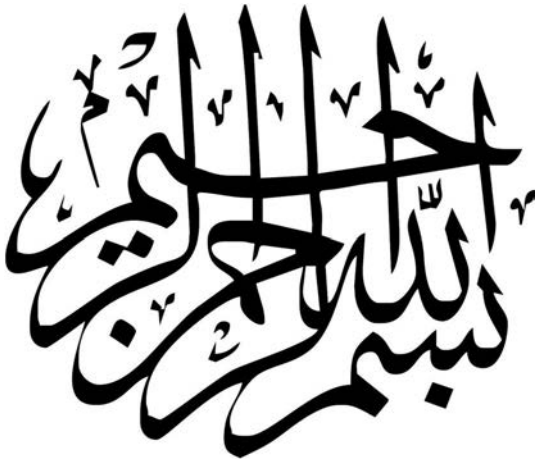
بسم الله الرحمن الرحيم

پایداری و کنترل سیستمهای قدرت

(جلد اول)

نگارنده

پروفسور پرابها شانکار کندور

مترجمان

دکتر حسین سیفی

دکتر علی خاکی صدیق

۱۳۹۵

سرشناسه: کندور، پرابها
Kundur, P.(Prabha)
عنوان و نام پدیدآور: پایداری و کنترل سیستمهای قدرت/مؤلف پرابها کندور؛ مترجمان حسین سیفی، علی خاکی‌صدیق.
مشخصات نشر: تهران: دانشگاه تربیت مدرس ، مرکز نشر آثار علمی، ۱۳۹۰ .
مشخصات ظاهری: ۲ج.: مصور، جدول، نمودار.
فروست: انتشارات دانشگاه تربیت مدرس؛ ۳۶.
شابک: دوره: ۹-۰۲-۶۲۱۳-۹۶٤-۹۷۸؛ ۲۶۵۰۰ ریال ۵-۰۰-۶۲۱۳-۹۶٤-۹۷۸ : ج.۱ ؛ ج. :۲-۰۱-۶۲۱۳-۹۶٤-۹۷۸ ۲
یادداشت: عنوان اصلی: Power system stability and control,c1994
یادداشت: چاپ دوم.
یادداشت: چاپ قبلی : دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر، ۱۳۷۶.
یادداشت: ج.۲ (چاپ اول: ۱۳۹۰) (فیپا)
یادداشت: ج.۱ و ۲ (چاپ سوم: ۱۳۹۱) (فیپا).
یادداشت: ج.۱ و ۲ (چاپ چهارم: ۱۳۹۲) (فیپا).
یادداشت: ج.۱ و ۲ (چاپ پنجم: ۱۳۹۳) (فیپا).
یادداشت: واژه‌نامه.
یادداشت: کتابنامه.
یادداشت: نمایه.
موضوع: برق -- سیستم‌ها -- پایداری
موضوع: برق -- سیستمها -- کنترل
شناسه افزوده: سیفی، حسین، ۱۳۳۶ - ، مترجم
شناسه افزوده: خاکی صدیق، علی، ۱۳٤۱ - ، مترجم
شناسه افزوده: دانشگاه تربیت مدرس. مرکز نشر آثار علمی
رده‌بندی کنگره: ۱۳۹۰ ۲پ۹ک/ ۱۰۰۵ TK
رده‌بندی دیویی: ۳۱۹/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی: ۲٤۲۶۶۱۷

پایداری و کنترل سیستمهای قدرت
نگارنده: پرابها کندور
ویراستار ادبی و فنی: مهندس غلامعلی منتظر
طراح جلد: سمیرا آفرینش
حروفچین: ودید
ناشر: مرکز نشر آثار علمی دانشگاه تربیت مدرس
شماره انتشار: ۳۶
شماره پیاپی: ۲۳۱
تاریخ انتشار: ۱۳۹۵
شمارگان: ۱۰۰۰

شابک دوره:۹-۰۲-۶۲۱۳-۹۶٤-۹۷۸ **ISBN: 978-964-6213-02-9 (2 Vol. Set)**
شابک جلد اول:۵ -۰۰-۶۲۱۳-۹۶٤- ۹۷۸ **ISBN: 978-964-6213-00-5 (Vol. 1)**

نوبت چاپ:هفتم
کارشناس اجرایی: مرسده برنجی
ناظر چاپ: مصطفی جانجانی
لیتوگرافی: ایران گرافیک
چاپ و صحافی: قشقایی
مرکز پخش: تقاطع بزرگراه‌های آل‌احمد و دکتر چمران،
دانشگاه تربیت مدرس، مرکز نشر آثار علمی، صندوق پستی: ۳۱۸-۱٤۱۱۵
تلفن: ۸۲۸۸۳۰۹۶ دورنگار: ۸۲۸۸٤۱۹۲
بها:۳۵۰۰۰۰ریال

صحت ترجمه کتاب برعهدهٔ مترجمان و صحت مطالب کتاب برعهده نگارنده است.

فهرست مطالب

پیشگفتار مترجمان
دیباچه مؤلف
پیشگفتار

بخش ۱ : زمینهٔ عمومی
فصل ۱ : مشخصه‌های عمومی سیستمهای مدرن قدرت ۱
۱-۱ پیدایش و تکامل سیستمهای قدرت ۱
۱-۲ ساختار سیستم قدرت ۵
۱-۳ کنترل سیستم قدرت ۸
۱-۴ معیارهای طراحی و بهره‌برداری برای پایداری ۱۵
منابع ۱۹

فصل ۲ : مقدمه‌ای بر مسألهٔ پایداری سیستمهای قدرت ۲۱
۲-۱ مفاهیم و تعاریف اولیه ۲۱
۲-۱-۱ پایداری زاویه‌ای روتور ۲۳
۲-۱-۲ پایداری ولتاژ و فروپاشی ولتاژ ۳۴
۲-۱-۳ پایداری میان‌مدت و بلندمدت ۴۳
۲-۲ طبقه بندی پایداری ۴۵
۲-۳ مروری بر تاریخچهٔ مسائل پایداری ۴۷
منابع ۵۳

بخش ۲ : مشخصه‌ها و مدلسازی تجهیزات
فصل ۳ : نظریه و مدلسازی ماشینهای سنکرون ۵۵
۳-۱ شرح فیزیکی ۵۶
۳-۱-۱ ساختار آرمیچر و تحریک ۵۶

