

۱۳۹۹۴۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

سیستم‌های قدرت الکتریکی

جلد دوم

تحلیل، بهره‌برداری و کنترل

تألیف

دکتر مهرداد عابدی

استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر

سرشناسه	: عابدی، مهرداد، ۱۳۲۷ -
عنوان و نام پدیدآور	: سیستم‌های قدرت الکتریکی / تألیف مهرداد عابدی.
مشخصات نشر	: تهران: نهر دانش، ۱۳۹۰ -
مشخصات ظاهری	: ج: مصور، جدول، نمودار.
شابک	: ۱۵۰۰۰۰ ریال: ج. ۱: ۱۱ - ۵۷۱۴ - ۶۰۰ - ۹۷۸: ۲۴۰۰۰۰ ریال (ج. ۱، چاپ دوم): ۲۲۰۰۰۰ ریال: ج. ۲: ۱۴ - ۵۷۱۴ - ۶۰۰ - ۹۷۸ ج. ۳: ۲۱ - ۵۷۱۴ - ۶۰۰ - ۹۷۸
وضعیت فهرست‌نویسی: فیا	
یادداشت	: پشت جلد به انگلیسی: M.Abedi. Electric power systems.
مندرجات	: ج. ۱. آشنایی با سیستم‌های انتقال و توزیع انرژی الکتریکی. - ج. ۲. تحلیل شبکه‌های قدرت. - ج. ۳. تحلیل بهره‌برداری و کنترل.
موضوع	: برق نیرو - برق نیرو - انتقال، برق - سیستم‌ها.
رده‌بندی نکره	: ۹۱۳۹۰ س ۲ ع / TK ۱۰۰۱
رده‌بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۱
شماره کتابشناختی ملی	: ۲۳۵۴۷۹۹



عنوان: سیستم‌های قدرت الکتریکی جلد سوم: تحلیل، بهره‌برداری و کنترل

ناشر: انتشارات نهر دانش

تألیف: مهرداد عابدی

نوبت چاپ: اول، پاییز ۹۴

تیراژ: ۱۰۰۰ نسخه

قیمت: ۲۰۰۰۰ تومان

شابک: ۲۱ - ۵۷۱۴ - ۶۰۰ - ۹۷۸

حق چاپ برای ناشر محفوظ است.

فهرست مطالب

صفحه

عنوان

۱	کلیات
۳	قسمت پنجم - مسائل شبکه های قدرت
۵	فصل ۲۴: ساخت ماتریس امپدانس در شبکه انتقال I : روش غیرمستقیم
۵	۲۴ - ۱: مقدمه
۷	۲۴ - ۲: معادلات KCL برای شبکه های انتقال
۱۹	۲۴ - ۳: معادل سازی شبکه انتقال با یک n قطبی
۲۱	۲۴ - ۴: ترمیم ماتریس امپدانس شبکه یا $[Z bus]$
۴۵	۲۴ - ۵: مسائل
۴۷	فصل ۲۵: ساخت ماتریس امپدانس در شبکه انتقال II : روش مستقیم
۴۷	۲۵ - ۱: مقدمه
۴۸	۲۵ - ۲: ساخت $[Z bus]_{old}$ برای شبکه موجود به روش مستقیم
۵۹	۲۵ - ۳: مسائل

