنده تپ ترانسفورماتور: مثال عینی ۲۰۳

۲۰۶.....	۴-۱۳ تغییرات ماتریس ادمیتانس ناشی از تغییردهنده تب
۲۱۱.....	۵-۱۳ تغییردهنده تب در فرایند پخش بار
۲۱۴.....	۶-۱۳ سیستم مرجع شامل ترانسفورماتورهای OLTC
۲۱۸.....	۷-۱۳ حل گوس - سایدل برای سیستم مرجع اصلاح شده
۲۲۵.....	فصل ۱۴: نتایج خروجی
۲۲۵.....	۱-۱۴ مقدمه
۲۲۶.....	۲-۱۴ سیستم مرجع
۲۲۶.....	۱-۲-۱۴ شرایط شین
۲۲۹.....	۲-۲-۱۴ پخش توان در خط
۲۳۳.....	۳-۱۴ سیستم مرجع شامل ژنراتور
۲۳۴.....	۱-۳-۱۴ شرایط شین
۲۳۴.....	۲-۳-۱۴ پخش توان در خط
۲۳۵.....	۴-۱۴ سیستم مرجع شامل ترانسفورماتورهای OLTC
۲۳۵.....	۱-۴-۱۴ شرایط شین
۲۳۵.....	۲-۴-۱۴ پخش توان در خط
۲۴۱.....	فصل ۱۵: مشکلات حل
۲۴۱.....	۱-۱۵ مقدمه
۲۴۲.....	۲-۱۵ ملاحظات معمول

۲۴۲.....	۱-۲-۱۵ مناسب سازی.....
۲۴۴.....	۲-۲-۱۵ براکندگی (تنکی).....
۲۴۵.....	۳-۲-۱۵ ذخیره درایه های ماتریس.....
۲۴۶.....	۴-۲-۱۵ استفاده از توابع ضمنی.....
۲۴۶.....	۵-۲-۱۵ حذف منظم و معکوس کردن ماتریس.....
۲۴۷.....	۳-۵ برابط اولیه.....
۲۵۱.....	پیوست.....
۲۵۱.....	ولتاژهای اولیه.....
۲۶۱.....	مراجع.....
۲۶۵.....	منابعی برای مطالعه بیشتر.....
۲۷۱.....	واژه نامه انگلیسی به فارسی.....

مقدمه

طی ده سال گذشته مهندسين برق تغييراتی در زمینه مهندسی سیستم قدرت مشاهده نموده‌اند. پیدایش ادوات نیمه‌هادی، کاربردهای وسیع و اغلب نوینی بویژه در حفاظت سیستم، تبدیل قدرت، کنترل سیستم و بهره‌برداری سیستم مشاهده شده است.

در ابتدا از این فناوری محافظه استفاده می‌شد. این موضوع ناشی از تازگی و آزمایش نشدنش نبود، بلکه بی‌شک یک مسأله نگران‌کننده بود. البته این احتیاط با گذر زمان کمرنگ‌تر شد.

در بریتانیا، ساختار سیستم‌های توزیع و انتقال قدرت الکتریکی سراسری بعد از جنگ، شاهد سرمایه‌گذاری عظیمی در نیروگاه مرکزی برنامه‌های نگهداری با کیفیت بود. در نتیجه، طول عمر کارکرد آن تجهیزات در ۱۹۷۰ به پایان رسید. اما توانایی صنعت در مهیا ساختن فناوری جدید، با جایگزینی سوییچ‌گیرهای روغنی^۱ متداول با ادوات گازی یا خلاء، همزمان نبود. به طور مشابه، ادوات حفاظتی حالت جامد برای سیستم‌ها برای مدتی طولانی در

^۱ Oil-immersed switchgear

دسترس بوده‌اند قبل از اینکه نمونه الکترومکانیکی پیشین عمر مفیدشان به پایان برسد.

فقط در یک حوزه این فناوری بنا به ضرورت خیلی آهسته حرکت می‌کرد و آن حوزه تحلیل حفاظتی شبکه‌های قدرت بود. مهندسين برق سال‌ها از شبیه‌سازی‌های فیزیکی استفاده کرده بودند: ادوات آنالوگ که در آن امکان مدل‌ازی شبکه‌ها وجود داشت اما کاربرد آنها به سیستم‌هایی با اندازه متوسط محدود می‌شد (بدون منبع برای ساده‌سازی)، و تنظیم و متعادل کردن آنها کار مشکلی بود.