۳-۱-۲ ماشینهای سنکرون با چند زوج قطب ۶۰
۳-۱-۳ شکل امواج نیروی محرکهٔ مغناطیسی ۶۱
۳-۱-۴ محورهای طولی و عرضی ۶۶
۳-۲ توصیف ریاضی ماشین سنکرون ۶۶
۳-۲-۱ مروری بر معادلات مدارهای مغناطیسی ۶۹
۳-۲-۲ معادلات اصلی حاکم بر ماشین سنکرون ۷۳
۳-۳ تبدیل dq۰ ..... ۸۳
۳-۴ نمایش در مبنای واحد ۹۲
۳-۴-۱ سیستم مبنای واحد برای کمیتهای استاتور ۹۳
۳-۴-۲ معادلات در مبنای واحد ولتاژهای استاتور ۹۴
۳-۴-۳ معادلات در مبنای واحد ولتاژهای روتور ۹۵
۳-۴-۴ معادلات شاردور استاتور ۹۶
۳-۴-۵ معادلات شاردور روتور ۹۶
۳-۴-۶ سیستم مبنای واحد برای روتور ۹۷
۳-۴-۷ توان و گشتاور مبنای واحد ۱۰۱
۳-۴-۸ سیستمهای جایگزین مبنای واحد و تبدیلات ۱۰۱
۳-۴-۹ خلاصه‌ای از معادلات در مبنای واحد ۱۰۳
۳-۵ مدارهای معادل محورهای طولی و عرضی ۱۰۷
۳-۶ تحلیل حالت ماندگار ۱۱۳
۳-۶-۱ روابط ولتاژ، جریان و شاردور ۱۱۴
۳-۶-۲ نمودار فازوری ۱۱۵
۳-۶-۳ زاویه روتور ۱۱۹
۳-۶-۴ مدار معادل حالت ماندگار ۱۲۰
۳-۶-۵ روش محاسبه مقادیر حالت ماندگار ۱۲۲
۳-۷ مشخصه‌های گذرای الکتریکی ماشین سنکرون ۱۲۸
۳-۷-۱ جریان اتصال کوتاه در یک مدار ساده RL ۱۲۸
۳-۷-۲ اتصال کوتاه سه فاز در پایانه‌های یک ماشین سنکرون ۱۲۹

۳-۷-۳ حذف آفست جریان مستقیم در جریان اتصال کوتاه ۱۳۱
۳-۸ اشباع مغناطیسی ۱۳۳
۳-۸-۱ مشخصه‌های مدار باز و اتصال کوتاه ۱۳۴
۳-۸-۲ نمایش اشباع در مطالعات پایداری ۱۳۶
۳-۸-۳ مدلسازی اصلاح شدهٔ اشباع ۱۴۱
۳-۹ معادلات حرکت ۱۵۴
۳-۹-۱ مروری بر مکانیزم حرکت ۱۵۵
۳-۹-۲ معادلهٔ نوسان (تاب) ۱۵۵
۳-۹-۳ زمان شروع حرکت مکانیکی ۱۵۹
۳-۹-۴ محاسبه ثابت لختی ۱۵۹
۳-۹-۵ نمایش اجزا در مطالعات پایداری ۱۶۳
منابع ۱۶۴

فصل ۴ : پارامترهای ماشین سنکرون ۱۶۷
۴-۱ پارامترهای عملیاتی ۱۶۷
۴-۲ پارامترهای استاندارد ۱۷۲
۴-۳ مشخصه‌های پاسخ فرکانسی ۱۹۰
۴-۴ تعیین پارامترهای ماشین سنکرون ۱۹۲
منابع ۲۰۰

فصل ۵ : نمایش ماشین سنکرون در مطالعات پایداری ۲۰۳
۵-۱ ساده‌سازیهای ضروری در مطالعات سیستمهای بزرگ ۲۰۳
۵-۱-۱ چشمپوشی از عبارات ولتاژ ترانسفورمری استاتور ۲۰۳
۵-۱-۲ چشمپوشی از تأثیر تغییرات سرعت بر ولتاژهای استاتور ۲۰۸
۵-۲ مدل ساده شده با چشمپوشی از سیم‌پیچهای میراکننده ۲۱۳
۵-۳ مدل با شاردور ثابت ۲۱۷
۵-۳-۱ مدل کلاسیک ۲۱۷

۵-۳-۲ مدل با شاردور ثابت و با در نظر گرفتن تأثیر مدارهای زیرگذرا ۲۲۳
۵-۳-۳ خلاصه‌ای از مدلهای ساده شده برای بازه‌های زمانی مختلف ۲۲۵
۵-۴ حدود قابلیت تولید توان راکتیو در ماشین سنکرون..... ۲۲۵
۵-۴-۱ منحنی‌های قابلیت توان راکتیو ۲۲۶
۵-۴-۲ منحنیهای V و منحنیهای ترکیبی..... ۲۳۳
منابع ۲۳۶

فصل ۶: انتقال به صورت جریان متناوب ۲۳۷
۶-۱ خطوط انتقال..... ۲۳۸
۶-۱-۱ مشخصه‌های الکتریکی..... ۲۳۸
۶-۱-۲ معادلات عملکرد..... ۲۴۰
۶-۱-۳ بار امپدانس ضربه‌ای (طبیعی) ۲۴۴
۶-۱-۴ مدار معادل خط انتقال ۲۴۵
۶-۱-۵ پارامترهای نوعی ۲۴۸
۶-۱-۶ ملاحظات عملکرد خطوط انتقال فشار قوی ۲۵۰
۶-۱-۷ نمایهٔ ولتاژ و جریان در شرایط بی‌باری ۲۵۲
۶-۱-۸ مشخصه‌های ولتاژ - توان ۲۵۷
۶-۱-۹ ملاحظات مربوط به توان انتقالی و پایداری ۲۶۲
۶-۱-۱۰ تأثیر تلفات خط بر مشخصه‌های V-P و Q-P..... ۲۶۷
۶-۱-۱۱ حدود حرارتی ۲۶۸
۶-۱-۱۲ مشخصه‌های بارپذیری خط ۲۷۰
۶-۲ ترانسفورمرها..... ۲۷۳
۶-۲-۱ نمایش ترانسفورمرهای دو سیم‌پیچه..... ۲۷۵
۶-۲-۲ نمایش ترانسفورمرهای سه سیم‌پیچه ۲۸۵
۶-۲-۳ ترانسفورمرهای تغییردهندهٔ فاز..... ۲۹۱
۶-۳ انتقال توان بین منابع فعال ۲۹۵
۶-۴ تحلیل پخش بار..... ۳۰۱