فصل ۲۶: پایداری در سیستم‌های قدرت چند ماشینه

۶۱

۲۶ - ۱: مقدمه ۶۱

۲۶ - ۲: پیش درآمد ۶۳

۲۶ - ۳: مدل سازی سیستم قدرت چندماشینه جهت ارزیابی پایداری گذرا ۷۱

۲۶ - ۴: مسائل ۹۴

قدرت ششم - بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت

۹۷

فصل ۲۷: بهره‌برداری اقتصادی از نیروگاه‌ها در سیستم‌های قدرت

۹۹

۲۷ - ۱: مقدمه ۹۹

۲۷ - ۲: پیش درآمد ۱۰۲

۲۷ - ۳: مشخصه‌های ورودی - خروجی نیروگاه‌های حرارتی ۱۰۶

۲۷ - ۴: مروری بر بهینه‌سازی توابع غیر خطی ۱۱۳

۲۷ - ۵: پخش بار اقتصادی (ED) در بین نیروگاه‌های حرارتی ۱۲۴

۲۷ - ۶: حل مسأله ED در سیستم‌های قدرت حاوی نیروگاه‌های حرارتی ۱۵۰

۲۷ - ۷: تابع هزینه برای نیروگاه‌های حرارتی چند واحدی ۱۶۷

۲۷ - ۸: ارزیابی نقش نیروگاه‌های آبی در مسأله ED ۱۸۲

۲۷ - ۹: مسائل ۱۹۹

فصل ۲۸: پخش بار بهینه

۲۰۵

۲۸ - ۱: مقدمه ۲۰۵

۲۸ - ۲: پیش درآمد ۲۰۸

۲۸-۳: نحوه نگارش معادلات و اجرای مقوله بهینه‌سازی جهت تحقق *OPF* در شبکه

- ۲۱۳ قدرت به کمک *NR # 2*
- ۲۲۸ ۲۸-۴: چند رابطه مهم برای محاسبه عناصر برخی از زیر ماتریس‌ها در **[H]**
- ۲۵۳ ۲۸-۵: پخش بار بهینه به کمک روش مجزای سریع
- ۲۵۸ ۲۸-۶: مسائل

۲۶۲

ضمیمه فصل ۲۱

- ۲۶۲ ۲۸-۱ ض: مقدمه
- ۲۶۲ ۲۸-۲ ض: فرمول‌های مربوط به

فصل ۲۹: مشارکت نیروگاه‌ها (و سایر منابع تولید) در تأمین نیازهای سیستم‌های قدرت

۲۶۹

- ۲۶۹ ۲۹-۱: مقدمه
- ۲۷۰ ۲۹-۲: پیش درآمد
- ۲۷۵ ۲۹-۳: قیود موجود در مسأله مشارکت واحدهای تولید
- ۲۸۱ ۲۹-۴: روش‌های جامع و کلی برای حل مسأله مشارکت واحدها
- ۲۸۳ ۲۹-۵: مسائل

۲۸۵

فصل ۳۰: امنیت سیستم‌های قدرت

- ۲۸۵ ۳۰-۱: مقدمه
- ۲۸۸ ۳۰-۲: عوامل مؤثر بر امنیت سیستم‌های قدرت
- ۲۸۹ ۳۰-۳: تحلیل پیشامدهای اضطراری

۳۱۰ ۴-۳۰: رتبه‌بندی پیشامدهای اضطراری

۳۱۲ ۵-۳۰: مسائل

۳۱۵ قسمت هفتم - کنترل سیستم‌های قدرت

۳۱۷ فصل ۳۱: کنترل بار - فرکانس در سیستم‌های قدرت

۳۱۷ ۳۱: ۱: مقدمه

۳۱۹ ۳۱: ۲: پیش‌درآمد

۳۲۱ ۳۱-۳: سیستم کنترل توان و مدل‌سازی آن

۳۳۳ ۳۱-۴: مدل‌سازی سیستم انرژی

۳۳۶ ۳۱-۵: نمودار بلوکی کنترل بار - فرکانس (LFC)

