

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

تولید، بهره‌برداری و کنترل
در سیستم‌های قدرت

تولید، بهره‌برداری و کنترل در سیستم‌های قدرت

آلن جی. وود
بروس اف. وولنبرگ
جرالد ب. شبله

ترجمه
دکتر ابوالفضل پیرایش
توحید سلیمانی‌ا قدم

۱۳۹۵

به همسر و فرزندان عزیزم که وجودشان برکت است

ابوالفضل پیرایش

به پدر و مادر عزیزم

توحید سلیمانی

فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان	هفده
پیشگفتار ویرایش سوم	نوزده
پیشگفتار ویرایش دوم	بیست و یک
پیشگفتار ویرایش اول	بیست و سه
فصل اول: مقدمه	
۱.۱. مقدمه اهداف دوره آموزشی	۱
۲.۱. محتوای دوره	۱
۳.۱. اهمیت اقتصادی	۳
۴.۱. تجدیدساختار: از عمودی به افقی	۴
۵.۱. مشکلات: دیرینه و جدید	۴
۶.۱. مشخصه واحدهای بخار	۷
۱.۶.۱. تغییرات مشخصه‌های واحد بخار	۱۳
۲.۶.۱. واحدهای سیکل ترکیبی	۱۶
۳.۶.۱. واحدهای تولید همزمان	۱۹
۴.۶.۱. واحدهای راکتور هسته‌ای تعدیل‌شده آب سبک	۲۱
۵.۶.۱. واحدهای آبی	۲۲
۶.۶.۱. ذخیره انرژی	۲۶
۷.۱. انرژی‌های تجدیدپذیر	۲۸
۱.۷.۱. انرژی باد	۲۹
۲.۷.۱. سرعت باد شروع	۳۰
۳.۷.۱. توان خروجی نامی و سرعت نامی باد	۳۰
۴.۷.۱. سرعت باد قطع	۳۰
۵.۷.۱. بازده توربین بادی یا ضریب تبدیل توان	۳۰
۶.۷.۱. توان خورشیدی	۳۲
ضمیمه ۱ الف: اطلاعات ژنراتورهای معمول	۳۲
ضمیمه ۱ ب: قیمت سوخت‌های فسیلی	۳۴
ضمیمه ۱ ج: مطالعه آماری واحدها	۳۵
مراجع برای واحدهای تولیدی	۳۷
مراجع برای مطالعه بیشتر	۳۸

فصل دوم: سازمان‌های صنعتی، اقتصاد مدیریتی و تبادلهای مالی	۴۳
۱.۲. مقدمه	۴۳
۲.۲. محیط‌های کسب‌وکار	۴۴
۱.۲.۲. محیط تنظیم‌شده (غیررقابتی)	۴۵
۲.۲.۲. محیط بازار رقابتی	۴۷
۳.۲. نظریهٔ بنگاه اقتصادی	۵۰
۴.۲. بازارهای رقابتی	۵۱
۵.۲. عرضه‌کنندگان	۵۵
۱.۵.۲. هزینه‌های عرضهٔ کالا	۵۶
۲.۵.۲. منحنی‌های عرضهٔ انفرادی	۵۷
۳.۵.۲. محیط‌های رقابتی	۵۷
۴.۵.۲. رقابت ناکامل	۶۱
۵.۵.۲. عوامل دیگر	۶۳
۶.۲. هزینهٔ تولید انرژی الکتریکی	۶۴
۷.۲. بازارهای درحال شکل‌گیری	۶۶
۱.۷.۲. نمودار سیلان انرژی	۶۹
۸.۲. محیط‌های چندشرکتی	۷۱
۱.۸.۲. مدل لئونتیف: اقتصاد ورودی-خروجی	۷۱
۲.۸.۲. منابع سوختی محدود	۷۲
۹.۲. عدم قطعیت و قابلیت اطمینان	۷۳
مسائل	۷۴
مراجع	۷۵
فصل سوم: توزیع اقتصادی بار میان نیروگاه‌های حرارتی و روش‌های حل آن	۷۷
۱.۳. توزیع اقتصادی بار	۷۷
۲.۳. توزیع اقتصادی با توابع هزینهٔ تکه‌ای خطی	۸۲
۳.۳. برنامه‌ریزی خطی LP	۸۳
۱.۳.۳. توابع هزینهٔ تکه‌ای خطی	۸۳
۲.۳.۳. توزیع اقتصادی بار با روش LP	۸۵
۴.۳. روش تکرار λ	۸۶
۵.۳. دیسپاچینگ اقتصادی با روش جستجوی باینری	۹۱
۶.۳. توزیع اقتصادی با روش برنامه‌ریزی پویا DP	۹۱
۷.۳. توابع ترکیبی هزینهٔ تولید توان	۹۵
۸.۳. نقطهٔ کار پایه و ضرایب مشارکت	۹۹

۹.۳.	توزیع بهینه بار برای نیروگاه‌های حرارتی با در نظر گرفتن تلفات شبکه	۱۰۱
۱۰.۳.	قیمت حدی محلی LMP	۱۰۵
۱۱.۳.	سازوکارهای مزایده	۱۰۹
۱.۱۱.۳.	مزایده نرخ افزایشی PJM به مثابه راه‌حلی ترسیمی	۱۰۹
۲.۱۱.۳.	مقدمه‌ای بر نظریه مزایده	۱۱۱
۳.۱۱.۳.	روش‌های مزایده	۱۱۴
۴.۱۱.۳.	مزایده انگلیسی	۱۱۵
۵.۱۱.۳.	مزایده هلندی	۱۱۷
۶.۱۱.۳.	مزایده نخستین نرخ مخفی	۱۱۸
۷.۱۱.۳.	مزایده دومین نرخ مخفی یا ویکری	۱۱۹
۸.۱۱.۳.	مزایده پرداختی	۱۱۹
۱۲۰.	ضمیمه ۳ الف: بهینه‌سازی مقید	۱۲۰
۱۳۰.	ضمیمه ۳ ب: برنامه‌ریزی خطی	۱۳۰
۱۴۰.	ضمیمه ۳ ج: برنامه‌ریزی غیرخطی	۱۴۰
۱۴۱.	ضمیمه ۳ د: برنامه‌ریزی پویا	۱۴۱
۱۴۷.	ضمیمه ۳ ه: بهینه‌سازی محدب	۱۴۷
۱۵۰.	مسائل	۱۵۰
۲.۳.	توزیع اقتصادی بار با استفاده از تقریب خطی سه‌تکه‌ای از تابع نرخ افزایشی حرارتی	۱۵۰
۱۵۹.	مراجع	۱۵۹

فصل چهارم: در مدار قرارگیری واحدهای نیروگاهی

۱.۴.	مقدمه	۱۶۱
۱.۱.۴.	در مدار قرارگیری واحدها و دیسپاچینگ اقتصادی	۱۶۱
۲.۱.۴.	قیود مسئله در مدار قرارگیری واحدها	۱۶۶
۳.۱.۴.	ذخیره چرخان	۱۶۶
۴.۱.۴.	قیود واحدهای حرارتی	۱۶۸
۵.۱.۴.	محدودیت‌های دیگر	۱۷۰
۲.۴.	روش‌های حل مسئله در مدار قرارگیری واحدها	۱۷۱
۱.۲.۴.	روش‌های مبتنی بر فهرست حق تقدم	۱۷۲
۲.۲.۴.	روش آزادسازی لاگرانژ	۱۷۴
۳.۲.۴.	برنامه‌ریزی خطی با اعداد صحیح	۱۸۲
۳.۴.	قرارگیری واحدهای در مدار با در نظر گرفتن قیود امنیت سیستم	۱۸۳
۴.۴.	قرارگیری واحدها در مدار در مزایده‌های روزانه	۱۸۳
۴ الف:	بهینه‌سازی دوگان برای مسائل غیرمحدب	۱۸۳

ضمیمه ۴ ب: روش برنامه‌ریزی پویا و کاربرد آن در حل مسئله در مدار قرارگیری واحدها ۱۸۹
مسائل ۱۹۹

فصل پنجم: تولید با محدودیت در منبع انرژی ۲۰۳

۱.۵. مقدمه ۲۰۳
۲.۵. برنامه‌ریزی سوخت ۲۰۴
۳.۵. قرارداد تأمین سوخت به روش برداشت یا پرداخت ۲۰۴
۴.۵. مدل‌های پیچیده‌تر برداشت یا پرداخت ۲۰۹
۱.۴.۵. حدود توان واحدها و متغیرهای اضافی ۲۰۹
۵.۵. برنامه‌ریزی سوخت با روش LP ۲۱۱
۶.۵. مقدمه‌ای بر هماهنگی نیروگاه‌های آبی-حرارتی ۲۱۸
۱.۶.۵. برنامه‌ریزی بلندمدت واحدهای آبی ۲۱۹
۲.۶.۵. برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت واحدهای آبی ۲۲۰
۷.۵. مدل‌سازی واحدهای آبی ۲۲۰
۸.۵. برنامه‌ریزی با حضور واحدهای آبی ۲۲۳
۱.۸.۵. انواع مسائل برنامه‌ریزی ۲۲۳
۲.۸.۵. برنامه‌ریزی انرژی ۲۲۴
۹.۵. برنامه‌ریزی واحدهای آبی و حرارتی ۲۲۷
۱.۹.۵. برنامه‌ریزی واحدهای آبی با ذخیره محدود ۲۲۷
۲.۹.۵. واحدهای آبی سری (از نظر آبی) ۲۳۲
۳.۹.۵. نیروگاه‌های آبی تلمبه-ذخیره‌ای ۲۳۳
۱۰.۵. برنامه‌ریزی واحدهای آبی با به‌کارگیری روش LP ۲۳۷
مسائل ۲۵۰

فصل ششم: اثرهای سیستم انتقال ۲۵۹

۱.۶. مقدمه ۲۵۹
۲.۶. تبدیل اطلاعات تجهیزات به اطلاعات باس و شاخه ۲۶۴
۳.۶. پردازش اطلاعات باس پست ۲۶۴
۴.۶. مدل‌سازی تجهیزات ۲۶۵
۵.۶. پخش بار از منظر برنامه‌ریزی و بهره‌برداری ۲۶۹
۶.۶. قانون پایستگی انرژی (نظریه تلگان) ۲۶۹
۷.۶. روش‌های حل کردن مسئله پخش بار ۲۷۰
۸.۶. روش نیوتن-رافسون با ماتریس ژاکوبین افزوده ۲۷۱
۹.۶. مروری بر پیشینه ریاضیات به‌کار گرفته شده ۲۷۴

۲۷۵.....	۱۰.۶. مدلسازی کنترل‌های موجود در شبکه AC
۲۷۵.....	۱۱.۶. کنترل ولتاژ محلی
۲۷۵.....	۱۲.۶. مدلسازی خطوط انتقال و ترانسفورماتورها
۲۷۵.....	۱.۱۲.۶. روابط پخش بار در خطوط انتقال
۲۷۶.....	۲.۱۲.۶. رابطه‌های پخش بار در ترانسفورماتورها
۲۷۷.....	۱۳.۶. خط‌های ارتباطی HVDC
۲۸۰.....	۱.۱۳.۶. مدلسازی مبدل‌های HVDC و ادوات FACTS
۲۸۰.....	۲.۱۳.۶. تعریف رابطه‌های زاویه‌ای در مبدل‌های HVDC
۲۸۰.....	۳.۱۳.۶. رابطه‌های توان برای یک مبدل HVDC ۶ قطبی
۲۸۳.....	۱۴.۶. مروری کوتاه بر پردازش ماتریس ژاکوبین
۲۸۵.....	۱۵.۶. مثال ۶الف: پخش بار AC
۲۸۸.....	۱۶.۶. پخش بار تفکیک‌شده
۲۹۰.....	۱۷.۶. روش گاوس-سایدل
۲۹۲.....	۱۸.۶. روش پخش بار DC یا خطی
۲۹۳.....	۱.۱۸.۶. محاسبه‌های پخش بار DC
۲۹۴.....	۲.۱۸.۶. مثال ۶ب: پخش بار DC شبکه شش باسه
۲۹۴.....	۱۹.۶. پخش بار با در نظر گرفتن خط ارتباطی HVDC
۲۹۵.....	۱.۱۹.۶. کاهش تغییرات ماتریس ژاکوبین
۲۹۶.....	۲.۱۹.۶. مدهای کنترلی
۲۹۷.....	۳.۱۹.۶. روش حذف تحلیلی
۲۹۹.....	۴.۱۹.۶. تغییر مدهای کنترلی
۳۰۰.....	۵.۱۹.۶. مبدل‌های قدرت دوقطبی و ۱۲ پالسه
۳۰۱.....	۲۰.۶. تلفات سیستم انتقال
۳۰۱.....	۱.۲۰.۶. مثال سیستم دو ژنراتوری
۳۰۳.....	۲.۲۰.۶. رابطه‌های هماهنگی، تلفات افزایشی و ضرایب جریمه
۳۰۴.....	۲۱.۶. ضرایب جریمه باس مرجع
۳۰۶.....	۲۲.۶. محاسبه مستقیم ضرایب جریمه باس با به‌کارگیری معادله‌های پخش بار
۳۰۷.....	مسائل
۳۱۳.....	فصل هفتم: امنیت سیستم قدرت
۳۱۳.....	۱.۷. مقدمه
۳۱۹.....	۲.۷. عوامل مؤثر بر امنیت سیستم قدرت
۳۲۰.....	۳.۷. بررسی رخدادهای احتمالی: تشخیص مشکلات شبکه
۳۲۰.....	۱.۳.۷. خروج واحدهای تولیدی

۳۲۱.....	۲.۳.۷. خروج خطوط انتقال
۳۲۴.....	۴.۷. مروری بر تحلیل امنیت سیستم
۳۲۵.....	۱.۴.۷. ضرایب حساسیت خطی
۳۳۰.....	۵.۷. پایش قراردادها با به کارگیری دریچه‌های عبور توان
۳۳۲.....	۶.۷. فروپاشی ولتاژ
۳۳۵.....	۱.۶.۷. روش‌های مبتنی بر پخش بار AC
۳۳۷.....	۲.۶.۷. انتخاب رخدادهای احتمالی
۳۴۱.....	۳.۶.۷. آزادسازی هم‌مرکز
۳۴۲.....	۴.۶.۷. هم‌مرزی
۳۴۳.....	۵.۶.۷. محلی‌سازی تطبیقی
۳۴۵.....	ضمیمه ۱۱ الف: مثال‌های گوناگون پخش بار
۳۵۳.....	ضمیمه ۷ ب: محاسبه ضرایب حساسیت
۳۵۹.....	مسائل
۳۶۵.....	مراجع

۳۶۷.....	فصل هشتم: پخش بار بهینه
۳۶۷.....	۱.۸. مقدمه
۳۶۷.....	۲.۸. توزیع اقتصادی بار
۳۶۹.....	۳.۸. پخش بار بهینه، ترکیب توزیع اقتصادی بار و پخش بار
۳۷۱.....	۴.۸. پخش بار بهینه DC (DCOPF)
۳۷۲.....	۵.۸. مثال ۸ الف: حل DCOPF
۳۷۶.....	۶.۸. مثال ۸ ب: DCOPF با قیود بارگذاری خطوط
۳۷۹.....	۷.۸. روش حل DCOPF
۳۷۹.....	۸.۸. قیود توان عبوری خطوط در روش برنامه‌ریزی خطی
۳۸۱.....	۱.۸.۸. حل DCOPF با برنامه‌ریزی درجه دوم
۳۸۲.....	۹.۸. پخش بار بهینه AC (ACOPF)
۳۸۳.....	۱۰.۸. روش‌های حل ACOPF
۳۹۰.....	۱۱.۸. رابطه میان قیمت حدی محلی، تلفات افزایشی و قیود بارگذاری خطوط
۳۹۱.....	۱.۱۱.۸. قیمت حدی محلی (با فرض اینکه هیچ‌یک از خطوط بارگذاری بیشینه نشده باشد)
۳۹۲.....	۲.۱۱.۸. قیمت حدی محلی (با فرض اینکه یک خط بارگذاری بیشینه شده باشد)
۳۹۵.....	۱۲.۸. پخش بار بهینه با در نظر گرفتن قیود امنیت سیستم
۳۹۷.....	۱.۱۲.۸. حل SCOPF با به کارگیری پخش بار DC و برنامه‌ریزی درجه دوم
۳۹۸.....	۲.۱۲.۸. پخش بار DC
۳۹۹.....	۳.۱۲.۸. حدود توان عبوری خطوط

۴۰۰.....	۴.۱۲.۸. قیود رخدادهای احتمالی
۴۰۴.....	ضمیمه ۸ الف: روش نقطه داخلی
۴۰۶.....	ضمیمه ۸ ب: اطلاعات سیستم ۱۲ باس
۴۰۷.....	ضمیمه ۸ ج: ضرایب حساسیت توان عبوری خط
۴۰۹.....	ضمیمه ۵۸: محاسبه ضرایب حساسیت خطی با پخش بار AC
۴۱۱.....	مسائل
۴۱۵.....	فصل نهم: مقدمه‌ای بر تخمین حالت در سیستم‌های قدرت
۴۱۵.....	۱.۹. مقدمه
۴۱۶.....	۲.۹. تخمین حالت در سیستم قدرت
۴۲۰.....	۳.۹. تخمین حداقل مربعات وزن‌دار بر مبنای درست‌نمایی بیشینه
۴۲۰.....	۱.۳.۹. مقدمه
۴۲۲.....	۲.۳.۹. مفاهیم روش درست‌نمایی بیشینه
۴۲۶.....	۳.۳.۹. رابطه‌های ماتریسی تخمین
۴۲۸.....	۴.۳.۹. مثالی از تخمین حالت به روش حداقل مربعات وزن‌دار
۴۳۲.....	۴.۹. تخمین حالت در شبکه AC
۴۳۲.....	۱.۴.۹. استخراج روش
۴۳۵.....	۲.۴.۹. نتایج تخمین حالت در یک شبکه AC
۴۴۱.....	۵.۹. تخمین حالت با روش تجزیه متعامد
۴۴۳.....	۱.۵.۹. روش تجزیه متعامد
۴۴۷.....	۶.۹. مقدمه‌ای بر مباحث پیشرفته در تخمین حالت
۴۴۷.....	۱.۶.۹. منابع خطا در تخمین حالت
۴۴۸.....	۲.۶.۹. تشخیص و شناسایی اندازه‌گیری‌های نادرست
۴۵۷.....	۳.۶.۹. محاسبه کمیت‌های اندازه‌گیری نشده
۴۵۹.....	۴.۶.۹. رویت‌پذیری شبکه و اندازه‌گیری‌های ساختگی
۴۶۳.....	۷.۹. واحدهای اندازه‌گیری فازور
۴۶۶.....	۸.۹. کاربردهای تخمین حالت در سیستم‌های قدرت
۴۷۰.....	۹.۹. اهمیت صحت‌سنجی و معتبرسازی داده‌ها
۴۷۱.....	۱۰.۹. مراکز کنترل سیستم قدرت
۴۷۳.....	ضمیمه ۹ الف: استخراج رابطه‌های تخمین حداقل مربعات
۴۷۹.....	مسائل
۴۸۳.....	فصل دهم: کنترل تولید
۴۸۳.....	۱.۱۰. مقدمه

۴۸۴.....	۲.۱.۰ مدل ژنراتور
۴۸۷.....	۳.۱.۰ مدل بار
۴۹۰.....	۴.۱.۰ مدل محرک
۴۹۱.....	۵.۱.۰ مدل گاورنر
۴۹۷.....	۶.۱.۰ مدل خط ارتباطی
۵۰۰.....	۷.۱.۰ کنترل تولید
۵۰۰.....	۱.۷.۱.۰ کنترل تکمیلی
۵۰۲.....	۲.۷.۱.۰ کنترل خط ارتباطی
۵۰۵.....	۳.۷.۱.۰ تخصیص تولید
۵۰۷.....	۴.۷.۱.۰ تحقق عملی کنترل خودکار تولید
۵۱۰.....	۵.۷.۱.۰ ویژگی‌های AGC
۵۱۲.....	۶.۷.۱.۰ ضوابط کنترل تولید NERC
۵۱۳.....	مسائل
۵۱۷.....	مراجع

فصل یازدهم: تبادل توان، حوضچه توان، کارگزاری (دلالی) و مزایده‌های توان و انرژی ۵۱۹

۵۱۹.....	۱.۱.۱ مقدمه
۵۲۳.....	۲.۱.۱ قراردادهای تبادل
۵۲۳.....	۱.۲.۱.۱ انرژی
۵۲۵.....	۲.۲.۱.۱ انرژی پویا
۵۲۶.....	۳.۲.۱.۱ قراردادهای مبتنی بر وقایع احتمالی
۵۲۷.....	۴.۲.۱.۱ قراردادهای بر پایه بازار
۵۲۸.....	۵.۲.۱.۱ استفاده از سیستم انتقال
۵۳۸.....	۶.۲.۱.۱ قابلیت اطمینان
۵۳۹.....	۳.۱.۱ تبادل انرژی میان شرکت‌های برق
۵۴۳.....	۴.۱.۱ ارزیابی تبادل انرژی میان بنگاه‌ها
۵۴۵.....	۵.۱.۱ ارزیابی تبادل انرژی و در مدار قرارگیری واحدهای تولیدی
۵۴۶.....	۶.۱.۱ قراردادهای چندگانه تبادل انرژی- انتقال توان
۵۴۹.....	۷.۱.۱ حوضچه‌های توان
۵۵۴.....	۸.۱.۱ سیستم کارگزاری انرژی
۵۵۸.....	۹.۱.۱ مسائل قابلیت انتقال توان
۵۶۱.....	۱۰.۱.۱ قابلیت در دسترس انتقال توان و دریچه‌های عبور آن
۵۶۲.....	۱.۱.۰.۱.۱ تعاریف
۵۶۵.....	۲.۱.۰.۱.۱ فرایند

۵۶۷.....	محاسبهٔ ATC	۳.۱۰.۱۱
۵۷۶.....	در مدار قرارگیری واحدها با در نظر گرفتن قیود امنیت سیستم (SCUC)	۱.۱.۱۱
۵۷۶.....	تولید و بار در بازارهای لحظه‌ای	۱.۱.۱.۱۱
۵۷۹.....	شکل دو تابع تولید و تقاضا	۲.۱.۱.۱۱
۵۷۹.....	تفسیر ضرایب لاگرانژ	۳.۱.۱.۱۱
۵۸۱.....	دیسپاچینگ بازار روز بعد	۴.۱.۱.۱۱
۵۸۱.....	شبیه‌سازی مزایده با به‌کارگیری برنامه‌ریزی خطی	۱.۲.۱۱
۵۸۱.....	مزایده‌های قیمت مخفی	۱.۳.۱۱
۵۸۶.....	مسائل	
۵۹۳.....	فصل دوازدهم: پیش‌بینی کوتاه‌مدت تقاضا	
۵۹۳.....	چشم‌انداز	۱.۱.۲
۵۹۶.....	روش‌های تحلیلی	۲.۱.۲
۵۹۹.....	مدل‌های تقاضا	۳.۱.۲
۶۰۰.....	پیش‌بینی قیمت کالا	۴.۱.۲
۶۰۱.....	خطای پیش‌بینی	۵.۱.۲
۶۰۲.....	شناسایی سیستم	۶.۱.۲
۶۰۲.....	مدل‌های اقتصادسنجی	۷.۱.۲
۶۰۳.....	مدل خطی آب‌وهوا	۱.۷.۱.۲
۶۰۵.....	مدل‌های حساس به آب‌وهوا	۲.۷.۱.۲
۶۰۷.....	سری‌های زمانی	۸.۱.۲
۶۰۷.....	مؤلفهٔ فصلی مدل‌های سری‌های زمانی	۱.۸.۱.۲
۶۰۹.....	مدل خود رگرسیون (AR)	۲.۸.۱.۲
۶۱۰.....	میانگین متحرک (MA)	۳.۸.۱.۲
۶۱۱.....	مدل ARMA: روش باکس-جنکینز	۴.۸.۱.۲
۶۱۲.....	میانگین متحرک با خود رگرسیونی (ARIMA) باکس-جنکینز	۵.۸.۱.۲
۶۱۳.....	مدل‌های دیگر	۶.۸.۱.۲
۶۱۴.....	تشکیل مدل سری زمانی	۹.۱.۲
۶۱۴.....	مدل‌های تقاضای پایه	۱.۹.۱.۲
۶۱۵.....	مدل‌های روند تقاضا	۲.۹.۱.۲
۶۱۵.....	روش رگرسیون خطی	۳.۹.۱.۲
۶۱۷.....	مدل‌های فصلی	۴.۹.۱.۲
۶۱۷.....	ایستایی	۵.۹.۱.۲
۶۱۸.....	تخمین به‌روش حداقل مربعات وزن‌دار WLS	۶.۹.۱.۲

۶۲۰	..... تخمین مرتبه و واریانس
۶۲۰	..... معادلات یول-واکر
۶۲۳	..... روش دوربن-لوینسون
۶۲۶	..... الگوریتم نوآوری (تفاضل‌های اتفاقی) در تخمین فرایندهای MA و ARMA
۶۲۸	..... روند کلی در ایجاد مدل ARIMA
۶۳۱	..... شبکه‌های عصبی مصنوعی
۶۳۲	..... مقدمه‌ای بر شبکه‌های عصبی مصنوعی ANN
۶۳۳	..... نورون‌های مصنوعی
۶۳۴	..... کاربرد شبکه‌های عصبی مصنوعی
۶۳۵	..... شبکه‌های عصبی هاپفیلد (شبکه‌های عصبی بازگشتی)
۶۳۶	..... شبکه‌های پیش‌خور
۶۳۹	..... روش پس-انتشار
۶۴۳	..... الگوریتم برنامه‌ریزی خطی با روش نقطه داخلی
۶۴۳	..... ادغام مدل
۶۴۴	..... پیش‌بینی تقاضا
۶۴۴	..... پیش‌بینی ساعتی تقاضای سیستم
۶۴۵	..... پیش‌بینی یک‌گام قبل
۶۴۵	..... پیش‌بینی ساعتی تقاضای باس‌ها
۶۴۶	..... نتیجه‌گیری
۶۴۶	..... مسائل
۶۴۸	..... مراجع
۶۴۹	..... واژه‌نامه فارسی-انگلیسی
۶۶۱	..... واژه‌نامه انگلیسی-فارسی
۶۷۳	..... نمایه

پیشگفتار مترجمان

این کتاب به مباحث اساسی مرتبط با بهره‌برداری و کنترل تولید و انتقال توان الکتریکی در سیستم‌های قدرت می‌پردازد. خواص ویژه الکتریسیته و انرژی الکتریکی همواره حرکت روبه‌توسعه صنعت برق را در همه نقاط دنیا در دهه‌های گذشته در پی داشته و اقبال عمومی و جذابیت‌های فراوانی برای متخصصان و فعالان اقتصادی در این حوزه را موجب شده است. بی‌شک توسعه روزافزون سیستم تولید و انتقال انرژی الکتریکی ناگزیر مشکلات فنی و اقتصادی فراوانی نیز ایجاد می‌کند. مجموعه مناسبی از این مباحث تخصصی برای مطالعه و بررسی در یک ترم از دوره‌های تحصیلات تکمیلی رشته برق- قدرت در این کتاب آمده است، به طوری که طی حدود سه دهه، این کتاب با داشتن محتوای کاملاً علمی و کاربردی مرجع مهمی برای فعالیت‌های پژوهشی و صنعتی در این حوزه در ایران و دیگر کشورها بوده و برای مهندس‌های برق در دانشگاه و صنعت مرجع کاملاً آشناست.

کتاب حاضر که ترجمه و ویرایش سوم کتاب اصلی است، علاوه بر مباحث قبلی از جمله بهره‌برداری اقتصادی از واحدهای حرارتی و آبی، کنترل تولید و فرکانس، ارزیابی امنیت سیستم قدرت و تخمین حالت، به مسائلی که در دو دهه اخیر در صنعت برق دنیا پیدا شده یا پیشرفت چشمگیر و پرسرعت‌تری نسبت به گذشته داشته‌اند می‌پردازد. از مهم‌ترین این سرفصل‌ها می‌توان به تجدید ساختار در سیستم‌های قدرت و مسائل فنی مربوط به استفاده از واحدهای تولید پراکنده و مولدهای مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر اشاره کرد. مسئله پیش‌بینی کوتاه‌مدت بار نیز از مواردی است که طی چندین دهه درباره آن مطالعه شده است؛ لیکن به دلیل تشدید اهمیت آن در سیستم‌های تجدیدساختار شده و ساختار اقتصادی و مدیریتی جدید، فصلی شامل روش‌های مدل‌سازی و حل آن به ویرایش جدید کتاب اضافه شده است. پرداختن عمیق و تخصصی به حوزه‌های جدید ارائه‌شده به مطالعه حجم بسیار بیشتری از مطالب نسبت به آنچه در این کتاب ارائه شده نیازمند است. در عین حال فصل‌های موجود به دلیل بیان نکته‌ها و تجربه‌های علمی و عملی در امریکای شمالی حاوی نکات ارزشمندی است.

شایان ذکر است که متن کمک آموزشی مرتبط با محتوای این کتاب به نام «آزمایشگاه بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت به همراه کدهای MATLAB» از نویسندگان این کتاب را در

نشانی <http://cusp.umn.edu/pgoc.php> نیز ترجمه کرده‌ایم که جداگانه منتشر خواهد شد و می‌تواند برای مخاطبان و علاقه‌مندان این کتاب مفید باشد.

در اینجا از همکاری، پیگیری و سعه صدر کارشناس‌های محترم انتشارات دانشگاه شهید بهشتی در بهبود کیفیت کتاب صمیمانه قدردانی می‌کنیم. همچنین از سرکار خانم اکرم کیانی که ویرایش کتاب و سرکار خانم سمیرا دهقان که حروف‌نگاری و صفحه‌آرایی کتاب را با جدیت و دقت و وصف‌ناپذیری به‌عهده داشته‌اند سپاسگزاریم همچنین از سرکار خانم نازنین ظهراپی که ویرایش چندباره نسخه‌های اولیه را عهده‌دار بودند و دانشجویان درس بهره‌برداری از سیستم‌های قدرت در دانشگاه شهید بهشتی که طی نیم‌سال‌های گوناگون نظرات اصلاحی خود را در نسخه اولیه ترجمه کتاب اعلام کردند قدردانیم.

در پایان این کتاب را تقدیم می‌کنیم به همه متخصصان و فعالان صنعت برق و آرزوی شکوفایی روزافزون این صنعت زیربنایی را در کشورمان داریم.

ابوالفضل پیرایش
توحید سلیمانی اقدم

پیشگفتار ویرایش سوم

تاکنون ۱۷ سال از چاپ ویرایش دوم و ۲۸ سال از انتشار نخستین ویرایش این کتاب گذشته است. صرف بیان کردن اینکه تغییرات فراوانی در این سال‌ها رخ داده است حق مطلب را ادا نمی‌کند. پروفیسور آلن وود در هنگام آماده‌سازی ویرایش سوم کتاب دارفانی را وداع گفت و نویسنده همکار جدید، دکتر جرالده شبله برای ادامه کار به دکتر وولنبرگ پیوست. دکتر شبله بخش‌های تخصصی جدیدی به کتاب افزوده است که با آنچه دکتر وولنبرگ ارائه کرده بود، شباهت‌ها و تفاوتی‌هایی دارد. این موضوع‌های نوین همچون روح تازه‌ای است که بر کالبد کتاب دمیده شده است.

ویرایش دوم این کتاب در سال ۱۹۹۶ و در بحبوحه تجدید ساختار یا قانونگذاری مجدد صنعت برق در ایالات متحد و دیگر نقاط جهان به چاپ رسید. هم‌اکنون مفاهیم جدیدی، همچون بازار لحظه‌ای انرژی الکتریکی، بهره‌برداران مستقل سیستم^۱، شرکت‌های مستقل تولید، انتقال و توزیع واژه‌های شناخته‌شده‌ای است. با گسترش بازارهای برق، مراکز کنترل سیستم‌های قدرت نیز توسعه یافته و از لحاظ جغرافیایی سطح وسیع‌تری را پوشش می‌دهد. از زمان اتفاقات ۱۱ سپتامبر، دولت ایالات متحد با همراهی سازمان قابلیت اطمینان سیستم‌های الکتریکی امریکای شمالی^۲، نظارت بیشتری بر فعالیت شرکت‌های برق داشته است. زیرا عملکرد این شرکت‌ها بر قابلیت اطمینان و امنیت سیستم اثرگذار است.

در این ویرایش فصل‌های جدیدی که منعکس‌کننده اهمیت موضوع‌های جدید است اضافه شده است. این فصل‌ها غنای کتاب را از جنبه‌های آموزشی و مهندسی افزون کرده است. نویسندگان کتاب از استادان دانشگاه‌های برتر بوده و مثال‌ها، مسائل و الگوریتم‌های محاسبه‌ای مناسبی در کتاب ارائه کرده‌اند. آنان از مشاوران و کارشناسان متخصص در صنعت انرژی برق‌اند. امید است که تلاش انجام‌شده برای تدوین این کتاب برای خوانندگان آن ارزشمند باشد.

هم‌اکنون دانشجویان و مهندسان از طریق اینترنت به اطلاعات فراوانی دسترسی دارند و با عضویت در IEEE بسیاری از خدمات سایت IEEE Explore برای آن‌ها قابل استفاده خواهد بود. بدین ترتیب، در این ویرایش برخلاف ویرایش‌های پیشین اصراری بر ارائه فهرست کاملی از مقاله‌ها و مراجع نبوده است.

-
1. independent system operator
 2. North American electric reliability corporation

از دانشجویانی که با نظارت نویسندگان و در قالب کار پژوهشی کدهای نرم‌افزاری و راه‌حل‌های مناسب را برای مسائل پیچیده ارائه کرده‌اند تشکر می‌کنیم. از میان این دانشجویان می‌توان از محمد السفر (Mohammad Alsaffar) و آنتونی جیاکومونی (Anthoni Giacomoni) از دانشگاه مینه‌سوتا (Minnesota)، جرج فهد (George Fahd)، دن ریچاردز (Dan Richards)، توماس اسمد (Thomas Smed) و دیوید والترز (David Walters) از دانشگاه آبرن (Auburn)، داروین انبر (Darwin Anbar)، سومیات دکارجانیچ (Somgiat Dekrajangpetch)، کاهونگ (Kah-Hoe Ng)، جایانت کومار (Jayant Kumar)، جیمز نیکولسن (James Nicolaisen)، چاک ریشتر (Chuck Richter)، داگلاس وچ (Douglas Welch)، هاو و (Hao Wu) و ویگو یانگ (Weiguo Yang) از دانشگاه ایالتی آیوا (Iowa State)، چین - چو تو (Chin-cheun Teoh)، می پی. چیانگ (Mei P. Cheong) و گرگوری بینگهام (Gregory Bingham) از دانشگاه پورتلند (Portland) و ژنو وان (Zhenyu Wan) از دانشگاه ساوت ولز (South Wales) نام برد.

در پایان شایان ذکر است که نویسندگان این کتاب قصد دارند برای ویرایش سوم کتاب بخش‌هایی تکمیلی تهیه کنند که در آن‌ها مسائل اقتصادی مربوط به بازار صنعت برق، سازوکارهای مزایده و قابلیت اطمینان سیستم قدرت ارائه خواهد شد.

بروس اف . وولنبرگ

جرالد ب. شبله

پیشگفتار ویرایش دوم

بیش از ۱۱ سال از انتشار نخستین ویرایش این کتاب گذشته است. در این مدت پیشرفت‌های فراوانی در حوزه موضوع‌های مطرح‌شده در کتاب روی داده و روش‌های نوینی برای حل مسائل پیشین ارائه شده است. توانایی‌های محاسبه‌ای به‌طور شگفت‌انگیزی افزایش یافته و حل مسائلی با ابعاد بزرگ ممکن شده است. در این سال‌ها واحدهای مستقل و جدیدی در صنعت برق ظهور کرده است. می‌توان گفت که بیشتر تغییرات و توسعه بهره‌برداری سیستم قدرت به جایگاه این واحدها در اتخاذ تصمیمات فنی بازمی‌گردد.

هدف نویسندگان این کتاب تهیه مرجعی برای دانشجویان سال اول تحصیلات تکمیلی برای ورود به موضوع‌های مذکور است. نویسندگان طی چندین سال از این کتاب به‌مثابه مرجع درسی یک‌ترمی استفاده کرده‌اند. به‌طوری که دانشجویان فنی در کار با رایانه‌ها مشکلی ندارند، اما درک مناسبی از تراکنش انسان و عوامل اقتصادی به‌منظور تصمیم‌گیری در ایجاد فرایندهای بهینه ندارند. در سال ۱۹۹۵ دانشجویان به‌طور هم‌زمان درس‌های ریاضیات پیشرفته را می‌گذراندند که روش‌های حل معادله‌های پخش بار نیز ذیل پوشش آن بود. بنابراین باید بحث‌های مطرح‌شده هماهنگی داشته باشد. همچنین مؤلفان پی بردند که فقط تعداد معدودی از دانشجویان با مفاهیم و روش‌های به‌کاررفته در تحقیق در عملیات آشنا نیستند. بنابراین، تلاش مداوم برای آشنایی دانشجویان با روش‌های بهینه‌سازی اجتناب‌ناپذیر می‌نماید. بحث‌های پوشش داده شده در این کتاب مثال‌های خوبی برای کاربرد بهینه‌سازی در سیستم‌های صنعتی است.

بحث‌های مطرح‌شده و عمق بحث‌ها مانند ویرایش اول است و فقط یک تفاوت عمده با ویرایش پیشین دارد. در این ویرایش به بحث تلفات و روابط آن فضای اندکی اختصاص داده شده و به‌عنوان مکمل، یک فصل جدید با عنوان پخش بار بهینه گنجانده شده است. در این فصل روش‌های مختلف پخش بار بهینه تشریح شده و فصل مزبور در انتهای کتاب ارائه شده است. برخی مدرسان ترجیح می‌دهند تا برخی بحث‌ها را زودتر مطرح کنند. این موضوع تا حدودی سلیقه‌ای است و بستگی به دانش دانشجویان و درس‌های گذرانده شده آن‌ها دارد.

بحث‌های مرتبط با در مدار قرارگیری واحدها گسترش داده شده است تا روش آزادسازی لاگرانژ را دربر گیرد. همچنین فصل هزینه تولید بازبینی شده است تا اهمیت موضوع و برخی

روش‌های جدید معرفی شود. بازارهای برق برای مبادله توان در سرتاسر جهان تغییرات عمده‌ای را پشت‌سر گذاشته‌اند. فصل معاملات و مبادلات توان، گزارش پیشرفت است تا دانشجویان بتوانند پیچیدگی‌های بازارهای رقابتی تولید توان را درک کنند. بحث‌های امنیت سیستم نیز به‌روز شده است تا کاربرد روش‌های هم‌بندی و دیگر روش‌های انتخاب رخدادهای احتمالی را دربرگیرد. افزون بر این، به پخش بار بهینه با قیود امنیت سیستم و کارکرد آن در کنترل امنیت سیستم قدرت اشاره شده است.

مؤلفان از تلاش‌ها و پیشنهادهای استادانی که ویرایش اول کتاب را به‌کار برده بودند و همچنین دانشجویان خود تشکر می‌کنند. بسیاری از دانشجویانمان در دانشگاه RPI و دانشگاه مینه‌سوتا (Minnesota) در تصحیح ویرایش اول کتاب مشارکت داشتند و ساعت‌ها وقت صرف کردند تا تمرین‌ها را حل و مثال‌های گذشته را مرور و بررسی کنند و داده‌های مثال‌های جدید را فراهم آورند. در این میان دانشجویان دوره سال ۱۹۹۴ در دانشگاه RPI شایسته قدردانی و تشکر ویژه‌اند. نمونه اول بازبینی فصل هشتم توسط دانشجویان این کلاس بررسی و خطاهایی که طی ۱۰ تا ۱۵ سال وجود داشت توسط آنان تشخیص و برطرف شد.

در ادامه از کو چانگ (Kuo Chang) از موسسه PTI^۱ تشکر می‌کنیم که محاسبه مثال‌های هزینه انتقال توان و قیمت حدی باس‌ها (فصل ۱۰) را انجام دادند. همچنین از برایان استات (Brian Sttot) از شرکت PCA^۲ برای اجرای برنامه‌های پخش بار بهینه (فصل ۸) تشکر و قدردانی می‌شود.

آلن جی. وود

بروس اف. وولنبرگ

1. Power Technologies Inc

2. Power Computer Application Corp

پیشگفتار ویرایش اول

هدف اصلی این کتاب معرفی و کاوش موضوع‌های اقتصادی و مهندسی مرتبط با برنامه‌ریزی، بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های تولید و انتقال توان الکتریکی در صنعت برق است. این کتاب به منظور تدریس در دوره یک‌ترمی مقطع تحصیلات تکمیلی در رشته مهندسی برق- قدرت تألیف شده است. دانشجویان مقطع کارشناسی که درک مناسبی از حالت ماندگار مدارهای الکتریکی دارند، می‌توانند این کتاب را به صورت خودآموز به کار ببرند. این کتاب بحث‌های درسی که در دوره تحصیلات تکمیلی در RPI مطرح می‌شد (بیشتر بحث‌ها از سال ۱۹۹۶ دچار تغییر و تحول شده است) را گردهم آورده است. موضوع‌ها به نحوی انتخاب شده است که دانشجویان با روش‌های بهینه‌سازی و تحقیق در عملیات به کاررفته در سیستم‌های قدرت آشنا شوند. برخی موضوع‌ها به معرفی روش‌هایی می‌پردازد که هم‌اکنون نیز در مراکز بهره‌برداری و کنترل سیستم قدرت به کار گرفته می‌شود.

در یک ترم نمی‌توان همه مسائل و رویه‌های کنونی را پوشش داد. مؤلفان فقط به ارائه انواع مسائل و تشریح جنبه‌های نظری- عملی رویه‌های محاسبه‌ای به کاررفته اکتفا کرده و تلاش کرده‌اند تا دانشجو را به سوی کسب اطلاعات بیشتر و مهارت‌های پیشرفته سوق دهند.

محتوای این کتاب به طور منظم در ترم دوم سال اول مقطع تحصیلات تکمیلی تدریس شده است. آشنایی با روش‌های حساب پیشرفته و درس کنترل خطی برای درک کتاب ضروری است. در صورت لزوم روش‌های بهینه‌سازی معرفی شده و برای حل مسائل عملی به کار گرفته شده است. این کتاب برای یک درس مهندسی تألیف شده است. با اذعان به این نکته که روابط و زیربنای ریاضی بسیار بااهمیت است، بهتر است که بحث‌های مورد نیاز در قالب ریاضیات کاربردی یا نظری ارائه شود. به استثنای فصل دوازدهم، خود کتاب دربرگیرنده روش‌های ریاضی کاربردی است. فصل دوازدهم به تخمین حالت در سیستم‌های قدرت می‌پردازد که به درک بیشتری از روش‌های آماری و احتمالی، فراتر از آنچه در متن آمده، نیاز دارد.

هفت فصل نخست توالی منطقی و طبیعی دارد. هر فصل پیچیدگی‌های بیشتری از برنامه‌ریزی بهینه تولید در سیستم‌های قدرت و روش‌های جدید حل را مطرح می‌کند. در فصل هشتم، روش‌های برنامه‌ریزی تولید بررسی و روش‌های احتمالی برای محاسبه مصرف سوخت و

هزینه تولید انرژی الکتریکی تشریح می‌شود. فصل هشتم از لحاظ محتوا منفرد است و می‌توان آن را پس از اتمام هفت فصل در هر زمان دلخواهی تدریس کرد. در فصل نهم، کنترل تولید و رویه‌های به‌کاررفته در صنعت برق و حوضچه‌های توان امریکا ارائه شده است. در این فصل مؤلفان تلاش دارند تا تصویری کلی از اجزای مختلف کنترلی سیستم و نحوه تعامل آن‌ها را نشان دهند.

تبادل توان و انرژی، مسائل اقتصادی تولید و برنامه‌ریزی تولید برای بهره‌برداری اقتصادی شبکه‌های به‌هم‌پیوسته در فصل دهم بحث شده است. فصل یازدهم به امنیت سیستم قدرت می‌پردازد و چارچوب‌های تحلیلی را برای کنترل سیستم قدرت در کارکرد ایمن معرفی می‌کند. رویه‌های مرتبط به امنیت سیستم قدرت تلاش دارد تا سیستم قدرت را در حالت دفاعی بهره‌برداری و کنترل کند تا تأثیر رخدادهای خرابی‌ها و شرایط اضطراری حداقل شود. فصل دوازدهم مقدمه‌ای بر کاربرد تخمین حالت در سیستم‌های قدرت است. مؤلفان از روابط درست‌نمایی پیشینه استفاده کرده‌اند، زیرا که اندازه‌گیری‌های کمی و توابع وزن‌دار در طی روش کاملاً به‌صورت طبیعی به‌دست می‌آید.

برای هر فصل تعدادی مسئله و مرجع نیز در نظر گرفته شده است. حل بسیاری از مسائل به رایانه نیاز دارد. مؤلفان در دانشگاه RPI توانستند برنامه‌هایی چون پخش بار و دیسپاچینگ اقتصادی واحدها را در دسترس دانشجویان قرار دهند. هم‌اکنون دانشجویان فنی توانایی مناسب را برای کار با رایانه دارند. یک شبکه قدرت واقعی ابعاد بسیار بزرگی دارد که مسائل با ابعاد واقعی را فقط می‌توان با رایانه‌ها حل کرد.

مؤلفان از کلمنت (K.A. Clements)، هاپ (H.H. Happ)، مریل (M.M. Merrill)، پَنگ (C.K. Pang)، ساجر (M.A. Sager) و وستکد (J.C. Westcode) که متون اولیه کتاب را مرور کردند و پیشنهادهایی در رابطه با غنای بیشتر اظهار داشتند، کمال تشکر را دارد. در ضمن دکتر کلمنت نسخه اولیه کتاب را در دانشگاه RPI و دوره ویژه مهندسان برق را در بوستون ماساچوست تدریس کرده‌اند.

مطالب این کتاب از کارهای همکاران فعلی و پیشین مؤلفان در مؤسسه PTI، شرکت‌های GE (General Electric Co.) و L&N (Leeds and Northup Co) نشئت گرفته است. از برخی مقاله‌های IEEE نیز به‌مثابه منبع اصلی استفاده و ارجاع داده شده است. ممکن است برخی مقاله‌های مورد علاقه افراد حذف شده باشد که موضوعی اجتناب‌ناپذیر است و انتخاب مقاله‌ها و

مراجع سلیقه‌ای است و در این زمینه نیازی به عذرخواهی نیست و فقط از خوانندگان می‌خواهیم تا خود با استفاده از مراجع به منابع دلخواه دسترسی یابند. در پایان از لیان براون (Liane Brown) و بونالین مک لین (Bonnalyne MacLean) به دلیل حرفچینی بسیار خوب متن اصلی کتاب تشکر می‌کنیم. این کتاب به تمامی استادان خود به‌ویژه دکتر گراس (E.T.B. Gross) تقدیم می‌شود.

آلن جی. وود
بروس اف. وولنبرگ

فصل اول

مقدمه

۱.۱. مقدمه اهداف دوره آموزشی

اهداف دوره یک‌ترمی در مقطع تحصیلات تکمیلی در زمینه تولید، بهره‌برداری و کنترل توان الکتریکی به شرح زیر است:

۱. آشنایی دانشجویان مهندسی برق- قدرت با سیستم‌های تولید توان، بهره‌برداری اقتصادی و نحوه کنترل آن‌ها.

۲. شناساندن مشخصه‌های خروجی مهم سیستم‌های تولید توان حرارتی و برق-آبی.

۳. شناساندن روش‌های ریاضی بهینه‌سازی و کاربرد آن‌ها در مسائل بهره‌برداری عملی.

۴. شناساندن روش‌هایی برای حل مسائل پیچیده؛ شامل تحلیل‌های اقتصادی و تحلیل شبکه؛ ارائه این روش‌ها با مثال‌های نسبتاً ساده.

۵. شناساندن روش‌های کنترلی جدید به‌کاررفته در سیستم‌های تولید توان.

۶. شناساندن «موضوع‌های جاری»: موضوع‌های جاری بخش‌هایی از بحث‌های بهره‌برداری سیستم قدرت که پیوسته در حال تغییر و تکامل می‌باشد. این بخش به روش‌های نوینی برای حل مشکلات گذشته و پیش‌آمده کنونی که ناشی از تغییرات فنی در ساختار سیستم قدرت، تغییرات ساختارهای نظارتی و تغییر ساختارهای اقتصادی است، می‌پردازد.

۲.۱. محتوای دوره

موضوع‌هایی که در این دوره به آن‌ها پرداخته خواهد شد، عبارت‌اند از:

۱. مشخصه‌های تولید توان،

۲. صنعت برق به‌عنوان فعالیتی تجاری،