۶-۴-۱ معادلات شبکه ۳۰۴
۶-۴-۲ روش گوس - سایدل ۳۰۶
۶-۴-۳ روش نیوتن - رافسون (NR) ۳۰۸
۶-۴-۴ روشهای پخش بار دکوپلهٔ سریع (FDLP) ۳۱۳
۶-۴-۵ مقایسه روشهای حل پخش بار ۳۱۵
۶-۴-۶ استفاده از روش مبتنی بر خاصیت پراکندگی ماتریس و تجزیه به عوامل مثلثی شکل ۳۱۷
۶-۴-۷ کاهش اندازهٔ شبکه ۳۱۸
منابع ۳۱۹

فصل ۷: بارهای سیستمهای قدرت ۳۲۱
۷-۱ مفاهیم اولیهٔ مدلسازی بار ۳۲۱
۷-۱-۱ مدلهای استاتیکی بار ۳۲۲
۷-۱-۲ مدلهای دینامیکی بار ۳۲۵
۷-۲ مدلسازی موتورهای القایی ۳۳۰
۷-۲-۱ معادلات یک موتور القایی ۳۳۱
۷-۲-۲ مشخصه‌های حالت ماندگار ۳۴۰
۷-۲-۳ ساختارهای دیگر روتور ۳۴۷
۷-۲-۴ نمایش اشباع ۳۵۱
۷-۲-۵ نمایش در مبنای واحد ۳۵۲
۷-۲-۶ نمایش در مطالعات پایداری ۳۵۶
۷-۳ مدل موتور سنکرون ۳۶۲
۷-۴ به دست آوردن پارامترهای مدل بار ۳۶۲
۷-۴-۱ روش مبتنی بر آزمایش ۳۶۲
۷-۴-۲ روش مبتنی بر مشخصهٔ مؤلفه‌های تشکیل دهندهٔ بار ۳۶۵
۷-۴-۳ مشخصه‌های نوعی بار ۳۶۶
منابع ۳۷۰

فصل ۸: سیستمهای تحریک ۳۷۳
۸-۱ نکات مربوط به سیستم تحریک ۳۷۳
۸-۲ اجزاء سیستم تحریک ۳۷۶
۸-۳ انواع سیستم تحریک ۳۷۷
۸-۳-۱ سیستمهای تحریک جریان مستقیم ۳۷۸
۸-۳-۲ سیستمهای تحریک جریان متناوب ۳۸۰
۸-۳-۳ سیستمهای تحریک استاتیکی ۳۸۴
۸-۳-۴ پیشرفتهای اخیر و جهت‌گیری آینده ۳۸۸
۸-۴ معیارهای عملکرد دینامیکی ۳۸۹
۸-۴-۱ معیارهای عملکرد سیگنال بزرگ ۳۸۹
۸-۴-۲ معیارهای عملکرد سیگنال کوچک ۳۹۲
۸-۵ توابع کنترلی و حفاظتی ۳۹۷
۸-۵-۱ تنظیم‌کننده‌های جریان متناوب و مستقیم ۳۹۸
۸-۵-۲ مدارهای پایدارساز سیستم تحریک ۳۹۸
۸-۵-۳ پایدارساز سیستم قدرت (PSS) ۳۹۹
۸-۵-۴ جبرانگر بار ۴۰۰
۸-۵-۵ محدود کنندهٔ زیرتحریک ۴۰۲
۸-۵-۶ محدود کنندهٔ فوق تحریک ۴۰۴
۸-۵-۷ محدود کننده و حفاظت ولت بر هرتز ۴۰۶
۸-۵-۸ مدارهای اتصال کوتاه کنندهٔ تحریک ۴۰۷
۸-۶ مدلسازی سیستمهای تحریک ۴۰۹
۸-۶-۱ سیستم مبنای واحد ۴۱۰
۸-۶-۲ مدلسازی اجزای سیستم تحریک ۴۱۷
۸-۶-۳ مدل سیستمهای تحریک کامل ۴۳۵
۸-۶-۴ آزمایش میدان برای به دست آوردن و تأیید صحت مدل ۴۴۸
منابع ۴۴۹

فصل ۹ : محرکه‌ها(توربینها) و سیستمهای تغذیه انرژی ۴۵۳
۹-۱ توربینهای آبی و سیستمهای گاورنر ۴۵۴
۹-۱-۱ تابع تبدیل توربین آبی ۴۵۶
۹-۱-۲ مدل غیرخطی توربین با فرض غیرقابل ارتجاع بودن ستون آب ۴۶۵
۹-۱-۳ گاورنر توربینهای آبی ۴۷۲
۹-۱-۴ مدل مشروح سیستم هیدرولیکی ۴۸۶
۹-۱-۵ راهنمایی برای مدلسازی توربینهای آبی ۵۰۰
۹-۲ توربینهای بخار و سیستمهای گاورنر ۵۰۱
۹-۲-۱ مدلسازی توربینهای بخار ۵۰۷
۹-۲-۲ کنترلهای توربین بخار ۵۱۹
۹-۲-۳ قابلیت عملکرد توربین بخار خارج از فرکانس معمول ۵۳۶
۹-۳ سیستمهای انرژی حرارتی ۵۴۳
۹-۳-۱ سیستمهای انرژی با سوخت فسیلی ۵۴۳
۹-۳-۲ سیستمهای انرژی مبنا هسته‌ای ۵۵۱
۹-۳-۳ مدلسازی سیستمهای انرژی حرارتی ۵۵۸
منابع ۵۵۹

فصل ۱۰ : انتقال به صورت جریان مستقیم فشار قوی ۵۶۳
۱۰-۱ ساختارها و اجزای سیستم HVDC ۵۶۴
۱۰-۱-۱ طبقه‌بندی خطوط HVDC ۵۶۴
۱۰-۱-۲ اجزای سیستم انتقال HVDC ۵۶۸
۱۰-۲ نظریه و معادلات عملکرد کنورتور ۵۷۱
۱۰-۲-۱ مشخصه‌های شیر ۵۷۱
۱۰-۲-۲ مدارهای کنورتور ۵۷۳
۱۰-۲-۳ ظرفیت ترانسفورمر کنورتور ۶۰۰
۱۰-۲-۴ کنورتورهای چند پُله ۶۰۱
۱۰-۳ عملکرد غیرعادی ۶۰۶

۱۰-۳-۱ حالت معکوس هدایتی (آتش بی‌موقع) ۶۰۶
۱۰-۳-۲ نقص کموتاسیون ۶۰۸
۱۰-۴ کنترل سیستمهای جریان مستقیم فشار قوی HVDC ۶۱۰
۱۰-۴-۱ اصول اساسی کنترل ۶۱۰
۱۰-۴-۲ پیاده‌سازی کنترل ۶۲۸
۱۰-۴-۳ سیستمهای کنترل آتش کنورتور ۶۳۰
۱۰-۴-۴ بستن و کنارگذری شیر ۶۳۷
۱۰-۴-۵ راه‌اندازی، توقف و معکوس کردن جهت انتقال توان ۶۳۸
۱۰-۴-۶ کنترلهای موجود در تقویت عملکرد سیستم جریان متناوب ۶۴۱
۱۰-۵ هارمونیکها و فیلترها ۶۴۲
۱۰-۵-۱ هارمونیکهای طرف جریان متناوب ۶۴۳
۱۰-۵-۲ هارمونیکهای طرف جریان مستقیم ۶۴۶
۱۰-۶ اثر قدرت سیستم جریان متناوب برتأثیر متقابل بین سیستم جریان
متناوب و جریان مستقیم ۶۴۸
۱۰-۶-۱ نسبت اتصال کوتاه ۶۴۸
۱۰-۶-۲ توان راکتیو و قدرت سیستم جریان متناوب ۶۴۹
۱۰-۶-۳ مسائل مربوط به سیستمهای با ESCR کم ۶۵۰
۱۰-۶-۴ راه‌حلهای مسائل مربوط به سیستمهای ضعیف ۶۵۲
۱۰-۶-۵ ثابت لختی موثر ۶۵۳
۱۰-۶-۶ کموتاسیون اجباری ۶۵۴
۱۰-۷ پاسخ به خطاهای سیستم جریان متناوب و جریان مستقیم ۶۵۵
۱۰-۷-۱ خطاهای خط جریان مستقیم ۶۵۶
۱۰-۷-۲ خطاهای کنورتور ۶۵۸
۱۰-۷-۳ خطاهای سیستم جریان متناوب ۶۵۸
۱۰-۸ سیستمهای چند پایانه‌ای HVDC ۶۶۳
۱۰-۸-۱ ساختارهای شبکهٔ MTDC ۶۶۳
۱۰-۸-۲ کنترل سیستمهای MTDC ۶۶۶

۱۰-۹ مدلسازی سیستمهای HVDC ۶۷۰
۱۰-۹-۱ نمایش برای حل پخش بار ۶۷۱
۱۰-۹-۲ سیستم مبنای واحد برای کمیتهای جریان مستقیم ۶۹۴
۱۰-۹-۳ نمایش در مطالعات پایداری ۶۹۶
منابع ۷۱۰

فصل ۱۱ : کنترل توان حقیقی و توان راکتیو ۷۱۵
۱۱-۱ توان حقیقی و کنترل فرکانس ۷۱۵
۱۱-۱-۱ اصول اساسی کنترل سرعت ۷۱۶
۱۱-۱-۲ کنترل خروجی توان واحد تولیدی ۷۲۸
۱۱-۱-۳ مشخصهٔ ترکیبی تنظیم سیستمهای قدرت ۷۳۲
۱۱-۱-۴ آهنگ پاسخ سیستمهای گاورنر توربین ۷۳۵
۱۱-۱-۵ اصول کنترل خودکار تولید (AGC) ۷۳۹
۱۱-۱-۶ پیاده‌سازی AGC ۷۵۸
۱۱-۱-۷ بارزدایی کمبود فرکانس ۷۶۶
۱۱-۲ کنترل توان راکتیو و ولتاژ ۷۷۱
۱۱-۲-۱ تولید و جذب توان راکتیو ۷۷۲
۱۱-۲-۲ روشهای کنترل ولتاژ ۷۷۳
۱۱-۲-۳ راکتورهای شنت ۷۷۴
۱۱-۲-۴ خازنهای شنت ۷۷۷
۱۱-۲-۵ خازنهای سری ۷۸۰
۱۱-۲-۶ کندانسورهای سنکرون ۷۸۶
۱۱-۲-۷ سیستمهای استاتیکی توان راکتیو ۷۸۷
۱۱-۲-۸ اصول جبرانسازی سیستم انتقال ۸۰۷
۱۱-۲-۹ مدلسازی وسایل جبرانسازی راکتیو ۸۲۷
۱۱-۲-۱۰ کاربرد ترانسفورمرهای تغییردهندهٔ تپ به سیستمهای انتقال ۸۳۵
۱۱-۲-۱۱ تنظیم ولتاژ سیستم توزیع ۸۳۸

۱۱-۲-۱۲ مدلسازی سیستمهای کنترل ULTC ترانسفورمر..... ۸۴۳
۱۱-۳ روشهای تحلیل پخش بار..... ۸۴۷
۱۱-۳-۱ پخش بار قبل از خطا ۸۴۹
۱۱-۳-۲ پخش بار بعد از خطا ۸۴۹
منابع ۸۵۲
واژه‌نامه ۸۵۷
واژه‌نما ۸۷۴

بخش ۳: پایداری سیستم: جنبه‌های فیزیکی، تحلیل و بهبود

فصل ۱۲: پایداری سیگنال ـ کوچک ۸۸۵
۱۲-۱ مفاهیم اساسی پایداری سیستمهای دینامیکی..... ۸۸۶
۱۲-۱-۱ نمایش فضای حالت..... ۸۸۶
۱۲-۱-۲ پایداری سیستم دینامیکی..... ۸۸۸
۱۲-۱-۳ خطی‌سازی ۸۸۹
۱۲-۱-۴ تحلیل پایداری..... ۸۹۳
۱۲-۲ خواص ویژهٔ ماتریس حالت..... ۸۹۴
۱۲-۲-۱ مقادیر ویژه ۸۹۴
۱۲-۲-۲ بردارهای ویژه ۸۹۵
۱۲-۲-۳ ماتریسهای مُدال ۸۹۶
۱۲-۲-۴ حرکت آزاد سیستم دینامیکی ۸۹۶
۱۲-۲-۵ شکل مُد، حساسیت، و عامل مشارکت..... ۹۰۰
۱۲-۲-۶ کنترل‌پذیری و رؤیت‌پذیری..... ۹۰۴
۱۲-۲-۷ مفهوم فرکانس مختلط ۹۰۵
۱۲-۲-۸ روابط بین خواص ویژه و توابع تبدیل ۹۰۷
۱۲-۲-۹ محاسبهٔ مقادیر ویژه..... ۹۱۵
۱۲-۳ پایداری سیگنال کوچک یک سیستم تک ماشینه متصل به شین بینهایت.... ۹۱۶
۱۲-۳-۱ ژنراتور نمایش داده شده با مدل کلاسیک..... ۹۱۷

۱۲-۳-۲ اثر دینامیکهای مدار تحریک ماشین سنکرون ۹۲۷
۱۲-۴ اثر سیستم تحریک ۹۴۸
۱۲-۵ پایدارساز سیستم قدرت ۹۵۷
۱۲-۶ ماتریس حالت سیستم با سیم‌پیچ میراکننده ۹۷۳
۱۲-۷ پایداری سیگنال کوچک سیستمهای چندماشینه ۹۸۳
۱۲-۸ روشهای خاص در تحلیل سیستمهای بسیار بزرگ ۹۹۱
۱۲-۹ مشخصه‌های مسائل پایداریِ سیگنال کوچک ۱۰۱
منابع ۱۰۱۷

فصل ۱۳ : پایداری گذرا ۱۰۲۱
۱۳-۱ دیدی مقدماتی از پایداری گذرا [۱ - ۳] ۱۰۲۱
۱۳-۲ روشهای انتگرالگیری عددی [۴ - ۶] ۱۰۳۱
۱۳-۲-۱ روش اویلر ۱۰۳۱
۱۳-۲-۲ روش اویلر اصلاح شدهٔ ۱۰۳۳
۱۳-۲-۳ روشهای رانگ ـ کوتا (R-K) [۴ و ۵] ۱۰۳۴
۱۳-۲-۴ پایداری عددی روشهای انتگرالگیری صریح ۱۰۳۷
۱۳-۲-۵ روشهای انتگرال‌گیری ضمنی ۱۰۳۷
۱۳-۳ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی سیستم قدرت ۱۰۴۴
۱۳-۳-۱ ساختار مدل سیستم قدرت ۱۰۴۴
۱۳-۳-۲ نمایش ماشین سنکرون ۱۰۴۶
۱۳-۳-۳ نمایش سیستم تحریک ۱۰۵۲
۱۳-۳-۴ نمایش شبکهٔ انتقال و بار ۱۰۵۴
۱۳-۳-۵ معادلات کلی سیستم ۱۰۵۶
۱۳-۳-۶ پاسخ معادلات کلی سیستم ۱۰۵۸
۱۳-۴ تحلیل خطاهای نامتعادل ۱۰۷۰
۱۳-۴-۱ مقدمه‌ای بر مؤلفه‌های متقارن [۱۵ - ۱۸] ۱۰۷۰
۱۳-۴-۲ امپدانسهای توالی ماشینهای سنکرون [۱۵] ۱۰۷۵

۱۳-۴-۳ امپدانسهای توالی خطوط انتقال ۱۰۸۳
۱۳-۴-۴ امپدانسهای توالی ترانسفورمرها ۱۰۸۳
۱۳-۴-۵ شبیه‌سازی انواع مختلف خطا ۱۰۸۶
۱۳-۴-۶ نمایش شرایط هادی-باز ۱۰۹۸
۱۳-۵ عملکرد رله‌های حفاظتی ۱۱۰۳
۱۳-۵-۱ حفاظت خط انتقال [۲۱ - ۲۳] ۱۱۰۳
۱۳-۵-۲ زمانهای رفع خطا ۱۱۱۳
۱۳-۵-۳ کمیتهای رله‌ای حین نوسان ۱۱۱۶
۱۳-۵-۴ ارزیابی عملکرد رلهٔ دیستانس حین نوسان ۱۱۲۱
۱۳-۵-۵ جلوگیری از عمل، حین شرایط گذرا ۱۱۲۲
۱۳-۵-۶ بازبست خودکار خط ۱۱۲۵
۱۳-۵-۷ حفاظت عدم همگامی ژنراتور ۱۱۲۶
۱۳-۵-۸ حفاظت فقدان تحریک ۱۱۳۱
۱۳-۶ مطالعهٔ موردی پایداری گذرای یک سیستم بزرگ ۱۱۳۸
۱۳-۷ روش مستقیم تحلیل پایداری گذرا ۱۱۴۶
۱۳-۷-۱ توصیف روش تابع انرژی گذرا ۱۱۴۶
۱۳-۷-۲ تحلیل سیستمهای عملی قدرت [۴۰ - ۴۹] ۱۱۵۱
۱۳-۷-۳ محدودیتهای روشهای مستقیم ۱۱۵۹
منابع ۱۱۶۱

فصل ۱۴ : پایداری ولتاژ ۱۱۶۱
۱۴-۱ مفاهیم اساسیِ مربوط به پایداری ولتاژ ۱۱۶۲
۱۴-۱-۱ مشخصه‌های سیستم انتقال ۱۱۶۲
۱۴-۱-۲ مشخصه‌های ژنراتور ۱۱۶۸
۱۴-۱-۳ مشخصه‌های بار [۱، ۵] ۱۱۷۱
۱۴-۱-۴ مشخصه‌های وسایل جبرانسازی راکتیو ۱۱۷۳
۱۴-۲ فروپاشی ولتاژ ۱۱۷۷

۱۴-۲ فروپاشی ولتاژ ۱۱۸۳
۱۴-۲-۱ طرح نوعی از فروپاشی ولتاژ ۱۱۸۳
۱۴-۲-۲ مشخص سازی کلی براساس رویدادهای واقعی ۱۱۸۴
۱۴-۲-۳ دسته‌بندی پایداری ولتاژ ۱۱۸۶
۱۴-۳ تحلیل پایداری ولتاژ ۱۱۸۶
۱۴-۳-۱ ملاحظات مدلسازی ۱۱۸۷
۱۴-۳-۲ تحلیل دینامیکی ۱۱۸۸
۱۴-۳-۳ تحلیل استاتیکی ۱۲۰۱
۱۴-۳-۴ تعیین کوتاهترین فاصله تا ناپایداری ۱۲۲۰
۱۴-۳-۵ تحلیل پخش بار تداومی ۱۲۲۶
۱۴-۴ جلوگیری از فروپاشی ولتاژ ۱۲۳۳
۱۴-۴-۱ معیارهای طراحی سیستم ۱۲۳۴
۱۴-۴-۲ معیارهای بهره‌برداری از سیستم ۱۲۳۶
منابع ۱۲۳۷

فصل ۱۵ : نوسانهای زیر سنکرون ۱۲۴۱
۱۵-۱ مشخصه‌های پیچشی توربین - ژنراتور ۱۲۴۲
۱۵-۱-۱ مدل سیستم محور [۱ - ۶] ۱۲۴۲
۱۵-۱-۲ فرکانسهای طبیعی پیچشی و صورتهای مُد ۱۲۵۰
۱۵-۲ تداخل پیچشی با کنترلهای سیستم قدرت ۱۲۵۷
۱۵-۲-۱ تداخل با کنترلهای تحریک ژنراتور ۱۲۵۷
۱۵-۲-۲ تداخل با گاورنرهای سرعت ۱۲۶۶
۱۵-۲-۳ تداخل با کنورتورهای جریان مستقیم نزدیک ۱۲۶۶
۱۵-۳ تشدید زیر سنکرون ۱۲۷۰
۱۵-۳-۱ مشخصه‌های سیستمهای انتقالِ جبران شده ۱۲۷۰
با خازن سری [۱۶ و ۱۵]

۱۵-۳-۲ خود تحریکی ناشی از اثر ژنراتور القایی ۱۲۷۲
۱۵-۳-۳ تداخل پیچشی منجر به SSR ۱۲۷۳
۱۵-۳-۴ روشهای تحلیلی ۱۲۷۴
۱۵-۳-۵ روشهای مواجهه با مسائل SSR ۱۲۸۰
۱۵-۴ اثر اغتشاشهای حاصل از کلیدزنی شبکه ۱۲۸۱
۱۵-۵ تداخل پیچشی بین واحدهایی که به طور تنگاتنگ به هم تزویج شده‌اند ۱۲۸۶
۱۵-۶ مشخصه‌های پیچشی ژنراتور آبی ۱۲۸۹
منابع ۱۲۸۹

فصل ۱۶ : پایداری میان مدت و بلند مدت ۱۲۹۵
۱۶-۱ ماهیت پاسخ سیستم به آشفتگیهای شدید ۱۲۹۵
۱۶-۲ تفاوت بین پایداری میان مدت و بلند مدت ۱۳۰۰
۱۶-۳ پاسخ نیروگاه حین آشفتگیهای شدید ۱۳۰۲
۱۶-۳-۱ نیروگاههای حرارتی ۱۳۰۲
۱۶-۳-۲ نیروگاههای آبی ۱۳۰۴
۱۶-۴ شبیه‌سازی پاسخ دینامیکی بلند مدت ۱۳۰۹
۱۶-۴-۱ هدف از شبیه‌سازیهای دینامیکی بلند مدت ۱۳۰۹
۱۶-۴-۲ ملاحظات مدلسازی ۱۳۰۹
۱۶-۴-۳ روشهای انتگرالگیریِ عددی ۱۳۱۰
۱۶-۵ مطالعات موردی دربارهٔ آشفتگیهای شدید سیستم ۱۳۱۱
۱۶-۵-۱ مطالعهٔ موردی راجع به پارهٔ پُر تولید ۱۳۱۲
۱۶-۵-۲ مطالعهٔ موردی شامل یک پارهٔ کم‌تولید ۱۳۱۶
منابع ۱۳۲۴

فصل ۱۷ : روشهای بهبود پایداری ۱۳۲۹
۱۷-۱ تقویت پایداری گذرا ۱۳۳۰
۱۷-۱-۱ رفع خطا با سرعت زیاد ۱۳۳۰
۱۷-۱-۲ کاهش راکتانس سیستم انتقال ۱۳۳۰
۱۷-۱-۳ جبرانسازی قابل تنظیم شنت ۱۳۳۲
۱۷-۱-۴ بازدارندهٔ دینامیکی [۶ - ۱۰] ۱۳۳۲
۱۷-۱-۵ کلیدزنی راکتورا ۱۳۳۳
۱۷-۱-۶ کار مستقل از قطب کلیدها ۱۳۳۳
۱۷-۱-۷ کلیدزنیِ تک قطبی ۱۳۳۴
۱۷-۱-۸ باز و بست سریع شیر توربین بخار ۱۳۳۸
۱۷-۱-۹ خارج کردن ژنراتور ۱۳۴۷
۱۷-۱-۱۰ جداسازی کنترل شدهٔ سیستم و بارزدایی ۱۳۵۰
۱۷-۱-۱۱ سیستمهای تحریک با سرعت زیاد ۱۳۵۲
۱۷-۱-۱۲ کنترل تحریک ناپیوسته [۴۰] ۱۳۵۳
۱۷-۱-۱۳ کنترل خطوط انتقال HVDC ۱۳۵۸
۱۷-۲ تقویت پایداری سیگنال کوچک ۱۳۵۹
۱۷-۲-۱ پایدارسازهای سیستم قدرت ۱۳۵۹
۱۷-۲-۲ کنترل تکمیلی جبرانسازهای استاتیکی توان راکتیو ۱۳۷۵
۱۷-۲-۳ کنترل تکمیلیِ خطوط انتقال HVDC ۱۳۸۵
منابع ۱۳۹۶
واژه‌نامه ۱۴۰۱
واژه‌نما ۱۴۰۷

پیشگفتار مترجمان

بررسی مسائل مترتب بر صنعت برق -که امروزه به عنوان یکی از بزرگترین سیستمهای موجود در جهان شناخته شده - امری مهم و نیازمند تحقیقات عمیق و گسترده است. در این میان، طی چند دههٔ اخیر، پایداری و کنترل سیستمهای قدرت، مورد توجه خاص پژوهشگران بوده است. مؤلف این کتاب، آقای دکتر پرابها کندور، حاصل دهها سال تلاش و تجربهٔ خود را در این مجموعهٔ منحصر به فرد، جمع‌آوری کرده و مؤسسهٔ انتشاراتی مک گراهیل با همکاری انستیتو پژوهش توان الکتریکی (EPRI) ، آن را به چاپ رسانده است.

اینجانبان سعی کرده‌ایم که در عین امانتداری در ترجمه، متنی روان و شیوا را عرضه کنیم به گونه‌ای که مطالب نسبتاً پیچیده؛ که بسیاری از شاخه‌های فنی و مهندسی را در بر می‌گیرد؛ به زبان فارسی در دسترس دانشجویان عزیز دوره‌های کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری و نیز استادان گرامی و پژوهشگران ارجمند قرار گیرد. اما بی‌شک ترجمهٔ چنین کتاب پر حجمی، خالی از نقص نخواهد بود و امید است این عزیزان، نظریات ارشادی خود را برای اصلاح در چاپهای بعدی ارسال فرمایند.

جلد اول را -که در قالب یازده فصل، بخشهای اول و دوم کتاب را در بر می‌گیرد - مترجم اول، و جلد دوم را -که سایر فصول کتاب را شامل می‌شود - مترجم دوم، به رشتهٔ تحریر درآورده است. گفتنی اینکه در جلد اول به کلیات، مدلسازی و مشخصه‌های تجهیزات سیستمهای قدرت و در جلد دوم به جنبه‌های فیزیکی، روشهای تحلیل و کنترل پایداری این سیستمها پرداخته شده است.

در اینجا لازم است از همهٔ افرادی که در مراحل مختلف چاپ کتاب، اینجانبان را یاری داده‌اند، صمیمانه قدردانی کنیم. در این خصوص، ذکر نام جناب آقای مهندس غلامعلی منتظر؛

بیست‌ویک

سرکار خانم آتوما فروهی، دانشجویان کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق - قدرت دانشگاه تربیت مدرس و نیز دست‌اندرکاران مرکز نشر دانشگاه تربیت مدرس ضروری است.در خاتمه از خانواده‌های خود که در مدت ترجمه این کتاب صبورانه عدم حضور فعال ما را در جمع خود متحمل شدند، صمیمانه قدردانی می‌کنیم.

امید آنکه توانسته باشیم با ترجمهٔ این کتاب، خدمت ناچیزی را به جامعه علمی و صنعتی کشور عرضه کرده باشیم.

تابستان ۱۳۷۶

حسین سیفی دانشیار دانشگاه تربیت مدرس

تهران - دانشگاه تربیت مدرس - صندوق پستی ۴۸۳۸-۱۴۱۵۵

علی خاکی صدیق دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تهران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی - صندوق پستی ۱۶۵۶-۱۶۳۱۵

دیباچه

به نقل از مهندس نامدار برق، چارلز اشتاین متز[1]، سیستم قدرت به هم پیوستهٔ امریکای شمالی، بزرگترین و پیچیده‌ترین ماشین ساخت بشر است. در حقیقت، بهت‌آور است که چنین سیستمی با درجهٔ بالایی از قابلیت اعتماد برای بینش از یک قرن کار کرده است.

قوام یک سیستم قدرت به وسیلهٔ توانایی آن در کارکرد حالت تعادل طی وضعیت عادی و آشفته اندازه‌گیری می‌شود. پایداری سیستم قدرت، مطالعهٔ رفتار این سیستمها را در موقعیتهایی از قبیل تغییر ناگهانی در بار یا تولید یا اتصال کوتاه بر خطوط انتقال در بر می‌گیرد. یک سیستم قدرت در صورتی پایدار است که واحدهای به هم پیوستهٔ تولید در حالت سنکرونیزه باقی بمانند.

توانایی سیستم قدرت در حفظ پایداری، تا حد زیادی به میراکردن نوسانهای الکترومکانیکی به وسیلهٔ کنترلهای موجود روی سیستم است از این رو، مطالعه و طراحی کنترلها بسیار مهم است.

از میان پدیده‌های پیچیدهٔ مربوط به سیستم قدرت، پایداری سیستم قدرت، از نظر درک، بغرنج‌ترین، و از نظر تحلیل، مشکلترین است. سیستمهای قدرت الکتریکیِ قرن بیست و یکم، بحث برانگیزتر هم خواهند بود زیراکه از آنها نزدیکتر به حدود پایداری، بهره‌برداری می‌شود.

من نمی‌توانم به جز دکتر پرابها کُندور[2]، به فرد شایستهٔ دیگری برای نوشتن کتابی در زمینهٔ پایداری و کنترل سیستم قدرت، فکر کنم. او فرد شناخته شده‌ای در سطح بین‌المللی در زمینهٔ پایداری سیستم قدرت است. تخصص و تجربهٔ عملی او در ارائه راه حلهای مسائل پایداری، همتا ندارد. وی نه تنها درک عمیقی از مفاهیم اصلی دارد، بلکه در سرتاسر جهان برای حل‌مسائل پایداری سیستم تأمین برق، کارکرده است دکتر کندور، دروس بسیاری را تدریس کرده، در مجامع

---

1. Charles Steinmetz
2. Prabba Kundur

حرفه‌ای و گردهماییهای کمیتهٔ صنعت، مطالب عالی را ارائه نموده و در زمینهٔ پایداری و کنترل سیستم قدرت، مقاله‌های فن ی بیشماری را به رشتهٔ تحریر در آورده است.

برای من باعث کمال مسرت است که بر این کتاب ارزشمند، دیباچه‌ای بنویسم که مطمئن هستم برای مهندسان کاربردی و دانشجویانِ مهندسی قدرت، بسیار گرانقدر خواهد بود.

دکتر نیل.ج. بالو[1]
مدیر برنامه‌ها
برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم قدرت
بخش سیستمهای الکتریکی
انستیتو پژوهش توان الکتریکی[2]

---

1. Dr. Neal J. Balu 2. Electric Power Research Institute

پیشگفتار

این کتاب راجع به درک، مدلسازی، تحلیل و روشهای بهبود مسائل کنترل و پایداری سیستم قدرت است. چنین مسائلی، ملاحظه‌های بسیار مهمی را در برنامه‌ریزی، طراحی و بهره‌برداری از سیستمهای مدرن قدرت شامل می‌شود. به دلیل رشد به هم پیوستگیها و استفاده از تکنولوژیهای جدید، پیچیدگی سیستمهای قدرت مرتباً در حال افزایش است. در همان حال، قیود مالی و مقررات، شرکتهای برق را مجبور به استفاده از سیستمها، تقریباً در حدود پایداری خود، کرده است. این دو عامل، انواع جدیدی از مسائل پایداری را به وجود آورده است بنابراین، برای تقویت قابلیت اطمینان سیستم، تسهیل طرح اقتصادی و تأمین قابلیت انعطاف بیشترِ کار سیستم، اعتماد بیشتر به استفاده از ابزارهای خاص کنترلی معطوف شده است. بعلاوه، پیشرفت در تکنولوژی کامپیوتر، تحلیل عددی، نظریهٔ کنترل و مدلسازی تجهیزات به ایجاد ابزار اصلاح شدهٔ محاسباتی و روشهای بهتر طراحی سیستم، منجر شده است. انگیزهٔ اصلی برای نوشتن این کتاب، بیان این پیشرفتهای جدید و بررسی جامع موضوع بوده است.

متن ارائه شده در کتاب، مطالب مربوط به پایداری و کنترل سیستمِ قدرت را از منابع زیادی گردهم آورده است: دروس تحصیلات تکمیلی که از سال ۱۹۷۹ میلادی در دانشگاه تورنتو تدریس کرده‌ام، چندین پروژهٔ تحقیقاتی EPRI (RP ۱۲۰۸، RP ۲۴۴۷، RP ۳۰۴۰، RP ۳۱۴۱، RP ۴۰۰۰، RP ۸۴۹ و RP ۹۹۷) که با آنها به طور نزدیک درگیر بوده‌ام، و مقاله‌های فنی بسیاری که از سوی آی.ای.ای. ای[1] آی.ای.ای.ای[2] و سی. آی. جی. آر. ای[3] منتشر شده است.

این کتاب به منظور تأمین احتیاجهای مهندسان کاربردی که با صنعت برق سر و کار دارند و نیز دانشجویان تحصیلات تکمیلی و پژوهشگران نوشته شده است. کتابهای موجود در این زمینه حداقل ۱۵ سال قدمت دارند حال آنکه بعضی کتابهای مشهور، قدمت ۳۰ تا ۴۰ ساله

---

1. IEEE 2. IEE 3. CIGRE

دارند. در غیبت یک کتاب جامع، دروس پایداری سیستم قدرت، اغلب جنبه‌های محدودی از مسأله را با تأکید بر روشهای خاص محاسباتی بیان می‌نمایند. بعلاوه، هم اعضای هیأت علمی و هم دانشجویان، بسهولت به اطلاعات مربوط به جنبه‌های عملی امکان دسترسی ندارند. چون موضوع، نیازمند درک زمینه‌های وسیعی است. مهندسان کاربردی که تازه وارد موضوع شده‌اند با مشکل طاقت‌فرسای جمع‌آوری اطلاعات مورد نیاز از منابع بسیار پراکنده، روبرو می‌شوند.

سعی این کتاب، آن است که با تأمین و بیان مفاهیم اصلی لازم، شرح جنبه‌های عملی و پرداختن جامع به آخرین دستاوردها در روشهای مدلسازی و ابزار محاسباتی، این خلأ را پر کند و به سه بخش تقسیم شده است. بخش اول، اطلاعات زمینه‌ای عمومی را در دو فصل، بیان می‌کند فصل اول، ساختار سیستمهای مدرن قدرت را شرح داده و سطوح گوناگون کنترلی را شناسایی می‌کند. فصل دوم، به معرفی مسألهٔ پایداری پرداخته، مفاهیم اصلی، تعاریف و طبقه‌بندی را ارائه می‌نماید.

بخش دوم کتاب که شامل فصلهای ۳ تا ۱۱ است، به مشخصه‌های و مدلسازی تجهیزات اختصاص یافته است. پایداری سیستم از مشخصه‌های هر عنصر اصلیِ سیستم قدرت، تأثیر می‌پذیرد. برای درک پایداری سیستم، دانستن مشخصه‌های فیزیکی هر عنصر و تواناییهای آن، ضروری است. برای تحلیل پایداری، نمایش این عناصر به وسیلهٔ مدلهای مناسب ریاضی، مهم است. فصلهای ۳ تا ۱۰، به ژنراتورها، سیستمهای تحریک، توربینها (چرخاننده‌ها)، انتقال جریان متناوب و جریان مستقیم و بارهای سیستم اختصاص داده شده است فصل یازدهم، اصول کنترل توان حقیقی و راکتیو را بیان می‌کند و مدلهای تجهیزات کنترلی را به دست می‌آورد.

بخش سوم که شامل فصول ۱۲ تا ۱۷ است، طبقه‌بندیهای مختلف پایداری سیستم قدرت را در نظر می‌گیرد. در این بخش تأکید، بر درک فیزیکیِ وجوه بسیار متنوع پدیدهٔ پایداری است و روشهای تحلیل به همراه معیارهای کنترلی برای کاهش مشکلات پایداری به طور مشروح بیان شده است.

نظریه‌های پایداری سیستم قدرت و کنترل سیستم قدرت بسیار به هم مرتبط هستند. تمام کنترلهایِ سیستم قدرت به صورت سلسله مراتبی، بسیار گسترده هستند. پایداری سیستم بشدت از این کنترلها تأثیر می‌پذیرد.

در هر فصل، با شروع از مفاهیم ساده، فرضیه بیان شده، رفته رفته مفاهیم پیچیده مطرح می‌شود به گونه‌ای که بتوان آن را در موقعیتهای پیچیدهٔ عملی به کار برد. این موضوع، با تعداد زیادی مثال تشریحی تکمیل می‌شود. در صورت داشتن جایگاه، زمینه‌های تاریخی و تجربه‌های گذشته مورد تأکید قرار گرفته است.