۳۴۲ ۳۱-۶: ارزیابی اثر کنترلر اندام در سیستم کنترل بار - فرکانس

۳۴۵ ۳۱-۷: منطقه تحت کنترل

۳۴۶ ۳۱-۸: سیستم کنترل بار - فرکانس شامل چندین منطقه تحت کنترل

۳۵۵ ۳۱-۹: مسائل

۳۵۷ فصل ۳۲: سیستم کنترل ولتاژ برای ژنراتور سنکرو و AVR

۳۵۷ ۳۲-۱: مقدمه

۳۵۸ ۳۲-۲: AVR و مدل آن

۳۶۵ ۳۲-۳: پایدار ساز

۳۶۸ ۳۲-۴: اثر کنترلر از نوع PID بر عملکرد AVR

۳۶۹ ۳۲-۵: مسائل

فصل ۳۳: کنترل توان راکتیو و پایداری ولتاژ

۳۷۱

- ۳۳- ۱: مقدمه ۳۷۱
- ۳۳- ۲: پخش توان در یک سیستم قدرت شامل ۲ باس ۳۷۱
- ۳۳- ۳: تنظیم ولتاژ در خطوط انتقال و رابطه آن با توان راکتیو ۳۷۴
- ۳۳- ۴: توان راکتیو و فروپاشی ولتاژ ۳۷۷
- ۳۳- ۵: مفهوم پایداری ولتاژ در سیستم‌های قدرت ۳۷۸
- ۳۳- ۶: مفهوم تحلیلی برای پایداری ولتاژ در یک سیستم قدرت شامل ۲ باس ۳۸۰
- ۳۳- ۷: رابطه بین ولتاژ بحرانی در ته خط و زاویه توان بحرانی در شرایط حد پایداری
ولتاژ در سیستم برای یک خط بدون تلفات ۳۸۴
- ۳۳- ۸: نقش ترانس‌های قدرت بر روی کنترل ولتاژ در سیستم‌های قدرت ۳۸۶
- ۳۳- ۹: روش کنترل ولتاژ با ترانس‌های شامل تپ‌چینجر ۳۸۶
- ۳۳- ۱۰: ارزیابی اثر *OLTC* (تپ‌چینجر عمل‌کننده در زیر بار) بر پایداری ولتاژ ۳۹۰
- ۳۳- ۱۱: روش‌های جبران‌سازی برای بهبود پایداری ولتاژ ۳۹۰

۳۹۴

مراجع

به یاد مدیر مدرسه و استاد عزیز شادروان

دکتر محمد علی مجتهدی

فرزانه‌ای که در دوران نوجوانی و جوانی در دبیرستان البرز و دانشکده فنی دانشگاه تهران مسئولیت‌پذیری و وطن‌پرستی و خدمت به مردم این مرز و بوم را به من آموخت. فرهیخته‌ای که بدون شک در خدمت به آموزش و پرورش عالی کشور به ویژه آموزش مهندسی در تاریخ معاصر ایران بی‌همتاست. وی در دوران عمر، بربرکتش مشاغل زیر را به عهده داشته است:

■ ریاست دبیرستان البرز

■ استاد دانشکده فنی دانشگاه تهران

■ بنیان‌گذار و رئیس دانشگاه صنعتی شریف

■ ریاست دانشگاه صنعتی امیرکبیر

■ ریاست دانشگاه شهید بهشتی

متأسفانه این مرد بزرگ در سال‌های آخر عمر، به‌دلیل بی‌مهری و کم‌لطفی قرار گرفت و نسل جوان کشور چندان شناخت دقیقی از خدمات ارزنده او به ایران عزیز ندارد. این انسان والا پس از مبارزه با سرطان در عزیت و تنهایی چشم از جهان فرو بست.

روحش شاد و یادش جاوید باد

ابوعبدالله محمدبن موسی خوارزمی که ریاضی‌دانان اروپا او را *algorithmus* می‌خوانند، یکی از نخستین و بزرگ‌ترین ریاضی‌دانان و اخترشناسان ایران است که در بغداد کار می‌کرد. از زندگی و خانواده او آگاهی زیادی در دست نیست، جز در حدود سال ۱۷۵-۱۸۰ هجری - در خوارزم متولد و هنگام جوانی در خزانه الحکمه مأمون مشغول به کار و تحقیقات شد و پس از سال‌ها فعالیت شبانه‌روزی بالاخره در حدود سال ۲۲۵-۲۳۳ هجری - دعوت حق را لبیک گفته و به دیار باقی شتافت.

برخی از تاریخ‌نویسان عنوان مجوسی را به دنبال نام او آورده‌اند، معلوم می‌شود در خانواده‌ای با فرهنگ از زرتشتیان خوارزم زاده شد و به همین مناسبت به احتمال قوی به نوشته‌های علمی ایرانی پیش از یورش اسلام دسترسی داشته است.