این ادوات آنالوگ - تحلیل‌گران شبکه - شکل‌های مختلفی داشتند، شامل وسیله نمایش مستقیم در 50 Hz ، رتز که در آن عناصر مدارش (X, R, C) حجیم بودند: این تحلیل‌گر، سطح یک بلوک چند طبقه را پر می‌کرد. تحلیل‌گری که توسط نویسنده استفاده شد کم حجم‌تر بود انتخاب مناسب فرکانس کارکرد f به میزان 1592 Hz باعث شد تا مقدار مناسب $\omega = 2\pi f = 100$ بدست آید. این بدان معنی است که عناصر مدار فشرده بودند و تحلیل‌گر در یک اتاق کوچک جا گرفت. این روش برای دستیابی به نتایج پخش بار از این مدل طولانی بود، و یک مطالعه موردی روی یک سیستم کوچک می‌توانست چهلین ساعت به طول انجامد. علاوه براین، بخاطر محدودیت اندازه، برای سیستم‌های بزرگتر یک روش ساده‌سازی ضروری بود تا سیستمی تولید کند که مناسب ماشین باشد. تمام این روند خیلی کند بود.

پیدایش کامپیوترهای تجاری امروزی، توسط جامعه مهندسی بسیار مورد استقبال قرار گرفت ولی هیچ گروهی را همچون مهندسین برق قدرت که کاربرد مدل کردن سیستم‌ها را دیده بودند خوشحال نکرد، چون تطبیق سیستم‌های بزرگ حتی با بزرگترین ادوات آنالوگ امکان‌پذیر نبود.

همان‌طور که به صورت مفصل در این کتاب آمده است، مفایم ریاضی بخوبی درک شدند و پیدایش زبان‌های سطح بالا ابزاری را برای مهندسان فراهم آورد تا برنامه‌ها را بسازند. اما مشکل اصلی خود کامپیوترها بودند. با داشتن واحد مرکزی و حافظه بسیار کوچک و گران بودن سیستم خنک‌کننده آنها، اختیار را به کاربرانشان دادند. از علاقت‌شان برای کار با این برنامه استفاده کنند.

در مواجهه با این مشکلات، مهندسان مجبور شدند تا برنامه‌هایشان را با هر مساله بهینه سازند، هم برای اینکه هر برنامه را در حافظه جا دهند و هم اینکه از سرعت بالای اجرای هر برنامه اطمینان حاصل کنند. تقریباً به محض اینکه کاربردهای کامپیوتر قابل دسترس شدند تحقیق برای تکمیل‌های بهتر شروع شد. مساله پخش بار اولین بار با استفاده از ساده‌ترین تکنیک‌ها حل شد و خیلی زود روش‌های پیشرفته جایگزین آن شد. با استفاده از همبندانه از روش‌های بهینه‌سازی از قبیل برنامه‌نویسی پراکندگی (تا حدی) از محدودیت‌های حافظه اجتناب شد، که در آن فقط تنها عناصری که هر سیستم را توصیف می‌کردند در تحلیل استفاده می‌شدند. در حقیقت ماتریس‌های ادمیتانس سیستم قدرت خیلی پراکنده هستند یعنی اینکه فقط عناصر غیر صفر برای ذخیره‌شدن

مورد نیاز است. که این خود به روش‌های فهرست‌سازی پیچیده نیاز دارد، یعنی پیچیدگی دیگری در استفاده حداکثری از کامپیوتر ایجاد می‌گردد.

چندین راه‌حل دیگر طی دهه‌های اخیر بحث و بررسی شده است، و اصلاحات بسیاری برای افزایش سرعت آنها آزمایش شده. بحث اصلی درباره اینکه تحلیل مش یا گره بهتر است بتدریج از بین رفت چون برنامه‌نویسی در روش گره ساده‌تر بود و همچنین استفاده از روش‌های با بازده بالا مثل روش‌های نیوتون استفاده عملی تحلیل مش را به انتها رساند. به این دلیل است که روش‌های این کتاب منحصرأ روش‌های گره‌ای هستند.

توسعه روش‌های کامپیوتری برای تحلیل پخش بار در واقع تنها از وجود کامپیوترهای با سرعت پایین و حافظه محدود سود می‌برد و همیشه لازم بود تا روش‌هایی بکار رود تا کارایی آنها افزایش یابد، ولی برنامه‌های تجاری امروزی از سرعت بالای کار و وجود کامپیوترهای ارزان و سریع سود می‌برند.

باید بخاطر داشت که کامپیوترهای بزرگ مانند IBM ۳۶۰ بواسطه دهه ۱۹۶۰ عملاً با ورود کامپیوترهای شخصی متوقف موزی از دور خارج می‌شدند.

اهمیت کارکرد سریع برنامه‌های پخش بار با توجه به کاربرد آنها در کنترل سیستم نسبت به برنامه‌ریزی سیستم بهتر درک می‌گردد. مهندسین برنامه‌ریز برای آزمایش ساختارهای مختلف شبکه و بارها، به پاسخ سریع نیاز دارند، ولی مهندس کنترل به یک پاسخ ایده‌آل لحظه‌ای (آنی) نیاز دارد تا بتواند در زمان حقیقی تاثیر تغییرات احتمالی شبکه را مشاهده کند. در عمل، برنامه‌های

پخش بار مدرن برای مهندس کنترل پاسخی با سرعت بالا فراهم می‌آورد که از زمان حقیقی واقعی چندان دور نیست. به علاوه برای پیش‌بینی شرایط بارگذاری روی سیستم‌های قدرت، حل پخش بار قبل از:

۱- مطالعه خطای سیستم

۲- مطالعه پایداری گذرا

ضروری است.

مطالعات اتصال کوتاه سیستم در تصمیم‌گیری در مورد نوع و حساسیت حفاظتی که باید برای سیستم فراهم آید، مهم است. اطلاع از اندازه جریان‌هایی که در یک سیستم ممکن است رخ دهد، می‌تواند حیاتی است. بنابراین برای رفع خطا یا خطاها در کوتاه‌ترین زمان ممکن می‌تواند تجهیزات با نوع و درجه درست را انتخاب کرد که باعث حداقل شدن آسیب‌های عناصر سیستم و وقعه‌های سراسری تغذیه می‌گردد. تحلیل‌های کامپیوتری سیستم‌های معیوب برای برقرارکردن شرایط اولیه قبل از خطا به پخش بار اولیه سیستم سالم نیاز دارند.

مطالعات پایداری گذرا تاثیر اغتشاشات شبکه بر قابلیت اختلال ماشین‌های سنکرون متصل به شبکه را مورد آزمایش قرار می‌دهد تا با یکدیگر در حالت سنکرون باقی بمانند. سنکرون نبودن می‌تواند به نوسانات خواسته توان منجر شود، که خود دوباره می‌تواند باعث اختلال گسترده در تغذیه گردد.

برنامه‌های کامپیوتری که اثرات چنین اختلالی را مورد آزمایش قرار می‌دهند روش‌های گام به گامی هستند که معادلات دیفرانسیلی را که تمام عناصر شبکه را توصیف می‌کنند، حل می‌نمایند.

زمانی که یک ژنراتور ممکن است با چندین (شاید ۱۰) معادله دیفرانسیلی توصیف شود، پیچیدگی تحلیل یک سیستم چند ماشینه دوچندان می‌گردد. یک بار دیگر، برای برقرار کردن شرایط آغازین قبل از اختلال به پخش بار اولیه نیاز است.

این کتاب روش‌های تحلیل گره‌ای اصلی پنج دهه گذشته را ارائه می‌دهد. هر روش به صورت ریاضی توسعه داده می‌شود و الگوریتم استفاده شده توسط نویسندگان جهت توسعه برنامه کامپیوتری مناسب به صورت یک فلوچارت نشان داده می‌شود. کاربرد روش برای یک سیستم قدرت مرجع کوچک به نمایش در می‌آید تا آرایه‌ای از روش‌های تعیین گردد.

جزئیات تحلیل عددی اولین تکرار هر روش نیز، برای کمک به درک بهتر روش مربوطه، ارائه می‌شود.