روزگار خوارزمی به روزگار زرین در دوران حکومت خلیفه‌های عربی معروف است. روزگاری که هارون بر سرزمین‌های مفت شرقی فرمان می‌راند. این روزگار دوران شکفتن فرهنگی است که مرکز ثقل آن در ایران بوده است.

کارهای خوارزمی در زمینه حساب و جبر

کارهای خوارزمی در زمینه حساب و جبر در تاریخ ریاضیات و از دیدگاه مسیر تکاملی ریاضیات اهمیت بسیار زیادی دارد.

تألیف خوارزمی درباره حساب به نام حساب، نهند

این کتاب تنها از طریق ترجمه لاتینی آن به ما رسیده است. نه تنها منحصر به فرد این ترجمه به زبان لاتینی و با عنوان *Algorithmi numero indorum* در کتابخانه دانشگاه کمبریج نگهداری می‌شود.

این کتاب در پیشرفت بعدی ریاضیات در اروپای غربی و جنوبی نقشی اساسی داشته است، زیرا اروپایی‌ها به وسیله آن با روش هندی عددنویسی یعنی نمادهای ده‌گانه هندی یا به کار بردن صفر و استفاده از نظام موضعی بودن رقم‌ها آشنا شدند.

از آن‌جا که در اروپای غربی و جنوبی این شکل عددنویسی را از کتابی یاد گرفتند که به زبان عربی نوشته شده بود و نویسنده آن نیز در کشورهای عربی زندگی می‌کرد رقم‌های هندی دستگاه عددنویسی دهدهی را به اشتباه رقم‌های عربی نامیدند.

خوارزمی مسئله‌هایی را که به معادله درجه اول منجر می‌شود از راه حسابی و باروش‌های یک

فرضی و دو فرضی حل می‌کند. روش یک فرضی همان روشی است که امروز هم با نام راه حل فرضی مورد استفاده قرار می‌گیرد و خوارزمی آن را از هندی‌ها گرفته است.

روش دوم یعنی روش دو فرضی به این ترتیب بود که با فرض دو عدد دلخواه برای مجهول هر بار میزان اشتباه را به دست آورده و به کمک آن‌ها مقدار واقعی مجهول را محاسبه می‌کرد.

کتاب جبر خوارزمی نقشی بسیار اساسی در تاریخ ریاضیات داشته و نمونه مشخصی است از پژوهش‌های ریاضی‌دانان ایرانی در دوره‌ای از تکامل ریاضیات که سمت‌گیری کاربردی داشته است. این کتاب بعدها به زبان لاتین ترجمه شد و برای مدتی طولانی تنها کتاب درسی ریاضیات در اروپای غربی بود.

برای این کتاب، کارهای دیوفانت و دانشمندان هندی را به یاد می‌آورد و به همین مناسبت برخی گمان می‌بردند که خوارزمی از این سرچشمه‌ها استفاده می‌کرده است، برخی از روش‌هایی که در این کتاب به کار برده ما را به یاد دیوفانت می‌اندازد، ولی خوارزمی به هیچ وجه از کراتانه‌سی که خاص جبر دیوفانت است، استفاده نمی‌کند و اصطلاح‌های او را به کار نمی‌برد به جز این بررسی‌های تاریخی نشان داده است که آشنایی دانشمندان دربار خلیفه عربی با کارهای دیوفانت بعد از تنظیم کتاب خوارزمی بوده است.

به همین ترتیب به دلیل اختلاف بین روش‌های خوارزمی با روش‌های دانشمندان هندی در حل معادله‌ها وجود دارد، می‌توان نتیجه گرفت که او در کتاب جبر و مقابله خود از روش‌های هندی هم پیروی نکرده است.

جبر خوارزمی حتی از دیدگاهی که دنبال می‌کند، ارتباطی با جبر یونانی ندارد، یونانی‌ها در بخش عمده‌ای از کارهای خود هیچ ضرورتی نمی‌دیدند که به کار مفهومی عملی توجه کنند، در حالی که خوارزمی درست برعکس عمل می‌کرد و تلاش او برای جهت‌یابی بود که علم را به خدمت زندگی بگمارد، هدف علمی آن را بشناسد و بشناساند. جبر خوارزمی بخش‌های ویژه‌ای درباره تجارت، تقسیم ارث و عمل کردن به وصیت‌ها دارد و برخلاف یونانی‌ها که به هندسه منجر می‌کردند خوارزمی برخی از مسئله‌های هندسی را با یاری معادله حل می‌کند.

ارزش علمی کار خوارزمی در این است که کتاب او تنها رساله‌ای درباره حل مسئله نیست، بلکه خوارزمی الگوریتم حل معادله‌ها را مطرح می‌کند، کاربرد آن را هم توضیح می‌دهد و هر جا لازم می‌بیند از روش‌های هندسی هم سود می‌جوید.

واژه جبر که خوارزمی برای نامیدن این شاخه از دانش ریاضی انتخاب کرده است، معرف درستی این اندیشه است. خوارزمی جبر را به معنای جبران کردن می‌گرفت که به زبان امروزی به معنای

انتقال یک عدد با یک جمله منفی از یک سمت به سمت دیگر معادله است که آن را به عدد یا جمله‌ای با ضریب مثبت تبدیل می‌کند.

در کنار واژه جبر به واژه مقابله برمی‌خوریم که معرف عمل دیگری در معادله است: معادل قرار دادن دو عبارت برابر در دو سمت معادله.

بهاءالدین عاملی معروف به شیخ بهائی ریاضی‌دان آغاز سده شانزدهم میلادی خیلی خوب دو واژه جبر و مقابله را تعریف می‌کند. شیخ بهائی می‌گوید:

قسمتی از معادله را که شامل مقدار منفی است می‌توان حذف کرد و به طرف دیگر معادله افزود. این عمل را جبر گویند. جمله‌های مشابه را می‌توان از دو طرف معادله حذف کرد، این عمل مقابله است.

عملها جبر و مقابله به زبان امروزی عبارتند از انتقال جمله‌ای از یک سمت به سمت دیگر معادله - با تغییر علامت - و جمع جبری جمله‌های مشابه.

در کتاب جبر خوار می‌باشد. حل معادله‌های درجه اول و دوم شرح داده شده است. درست است که خوارزمی برای حل معادله‌ها در سه روش به ظاهر راه حل کلی نمی‌دهد و با تقسیم معادله‌های درجه دوم به پنج گونه مختلف برای هر کدام از آنها راه حل جداگانه ارائه می‌کند ولی ضمن حل نمونه‌های عددی اغلب همان دستوری را دنبال می‌کند که امروز برای حل معادله‌های درجه دوم می‌شناسیم - نمونه معادله حل شده توسط خوارزمی و مقایسه با روش مدرن در صفحه ۷۴ الی ۷۹ کتاب نگاهی به تاریخ ریاضیات در ایران اثر پرویز شهبازی - نام خوارزمی در آغاز با ترجمه کتاب حساب الهند او به اروپا رفت و الخوارزمی به صورت لاتینی شده آن الگوریتم و بعدها الگوریتم از راه عددنویسی هندی آشنا شدند. ولی به تدریج این اصطلاح به هر دستگاه یا روشی از محاسبه داده شد.

به این نکته باید توجه کرد که واژه الگوریتم هیچ ربطی با الگوریتم ندارد در ضمن الگوریتموس در آغاز در اروپای غربی به معنای محاسبه شمرده می‌شد و بعدها شاخه‌ای از منطق ریاضی شمرده شد.

نامی که خوارزمی بر کتاب جبر خود گذاشته است، امروز در همه زبان‌های زنده دنیا باقی مانده است: در زبان فرانسوی *Algebre*، در زبان انگلیسی *Algebra*، در زبان روسی آلگبر و غیره. می‌بینیم حتی حرف تعریف «ال» هم از ابتدای آن حذف نشده است.

تا پیش از نیم سده پیش از ایران کتاب‌های درسی و غیردرسی جبر را با عنوان جبر و مقابله می‌نوشتند.

یکی از کارهای پرارزش خوارزمی قبل از پیدایش نمادها و واژه‌های تازه پیدا کردن واژه و

اصطلاح‌های مناسب در قلمرو جبر بود. برای نمونه برای مجهول از واژه شیء استفاده می‌کرد و آن را درست به همان مفهومی که امروز از نماد X استفاده می‌کنیم به کار می‌برد. انتقال این واژه به اروپا و نوشتن آن به صورت X در آغاز نماد X و سپس سایر نمادها را برای بیان مقدارهای مجهول به وجود آورد.

از میان کتاب‌های خوارزمی تنها کتاب جبر او به همت زنده‌یاد حسین خدیو جم به فارسی برگردانده شده است.

کتاب جبر و مقابله خوارزمی دو بخش دارد که در بخش اول به حل مسئله‌هایی درباره شش نوع معادله صحبت می‌کند و راه‌حل‌ها همه جبری و گاه هندسی‌اند و در بخش دوم، از کاربردها بحث می‌کند و نمونه‌هایی از مسئله‌هایی می‌آورد که بیشتر مربوط به تقسیم ارث و عمل به وصیت‌هاست. آثار خوارزمی ابتدا در اروپا در قرن ششم – سده دوازده میلادی – توسط جerald کرمونایی ترجمه شد. بر همین اساس ترجمه دیگری از رابرت چستری باز هم به زبان لاتین انجام گرفت و از قرن هشتم – قرر شانزدهم میلادی – ابتدا توسط آدریان رومانوس و سپس دیگران کتاب را به زبان‌های مختلف اروپایی برگرداندند.

پیشگفتار

همان طور که در مقدمه جلد های ۱ و ۲ گفته شد در نظر است که یک مجموعه سه جلدی به شرح زیر در زمینه سیستم های قدرت الکتریکی تألیف و در اختیار علاقمندان قرار گیرد.

۱- جلد اول که در سال ۱۳۹۰ به چاپ رسید و در سال ۱۳۹۲ چاپ دوم آن در اختیار علاقمندان قرار گرفت. این جلد برای درس بررسی سیستم های قدرت I در دوره کارشناسی مهندسی برق تهیه شده است.

۲- جلد دوم که در سال ۱۳۹۲ به چاپ رسید و در سال ۱۳۹۳ چاپ دوم آن به بازار عرضه شد. این جلد برای درس بررسی سیستم های قدرت II در دوره کارشناسی مهندسی برق (گرایش قدرت) تهیه شده است.

۳- اکنون بدو: متعال را شاکرم که به حقیر توانایی داد تا جلد سوم این مجموعه را تقدیم علاقمندان عزیز بنمایم. این جلد برای درس بهره برداری از سیستم های قدرت در دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق (گرایش قدرت) تهیه شده است.

در جلد سوم نیز همانند جلد های ۱ و ۲ موضوعات مهم به صورت برجسته عرضه شده تا دانشجویان محترم بتوانند از این کتاب به صورت خودآموز استفاده کنند. لازم به ذکر است:

الف: مطالب ارائه شده در این کتاب کلی بوده برای آشنایی دانشجوی عرضه می گردد. برای مطالعه بیشتر در هر یک از مباحث مطروحه در این کتاب تهیه می شود به مقالات مندرج در مجلات معتبر بین المللی مراجعه شود.

ب: واضح است هر کتاب تألیفی دارای نواقصی است، اما استاد همکاران و دانشجویان محترم لغزش ها را به بنده گوشزد نمایند.

در خاتمه از خانم مهندس سیدنا عضو هیئت علمی دانشکده مهندسی برق و آقای مهندس ناصر خدابخشی دانشجوی دوره دکتری به خاطر ویرایش کتاب کمال تشکر را دارم. همچنین از خانم زهرا حق شنو به خاطر تایپ اولیه کتاب سپاسگزارم.

دکتر مهرداد عابدی

استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر