

بسم الله الرحمن الرحيم

کنترل مقاوم در سیستم‌های قدرت

نویسنده:

بیگاش پال

بالارکو چاودوری

ترجمه:

حیدر علی شاهانفر

عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب و دانشگاه علم و صنعت ایران

علی شمشیریان

روزبه جهانی



دانشگاه آزاد اسلامی
واحد تهران جنوب

تهران، ۱۳۸۹

Pal, Bikash

سرشناسه: پال، بیکاش، ۱۹۶۸-م.

عنوان و نام پدیدآور: کنترل مقاوم در سیستم‌های قدرت/ نوشته بیکاش پال، بالارکو چاودھری، حیدرعلی شایانفر، علی شمشیریان، روزبه جهانی.

مشخصات نشر: تهران: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب، ۱۳۸۹.

مشخصات ظاهری: ۲۲۶ص: جدول، نمودار.

فروست: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب: ۱۶۶.

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۰۵۸۰-۳

قیمت: ۴۰۰۰۰ ریال

وضعیت فهرست‌نویسی: فیا

یادداشت: عنوان اصلی: Robust Control in Power Systems, c2005

موضوع: برق -- سیستم‌ها -- کنترل.

شناسه افزوده: چاودھری، بالارکو، ۱۹۷۷-م.

شناسه افزوده: Chaudhuri, Balarko

شناسه افزوده: شایانفر، حیدرعلی، ۱۳۲۹- مترجم.

شناسه افزوده: شمشیریان، علی، ۱۳۶۰- مترجم.

شناسه افزوده: جهانی، روزبه، ۱۳۶۵- مترجم.

شناسه افزوده: دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب.

رده‌بندی کنگره: ۶۲۱/۳۱ ۱۲۸۹ ۱۰۰۷/پ۲ک۹ TK

رده‌بندی دیویی: ۶۲۱/۳۱

شماره کتاب‌شناسی ملی: ۲۲۴۵۱۲۱



کنترل مقاوم در سیستم‌های قدرت

مترجمان: حیدر علی شایانفر، علی شمشیریان، روزبه جهانی

ناشر: دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب

رئیس انتشارات: فرشته حاجی‌زاده

طراح جلد: علی شمشیریان

ویراستار: فرشته مهاجر

حروف‌چینی و صفحه‌آرایی: شرکت حروف‌چینی همراهان واژه

چاپ اول: ۱۳۸۹

تیراژ: ۲۰۰۰ نسخه

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: سازمان چاپ دانشگاه آزاد اسلامی

شابک: ۹۷۸-۹۶۴-۱۰-۰۵۸۰-۳ ISBN: 978-964-10-0580-3

قیمت: ۴۰۰۰ تومان

بسم الله الرحمن الرحيم

"ن و القلم و ما یسطرون"

سخن ناشر

بی تردید تعالی علمی و فرهنگی کشور، بازتاب میزان تفکری است که فرهیختگان در مقام عمل به منصه ظهور می‌رسانند. در این بین، مهم‌تر و حساس‌تر از همه، رسالت عالمان و علم‌جویان است. این رسالت، همان‌گونه که در جهت پرورش استعداد های فردی، با قرائت و مطالعه انجام می‌گیرد، برای پیشبرد اهداف اجتماعی و تعالی فرهنگی، با کتابت و مباحثه نیز محقق می‌شود.

از این رو، یکی از مسئولیت‌های مهم مراکز فرهنگی در کنار تعلیم و تربیت، نشر آثار علمی است. معاونت پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب، برای ارتقای سطح علمی دانشجویان و تسویر افکار دانش‌پژوهان، به چاپ کتاب *کنترل مقاوم در سیستم‌های قدرت* اقدام کرده است؛ با این امید که با استمرار فعالیت‌های انتشاراتی، بتواند گامی در راه رشد و بالندگی فرهنگی بردارد.

کتاب حاضر، کتاب درسی مربوط به درس‌های «دینامیک سیستم‌های قدرت ۱ و ۲» و به ویژه مباحث مربوط به طراحی و توسعه سیستم‌های قدرت دارای ادوات FACTS است.

پیش از هر چیز، شایسته است از عنایات ریاست محترم دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب، استادان ارجمند و نیز از دست‌اندرکاران ویرایش، حروفچینی و چاپ کتاب، تقدیر و تشکر به عمل آید.

از صاحب نظران گرامی خواهشمند است با ارائه پیشنهاد های خود، در جهت اصلاح نواقص احتمالی این کتاب و تهیه مطالب مناسب متون درسی دانشگاهی، انتشارات این واحد را یاری کنند.

امید است این اثر علمی مورد استفاده استادان و دانش‌پژوهان قرار گیرد.

و من الله التوفیق و علیه التکلان

دانشگاه آزاد اسلامی - واحد تهران جنوب

تقدیم به روح بزرگ فرزند عزیزم مهندس آرش شایانفر که حدود یک سال قبل و در سن ۲۵ سالگی ما را تنها گذاشت و به دیار ابدیت پیوست.

دکتر حیدرعلی شایانفر
hashayanfar@gmail.com
۸۹/۵/۱۹

www.ketab.ir

فهرست مطالب

۱۵	پیش گفتار مترجمان
۱۷	پیش گفتار
۱۹	مقدمه
۲۳	فصل ۱: آشنایی
۲۶	مراجع
۲۷	فصل ۲: نوسانات سیستم قدرت
۲۷	۱-۲ مقدمه
۲۷	۲-۲ طبیعت نوسانات الکترودینامیکی
۲۷	۱-۲-۲ نوسانات مود درون واحدی
۲۷	۲-۲-۲ نوسانات مود محلی
۲۸	۳-۲-۲ نوسانات مود بین ناحیه‌ای
۲۹	۴-۲-۲ نوسانات مود کنترل
۲۹	۵-۲-۲ نوسانات مود پخششی
۳۰	۳-۲ نقش نوسانات در خاموشی
۳۱	۱-۳-۲ نوسانات در سیستم WECC
۳۳	۴-۲ خلاصه
۳۴	مراجع
۳۵	فصل ۳: کنترل خطی در سیستم‌های قدرت
۳۵	۱-۳ مقدمه
۳۶	۲-۳ ابزار تحلیل سیستم‌های خطی در سیستم‌های قدرت
۳۸	۱-۲-۳ تحلیل مقادیر ویژه
۳۹	۱-۱-۲-۳ مقادیر ویژه صفر
۳۹	۲-۱-۲-۳ بردارهای ویژه و مودها
۴۰	۳-۱-۲-۳ عامل مشارکت و حساسیت مقادیر ویژه
۴۳	۲-۲-۳ کنترل پذیری، رویت پذیری و باقیمانده مدال
۴۳	۱-۲-۲-۳ حساسیت به مود نوسان
۴۴	۲-۲-۲-۳ حساسیت کم یا عدم حساسیت به مودهای دیگر نوسان
۴۴	۳-۲-۲-۳ حساسیت کم یا عدم حساسیت به خروجی کنترل کننده
۴۶	۲-۲-۳ مقادیر تکین و بردارهای تکین
۴۸	۴-۲-۳ نرم‌های H_2 و H_∞
۴۹	۵-۲-۳ مقادیر تکین هانکل و ساده‌سازی مدل

۵۰	۱-۵-۲-۳. برش مدال
۵۱	۲-۵-۲-۳. باقیمانده‌سازی
۵۱	۳-۵-۲-۳. باقیمانده‌سازی و برش متوازن
۵۳	۴-۵-۲-۳. تقریب بهینه نرم هانکل
۵۴	۶-۲-۳. پایداری، عملکرد و مقاوم بودن
۵۸	۷-۲-۳. خصوصیات طراحی کنترل در سیستم قدرت
۵۹	۱-۷-۲-۳. طراحی هماهنگ
۵۹	۲-۷-۲-۳. ساختارهای سیستم‌های کنترل واقعی
۵۹	۳-۷-۲-۳. روش‌های جدید طراحی کنترل
۵۹	۴-۷-۲-۳. مقاوم بودن
۵۹	۳-۳. خلاصه
۶۱	مراجع
۶۴	فصل ۴: مدل سیستم نمونه
۶۵	۱-۴. مرور سیستم نمونه
۶۶	۲-۴. مدل‌های اجزای مختلف
۶۶	۱-۲-۴. ژنراتورها
۶۸	۲-۲-۴. سیستم تحریک
۶۹	۲-۲-۴. مدل پخش توان شبکه
۶۹	۳-۴. مدل‌سازی ادوات FACTS
۷۰	۱-۳-۴. خازن موازی تنظیم‌شده با تریستور (TCSC)
۷۳	۲-۳-۴. جبران‌ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)
۷۵	۳-۳-۴. تنظیم‌کننده زاویه فاز کنترل‌شده با تریستور (TCPAR)
۷۷	۴-۴. مدل خطی‌شده سیستم
۷۸	۵-۴. انتخاب سیگنال‌های دوردست
۸۱	۶-۴. ساده‌سازی مدل سیستم
۸۳	مراجع
۸۴	فصل ۵: پایداری‌سازهای سیستم قدرت
۸۴	۱-۵. آشنایی
۸۵	۲-۵. مفاهیم پایه PSS
۸۷	۳-۵. سیگنال‌های پایداری‌سازی برای PSS
۸۸	۴-۵. ساختار PSS
۹۱	۵-۵. روش‌های طراحی PSS
۹۲	۱-۵-۵. روش گشتاور میراساز
۹۳	۲-۵-۵. روش پاسخ فرکانسی
۹۴	۳-۵-۵. روش فضای حالت و مقادیر ویژه
۱۰۰	۶-۵. خلاصه
۱۰۱	مراجع
۱۰۶	فصل ۶: روش کنترل تطبیقی چند مدله
۱۰۶	۱-۶. آشنایی

۱۰۷	۲-۶. بررسی استراتژی MMAC
۱۰۸	۱-۲-۶. محاسبه احتمالات: روش بیز
۱۰۹	۲-۲-۶. محاسبه وزن‌ها
۱۱۰	۳-۶. سیستم مورد مطالعه
۱۱۱	۴-۶. بانک مدل
۱۱۱	۱-۴-۶. سیستم ۴ ماشینه با دو ناحیه
۱۱۲	۲-۴-۶. سیستم ۱۶ ماشینه با ۵ ناحیه
۱۱۳	۵-۶. تنظیم کنترلی و آزمایش مقاوم بودن
۱۱۳	۱-۵-۶. سیستم ۴ ماشینه با دو ناحیه
۱۱۴	۲-۵-۶. سیستم ۱۶ ماشینه با ۵ ناحیه
۱۱۶	۶-۶. آزمایش‌های موردی
۱۱۷	۱-۶-۶. آزمایش موردی ۱
۱۱۷	۲-۶-۶. آزمایش موردی ۲
۱۱۸	۷-۶. انتخاب ضریب همگرایی و برش مصنوعی
۱۱۹	۸-۶. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم نمونه ۴ ماشینه با دو ناحیه
۱۱۹	۱-۸-۶. آزمایش موردی ۱
۱۲۲	۲-۸-۶. آزمایش موردی ۲
۱۲۵	۹-۶. نتایج شبیه‌سازی برای سیستم ۱۶ ماشینه با ۵ ناحیه
۱۲۵	۱-۹-۶. آزمایش موردی ۱
۱۲۶	۲-۹-۶. آزمایش موردی ۲ الف
۱۲۸	۳-۹-۶. آزمایش موردی ۲ ب
۱۲۸	۱۰-۶. خلاصه
۱۳۰	مراجع
۱۳۲	فصل ۷: پایدارسازی همزمان
۱۳۲	۱-۷. حداقل‌سازی فاصله مقادیر ویژه
۱۳۷	۲-۷. جایابی مقاوم قطب
۱۳۸	۳-۷. مطالعه موردی
۱۳۸	۴-۷. طراحی کنترلی
۱۳۹	۵-۷. نتایج شبیه‌سازی
۱۴۰	۶-۷. خلاصه
۱۴۲	مراجع
۱۴۳	فصل ۸: روش حساسیت مرکب با استفاده از نامعادلات ماتریسی خطی
۱۴۳	۱-۸. آشنایی
۱۴۶	۲-۸. فرمول‌بندی حساسیت مرکب H_2
۱۴۶	۳-۸. مسأله H_2 تعمیم‌یافته به‌همراه جایابی قطب
۱۴۸	۴-۸. فرمول‌بندی نامعادله ماتریسی
۱۴۹	۵-۸. خطی‌سازی نامعادلات ماتریسی
۱۵۱	۶-۸. مطالعه موردی
۱۵۱	۷-۸. انتخاب وزن‌ها

۱۵۱	۲-۶-۸. طراحی کنترلی
۱۵۵	۳-۶-۸. ارزیابی عملکرد
۱۵۶	۴-۶-۸. نتایج شبیه‌سازی
۱۵۷	۷-۸. مطالعه موردی بر روی طراحی ترتیبی
۱۶۰	۱-۷-۸. سیستم نمونه
۱۶۰	۲-۷-۸. طراحی کنترلی
۱۶۱	۳-۷-۸. ارزیابی عملکرد
۱۶۲	۴-۷-۸. نتایج شبیه‌سازی
۱۶۵	۸-۸. خلاصه
۱۶۶	مراجع
۱۶۸	فصل ۹. روش تشکیل حلقه H_∞ نرمالیزه شده با استفاده از نامعادلات ماتریسی خطی
۱۶۸	۱-۹. آشنایی
۱۶۹	۲-۹. روش طراحی
۱۶۹	۱-۲-۹. کنترل‌پذیری حلقه
۱۷۱	۲-۲-۹. پایداری مقاوم
۱۷۳	۳-۹. مطالعه موردی
۱۷۳	۱-۳-۹. کنترل‌پذیری حلقه
۱۷۴	۲-۳-۹. طراحی کنترلی
۱۷۵	۳-۳-۹. نتایج شبیه‌سازی
۱۷۸	۴-۹. خلاصه
۱۷۹	مراجع
۱۸۱	فصل ۱۰: کنترل H_∞ برای سیستم‌های با تأخیر زمانی
۱۸۱	۱-۱۰. آشنایی
۱۸۳	۲-۱۰. پیشگوی اسمیت برای سیستم‌های با تأخیر زمانی یا زمان مرده: مرور کلی
۱۸۶	۳-۱۰. فرمول‌بندی مسأله با استفاده از پیشگوی اسمیت یکپارچه
۱۸۹	۴-۱۰. مطالعه موردی
۱۸۹	۱-۴-۱۰. طراحی کنترلی
۱۹۱	۲-۴-۱۰. ارزیابی عملکرد
۱۹۲	۳-۴-۱۰. نتایج شبیه‌سازی با TCSC
۱۹۳	۵-۱۰. نتایج شبیه‌سازی با SVC
۱۹۴	۶-۱۰. خلاصه
۲۰۰	مراجع
۲۰۱	پیوست الف
۲۰۵	پیوست ب
۲۰۷	پیوست ج
۲۱۱	پیوست د
۲۱۳	پیوست ه
۲۱۳	واژه‌نامه و نمایه

فهرست اشکال

شکل ۱-۱: نوسانات خودبه‌خودی در اتصال میانی AC پاسیفیک ۲۰ اوت ۱۹۷۴.....	۲۴
شکل ۱-۲: نمونه‌ای از نوسانات محلی.....	۲۸
شکل ۲-۲: نمونه‌ای از نوسانات بین‌ناحیه‌ای.....	۲۹
شکل ۳-۲: نمونه‌ای از نوسانات مود پیچشی.....	۳۰
شکل ۱-۳: سیستم مدل در صفحه ۷۳۲ کتاب کندر.....	۳۷
شکل ۲-۳: حداکثر پاسخ مقدار تکین سیستم نمونه.....	۵۰
شکل ۳-۳: پاسخ فرکانسی سیستم اصلی و سیستم ساده‌شده مرتبه ۴.....	۵۵
شکل ۴-۳: پاسخ فرکانسی سیستم اصلی و سیستم ساده‌شده مرتبه ۳.....	۵۵
شکل ۵-۳: پاسخ فرکانسی سیستم اصلی (۳۶۵ حالت) و سیستم ساده‌شده (۲۰ حالت) با استفاده از روش مبتنی بر زیرفضای کريلوف.....	۵۶
شکل ۶-۳: پاسخ فرکانسی سیستم اصلی (۳۶۵ حالت) و سیستم ساده‌شده (۲۰ حالت): ابتدا با استفاده از روش مبتنی بر زیرفضای کريلوف تا مرتبه ۱۰۰ ساده شده سپس با استفاده از روش برش موازن به مرتبه ۲۰ رسانده شده است.....	۵۶
شکل ۱-۴: سیستم مورد مطالعه ۱۶ ماشین با ۵ ناحیه و با ادوات FACTS.....	۶۵
شکل ۲-۴: توپولوژی خازن سری کنترل‌شده با ترستور (TCSC).....	۷۰
شکل ۳-۴: مدل منبع ولتاژ TCSC.....	۷۱
شکل ۴-۴: مدل تزریق توان TCSC.....	۷۲
شکل ۵-۴: مدل دینامیکی سیگنال کوچک TCSC.....	۷۳
شکل ۶-۴: توپولوژی جبران‌ساز توان راکتیو استاتیک (SVC).....	۷۳
شکل ۷-۴: مدل دینامیکی سیگنال کوچک SVC.....	۷۴
شکل ۸-۴: توپولوژی تنظیم‌کننده فاز کنترل‌شده با ترستور (TCPAR).....	۷۵
شکل ۹-۴: مدل تزریق توان TCPAR.....	۷۶
شکل ۱۰-۴: مدل دینامیکی سیگنال کوچک TCPAR.....	۷۷
شکل ۱۱-۴: پاسخ فرکانسی سیستم اصلی و ساده‌شده با TCSC.....	۸۲
شکل ۱-۵: نمایش بلوکی هفرون-فیلیس برای مدل تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت.....	۸۵
شکل ۲-۵: ساختار کلی PSS.....	۸۸
شکل ۳-۵: پاسخ سیستم SMIB نمونه تحت اختلال.....	۹۱
شکل ۱-۶: ضریب از روش MMAC.....	۱۰۸
شکل ۲-۶: سیستم مورد مطالعه.....	۱۱۰
شکل ۳-۶: پاسخ فرکانسی نیروگاه اصلی و ساده‌شده.....	۱۱۳

۱۱۵	شکل ۴-۶: پاسخ فرکانسی کنترل کننده
۱۱۶	شکل ۵-۶: عملکرد کنترل کننده عادی
۱۱۶	شکل ۶-۶: آزمایش مقاوم بودن کنترل کننده عادی
۱۱۹	شکل ۷-۶: تغییرات وزن‌های محاسبه شده
۱۲۰	شکل ۸-۶: آزمایش موردی ۱: تغییرات وزن‌های متناظر با هر مدل
۱۲۱	شکل ۹-۶: آزمایش موردی ۱: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۲۲	شکل ۱۰-۶: آزمایش موردی ۱: جریان توان بین باس‌های ۱۰ و ۹
۱۲۲	شکل ۱۱-۶: آزمایش موردی ۱: پاسخ کنترل کننده
۱۲۳	شکل ۱۲-۶: آزمایش موردی ۲: تغییرات وزن‌های متناظر با هر مدل
۱۲۳	شکل ۱۳-۶: آزمایش موردی ۲: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۲۴	شکل ۱۴-۶: آزمایش موردی ۲: جریان توان بین باس‌های ۱۰ و ۹
۱۲۴	شکل ۱۵-۶: آزمایش موردی ۲: پاسخ کنترل کننده
۱۲۵	شکل ۱۶-۶: آزمایش موردی ۱: تغییرات وزن‌ها
۱۲۶	شکل ۱۷-۶: آزمایش موردی ۱: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۲۷	شکل ۱۸-۶: آزمایش موردی ۲ الف: تغییرات وزن‌ها
۱۲۷	شکل ۱۹-۶: آزمایش موردی ۲ الف: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۲۹	شکل ۲۰-۶: آزمایش موردی ۲ ب: تغییرات وزن‌ها
۱۲۹	شکل ۲۱-۶: آزمایش موردی ۲ ب: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۳۳	شکل ۱-۷: آرایش پس‌خور حلقه بسته با پس‌خور منفی
۱۳۵	شکل ۲-۷: آرایش پس‌خور حلقه بسته برای یک سیستم یک ورودی، سه خروجی با پس‌خور مثبت
۱۴۰	شکل ۳-۷: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۴۱	شکل ۴-۷: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۴۵	شکل ۱-۸: فرمول بندی حساسیت مرکب
۱۴۶	شکل ۲-۸: ساختن تنظیم کننده تعمیم یافته برای فرمول بندی حساسیت مرکب
۱۴۸	شکل ۳-۸: مقطع مخروطی با زاویه داخلی
۱۵۱	شکل ۴-۸: پاسخ فرکانسی فیلترهای وزنی
۱۵۳	شکل ۵-۸: پاسخ فرکانسی سیستم کامل و ساده شده
۱۵۳	شکل ۶-۸: پاسخ فرکانسی حساسیت (S)
۱۵۴	شکل ۷-۸: پاسخ فرکانسی کنترل کننده ضرب در حساسیت (KS)
۱۵۸	شکل ۸-۸: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۵۸	شکل ۹-۸: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۵۹	شکل ۱۰-۸: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۵۹	شکل ۱۱-۸: سیستم ۱۶ ماشینیه مورد مطالعه با ۳ ادوات FACTS
۱۶۳	شکل ۱۲-۸: پاسخ دینامیکی سیستم
۱۶۳	شکل ۱۳-۸: درصد جبران سازی TCSC
۱۶۴	شکل ۱۴-۸: خروجی SVC

شکل ۱۵-۸:	زاویه فاز TCPAR	۱۶۴
شکل ۱-۹:	روش طراحی شکل‌دهی حلقه	۱۷۰
شکل ۲-۹:	مساله پایداری مقاوم عامل نسبت به هم اول نرمالیزه شده	۱۷۱
شکل ۳-۹:	پاسخ فرکانسی پیش-جبران ساز	۱۷۴
شکل ۴-۹:	پاسخ فرکانسی سیستم اصلی ساده شده و سیستم شکل‌دهی شده	۱۷۵
شکل ۵-۹:	پاسخ دینامیکی سیستم	۱۷۶
شکل ۶-۹:	پاسخ دینامیکی سیستم	۱۷۷
شکل ۷-۹:	پاسخ دینامیکی سیستم	۱۷۷
شکل ۱-۱۰:	آرایش کنترلی برای سیستم با زمان مرده	۱۸۳
شکل ۲-۱۰:	نمایش معادل یک سیستم با زمان مرده	۱۸۴
شکل ۳-۱۰:	اعمال پیشگوی اسمیت و بلوک تأخیر	۱۸۴
شکل ۴-۱۰:	تأخیر یکسان در هر دو مسیر	۱۸۵
شکل ۵-۱۰:	فرمول‌بندی پیشگوی اسمیت	۱۸۵
شکل ۶-۱۰:	پیشگوی اسمیت یکپارچه	۱۸۸
شکل ۷-۱۰:	آرایش کنترلی برای فرمول‌بندی طراحی حساسیت مرکب	۱۸۹
شکل ۸-۱۰:	پاسخ فرکانسی حلقه‌های وزن‌دهی	۱۹۰
شکل ۹-۱۰:	پاسخ فرکانسی کنترل کننده کامل و ساده شده	۱۹۱
شکل ۱۰-۱۰:	پاسخ دینامیکی با TCSC: کنترل کننده با تأخیر ۰/۷۵ ثانیه طراحی شده است	۱۹۵
شکل ۱۱-۱۰:	خروجی TCSC	۱۹۵
شکل ۱۲-۱۰:	پاسخ دینامیکی سیستم با تأخیر ۰/۵ ثانیه	۱۹۶
شکل ۱۳-۱۰:	پاسخ دینامیکی سیستم: کنترل کننده بدون توجه به تأخیر طراحی شده است	۱۹۶
شکل ۱۴-۱۰:	پاسخ دینامیکی سیستم با SVC: کنترل کننده با توجه به تأخیر طراحی شده است	۱۹۷
شکل ۱۵-۱۰:	خروجی SVC	۱۹۷
شکل ۱۶-۱۰:	پاسخ دینامیکی سیستم با تأخیر ۰/۵ ثانیه	۱۹۸
شکل ۱۷-۱۰:	پاسخ دینامیکی سیستم با تأخیر ۰/۱ ثانیه	۱۹۸
شکل ۱۸-۱۰:	پاسخ دینامیکی: کنترل کننده بدون توجه به تأخیر طراحی شده است	۱۹۸

فهرست جداول

جدول ۱-۳: بردارهای ویژه و عامل‌های مشارکت متناظر با مود محلی $0/282+j8/62$	۴۱
جدول ۲-۳: کنترل‌پذیری، رویت‌پذیری و باقیمانده عدال متناظر با مود محلی $0/282+j8/62$	۴۵
جدول ۱-۴: مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم نمونه به‌همراه TCSC.....	۷۸
جدول ۲-۴: مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم نمونه به‌همراه SVC.....	۷۸
جدول ۳-۴: مودهای بین‌ناحیه‌ای سیستم نمونه به‌همراه TCPAR.....	۷۸
جدول ۴-۴: باقیمانده‌های نرمالیزه‌شده برای سیگنال‌های جریان توان اکتیو از خطوط مختلف به‌همراه TCSC نصب‌شده در سیستم.....	۸۰
جدول ۵-۴: باقیمانده‌های نرمالیزه‌شده برای سیگنال‌های جریان توان اکتیو از خطوط مختلف به‌همراه SVC نصب‌شده در سیستم.....	۸۰
جدول ۶-۴: باقیمانده‌های نرمالیزه‌شده برای سیگنال‌های جریان توان اکتیو از خطوط مختلف به‌همراه TCPAR نصب‌شده در سیستم.....	۸۱
جدول ۱-۶: مودهای بحرانی نوسانات سیستم مورد مطالعه.....	۱۱۰
جدول ۲-۶: شرایط کاری استفاده شده در بانک مدل.....	۱۱۱
جدول ۳-۶: شرایط کاری استفاده شده در بانک مدل.....	۱۱۲
جدول ۴-۶: نسبت میرایی حلقه‌بسته مودهای بین‌ناحیه‌ای برای مدل‌ها و کنترل‌کننده‌های مختلف.....	۱۱۵
جدول ۱-۷: نقاط قطب تعیین‌شده و به‌دست‌آمده برای سیستم حلقه‌بسته ساده شده.....	۱۳۹
جدول ۱-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای.....	۱۵۵
جدول ۲-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای بحرانی برای سطوح مختلف انتقال توان بین NETS و NYPS.....	۱۵۶
جدول ۳-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای بحرانی برای مدل بارهای متفاوت.....	۱۵۶
جدول ۴-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای با کنترل‌کننده برای TCSC (حلقه‌های کنترلی برای SVC و TCPAR باز است).....	۱۶۱
جدول ۵-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای با کنترل‌کننده برای TCSC و SVC (حلقه‌های کنترلی برای TCPAR باز است).....	۱۶۲
جدول ۶-۸: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای با کنترل‌کننده برای TCSC، SVC و TCPAR (همه حلقه‌های کنترلی بسته است).....	۱۶۲
جدول ۱-۹: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای.....	۱۷۵
جدول ۱-۱۰: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای.....	۱۹۳

جدول ۳-۱۰: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای بحرانی برای سطوح مختلف انتقال توان بین NETS و NYPS	۱۹۳
جدول ۳-۱۰: نسبت میرایی و فرکانس‌های مودهای بین‌ناحیه‌ای بحرانی برای مدل بارهای متفاوت	۱۹۳
جدول الف-۱: اطلاعات باس‌های ماشین	۲۰۱
جدول الف-۲: اطلاعات باس‌های بار	۲۰۱
جدول الف-۳: اطلاعات خط	۲۰۲
جدول ب-۱: اطلاعات ماشین	۲۰۵
جدول ب-۲: اطلاعات سیستم تحریک DC	۲۰۶

پیش گفتار مترجمان

سیستم قدرت به عنوان پیچیده ترین سیستم ساخته شده توسط بشر رفتارهای پیچیده ای را از جنبه های مختلف از خود نشان می دهد. یکی از این رفتارها نوسانات بین ناحیه ای است. میراسازی این گونه نوسانات توسط ادوات FACTS با استفاده از تئوری کنترل مقاوم خطی هدف اصلی نگارش این کتاب است. اغلب مطالب این کتاب حاصل تحقیقات ده سال اخیر است.

در سال های اخیر توجه خاصی به کاربرد تجهیزات الکترونیک قدرت برای کنترل پذیری و در نتیجه افزایش قابلیت انتقال توان در سیستم های انتقال جریان متناوب به عمل آمده است. ادوات FACTS می توانند کنترل پیوسته سریع جریان توان در سیستم انتقال را با کنترل ولتاژها در باس های بحرانی، تغییر امپدانس خطوط انتقال یا با کنترل زوایای فاز بین خطوط انتقال انتهای فراهم آورند. روش های مختلفی برای طراحی کنترل کننده های میراکننده نوسانات بین ناحیه ای وجود دارد، یکی از ویژگی های مهم طراحی، عملکرد مقاوم کنترل کننده ها است. این قبیل کنترل کننده ها باید قابلیت عملکرد دلخواه را در محدوده وسیعی از شرایط گوناگون عملکرد سیستم قدرت دارا باشند. همچنین از آن جایی که مدل های تجهیزات به صورت تقریبی مشخص هستند، کنترل کننده باید دارای کمترین حساسیت به تغییر پارامترهای عناصر سیستم ها باشند.

ویژگی دیگر این کتاب استفاده از نرم افزار قدرتمند MATLAB در طراحی و شبیه سازی های مباحث مطرح شده در این کتاب است که این کتاب را نسبت به سایر کتاب های مشابه متمایز می سازد.

مترجمین نهایت تلاش خود را در رعایت امانت داری برای ترجمه مطالب این کتاب به کار گرفته اند و مجوز کتبی ترجمه آن را از نویسندگان کتب دریافت نموده اند. یقیناً ترجمه مطالب این کتاب خالی از اشکال نیست و خوانندگان بزرگوار می توانند اصلاحات پیشنهادی خود را برای اعمال در چاپ های بعدی از طریق پست های الکترونیکی مترجمین ارسال کنند. باشد که خدمتی هر چند کوچک در زمینه ترویج مطالب جدید در مورد سیستم های قدرت امروزی برداشته باشیم.

با احترام

پیش گفتار

هدف از نگارش این کتاب ارائه جامع مطالعات اخیر بر روی کاربرد تئوری کنترل مقاوم خطی در میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای، در سیستم‌های قدرت دارای ادوات FACTS است. این موضوع با طرح مروری بر کاربرد پایدارسازهای سیستم‌های قدرت (PSS)^۱ و هماهنگ‌سازی آنها همان گونه که در کتاب پیش رو تشریح شده است، آغاز می‌شود.

روی صحبت این کتاب با مهندسانی است که با تحقیقات، طراحی و توسعه سیستم‌های قدرت با جهت‌گیری ویژه‌ای بر پایداری سیستم قدرت درگیر بوده و فرض بر این است که پیش‌زمینه‌ای از این دانش را دارا هستند. کتاب‌های مرجع مفید در این زمینه عبارت‌اند از:

پایداری و کنترل سیستم‌های قدرت^۲، (کندر، ۱۹۹۴)

دینامیک و پایداری سیستم‌های قدرت^۳، (پای و ساور، ۱۹۹۸)

کنترل پس‌خور چندمتغیره^۴، (اسکوگشتاد و پستلتویت، ۲۰۰۱)

کتاب نوسانات سیستم‌های قدرت، راجرز^۵ (۲۰۰۰) نیز از آنجایی که بر روی کاربردهای PSS در میراسازی نوسانات محلی و بین ناحیه‌ای تمرکز دارد، می‌تواند برای آشنایی مفید باشد.

در فصل ۲، پیشینه‌ای از رفتار نوسانی سیستم‌های قدرت ارائه شده است. در فصل ۳، ابزار تحلیلی که معمولاً برای مطالعه پایداری سیگنال کوچک استفاده می‌شود آورده شده و فصل ۴، شامل شرحی بر عوامل مؤثر در نوسانات بین ناحیه‌ای بوده که شامل ادوات FACTS هستند. از قبیل:

جبران‌سازهای استاتیک توان راکتیو (SVC)^۶

خازن‌های سری کنترل شده با تریستور (TCSC)^۷

تغییردهنده فاز کنترل شده با تریستور (TCPS)^۸

مدل سیستمی که برای آزمایش طراحی‌های کنترل کننده میراساز استفاده می‌شود، در فصل ۴ تشریح شده است.

فصل ۵، مروری بر پایدارسازهای سیستم قدرت (PSS) را در سیستم قدرت ارائه می‌کند. هدف

1. Power System Stabilizer

2. Power System Stability and Control: Kundur 1994

3. Power System Dynamic and Stability: Sauer and Pai 1998

4. Multivariable Feedback Control: Skogestad and Postlethwaite 2001

5. Power System Oscillations: Rogers 2000

6. Static Var Compensators

7. Thyristor-Controlled Series Capacitors

8. Thyristor-Controlled Phase Shifters

این فصل بسط دانش و لوازم طراحی کنترل به کمک مفهوم گشتاور میراساز در یک سیستم تک ماشین متصل به باس بی‌نهایت (SMIB)^۱ است. تعمیم گشتاور میراساز به سیستم چند ماشین و روش‌های مختلف محاسبه بهره و فاز مدارات جبران‌سازی که برای PSS استفاده می‌شود در بخش‌های دیگر این فصل بحث خواهد شد.

در فصول ۶ و ۷ طرحی از کنترل‌کننده چند مدله ارائه شده است. برای جمع کردن عملکرد چند کنترل‌کننده برای رسیدن به کنترل تطبیقی چند مدله (MMAC)^۲ از یک روش با وزن‌دهی احتمالاتی استفاده شده است. در فصل ۷، از یک روش جایابی قطب مقاوم برای حداقل کردن فاصله مقادیر ویژه استفاده می‌شود. هر دو روش، قدرتمندی طرح کنترلی را مد نظر قرار می‌دهند.

در فصول ۸ تا ۱۱، بهینه‌سازی نرم H_{∞} ، محور اصلی طراحی کنترل‌کننده است. در فصل ۸ یک بهینه‌سازی حساسیت مرکب وزن‌دار استاندارد انجام شده و مجموعه‌ای مناسب از نامعادلات ماتریسی خطی (LMI)^۳ به روش عددی محاسبه می‌شوند. با استفاده از جایابی قطب به‌عنوان یکی از قیود اضافه برای LMI، حداقل شدن میرایی حلقه بسته تضمین می‌شود.

در فصل ۹، یک روش «تجزیه به عامل‌های نسبت به هم اول چپ»^۴، با استفاده از روش شکل‌دهی حلقه، طرح کنترلی متمرکزی را برای مدل حلقه‌بازی که به‌نحو مناسب شکل‌دهی شده است، نتیجه می‌دهد. دوباره، همانند قبل، حل عددی به کمک LMI به‌دست می‌آید.

تأثیر تأخیر در انتقال سیگنال بر کنترل میراساز در فصل ۱۰ مورد بررسی قرار می‌گیرد. یک روش حساسیت مرکب وزن‌دار برای طراحی ساختار کنترلی اصلی، طوری بسط داده شده تا بتواند تأثیر تأخیر در انتقال سیگنال را نیز شامل شود. از روش‌های پیش‌گو در طراحی کنترل‌کننده برای تعیین کنترل‌کننده H_{∞} استفاده شده است.

در تمام طراحی‌های بالا، میراسازی مقاوم برای تغییرات سطح توان و تغییرات توپولوژی شبکه توسط تحلیل مقادیر ویژه و شبیه‌سازی‌های غیرخطی در حوزه زمان که برای نمایش صحت طراحی‌ها استفاده شده است، تأیید می‌شود.

بیکاش پال

بالارکو چاودوری

مقدمه

نوسانات الکترومکانیکی فرکانس پایین با محدوده فرکانسی ۰/۱ تا ۲ هرتز، جزو طبیعت سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند. در تاریخ سیستم‌های قدرت با مسائل ناشی از میراسازی ناکافی این نوسانات برخورد شده است. اولین برخورد که در سال ۱۹۲۰ تجربه شد، از نوع نوسانات خودبه‌خودی^۱ یا هانتینگ^۲ بود. این مشکل با استفاده از سیم‌پیچ‌های جبران‌گر در ژنراتور و هم‌چنین محرک‌های اولیه نوع توربین با مشخصه گشتاور سرعت مطلوب رفع شد.

با رشد هرچه بیشتر سیستم‌های قدرت، این سیستم‌ها در محدوده‌های نزدیک‌تر به حد پایداری گذرا و پایداری سیگنال کوچک واویه روتور، به فعالیت می‌پرداختند. در این حالت پایداری سیستم شدیداً تحت تأثیر سیستم انتقال قرار داشت و نبود گشتاور همگام‌کننده کافی دلیل اصلی ناپایداری‌های سیستم بود. استفاده از تنظیم‌کننده‌های ولتاژ پیوسته باعث بهبود پایداری سیگنال کوچک (حالت ماندگار) گردید. در سال‌های ۱۹۵۰ و ۱۹۶۰، نگرانی بیشتر نیروگاه‌ها از پایداری گذرا بود. هر چند این شرایط تا اواخر ۱۹۶۰ بتدریج تغییر کرد. با استفاده از تحریک‌کننده‌های با پاسخ سریع‌تر و هم‌چنین ادوات خاص پایدارسازی، بهبودهای چشمگیری در بحث پایداری گذرا حاصل شد.

حرکت‌های بیان شده در بالا توسط گرایش رو به افزایش شبکه قدرت به نمایش ناپایداری‌های نوسانی همراهی می‌شد. محرک‌های با پاسخ سریع از یک سو باعث بهبود پایداری گذرا شده ولی در مقابل میراسازی نوسانات مودهای محلی را که فرکانس‌هایی بین ۰/۸ تا ۲ هرتز دارند، تحت تأثیر قرار می‌دهند. تأثیر محرک‌های سریع با قدرت رو به کاهش شبکه انتقال نسبت به اندازه نیروگاه‌ها ترکیب می‌شود. با استفاده از پایدارسازی سیستم قدرت برای تعدیل کنترل تحریک ژنراتورها، به‌سادگی می‌توان به میراسازی کافی نوسانات مودهای محلی پرداخت.

دیگر منبع ناپایداری‌های نوسانی، تشکیل گروه‌های بزرگ از ماشین‌های با کوپل ضعیف است که با اتصالات ضعیف متصل شده‌اند. این شرایط در نتیجه رشد هرچه بیشتر در به‌هم‌پیوستگی شبکه قدرت ایجاد گردید. با وجود ترانسفورمرهای قدرت عظیم، این سیستم‌ها نوسانات فرکانس پایین مودهای بین‌ناحیه‌ای را از خود نشان می‌دهند. پایداری این مودها موضوع اصلی نگرانی سیستم‌های قدرت امروزی است. گزارشات زیادی از نوسانات بین‌ناحیه‌ای با میراسازی ضعیف و یا ناپایدار ارائه شده است. در موارد مشابه، این شکل از ناپایداری‌های نوسانی عامل خاموشی‌های سراسری عظیم در

سیستم است. سیستم‌های قدرت به هم پیوسته بزرگ اغلب چندین مود غالب از نوسانات بین ناحیه‌ای در محدوده فرکانسی 0.1 تا $1/8$ - هرترز از خود نشان می‌دهند.

استفاده از کنترل اضافی، به طور کلی تنها راه عملی کاهش مشکل نوسانات بین ناحیه‌ای است، بدون این که نیازی باشد به محدودیت‌های بهره‌برداری پرهزینه یا تقویت انتقال متوسل شد. ادواتی در سیستم‌های قدرت وجود دارند که توانایی شراکت با کنترل اضافی را در میراسازی نوسانات دارند. استفاده از پایدارساز سیستم قدرت برای کنترل تحریک ژنراتورها، غالباً مقرون به صرفه‌ترین روش است. کنترل‌پذیری نوسانات مدهای بین ناحیه‌ای، توسط کنترل تحریک تابع عوامل چندی است؛ از قبیل موقعیت ژنراتور نسبت به شکل مود نوسان، مشخصه و اندازه بارهای نزدیک، و نوع تحریک دیگر ژنراتورهای نزدیک.

همچنین سیگنال‌های پایدارساز اضافی می‌توانند برای کنترل خطوط انتقال HVDC و SVC‌ها استفاده شده و به این طریق با توجه به موقعیت آن‌ها، به بهبود میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای کمک کنند. از آنجایی که این ادوات اصولاً بر اساس دیگر ملاحظات سیستم نصب شده‌اند، به همین دلیل از قابلیت آن‌ها در کنترل نوسانات کم‌میراشده سیستم، بهره‌برداری منفی می‌شود. بسیاری از خطوط انتقال HVDC و SVC‌های نصب‌شده، به انواع خاصی از کنترل مدولاسیون تجهیز شده‌اند تا نوسانات بین ناحیه‌ای را پایدار کنند.

در سال‌های اخیر علاقه بالایی برای استفاده از ادوات الکترونیک قدرت برای افزایش قابلیت کنترل و در نتیجه آن افزایش ظرفیت انتقال سیستم انتقال AC وجود داشته است. از این مفهوم به سیستم‌های انتقال AC انعطاف‌پذیر (FACTS)^۱ یاد می‌شود. ادوات FACTS می‌توانند توسط کنترل ولتاژ در باس‌های حیاتی، با تغییر امپدانس خط انتقال و یا با کنترل زاویه فاز بین دو انتهای خط انتقال به کنترل پیوسته جریان توان در سیستم انتقال بپردازند. این تعمیم مفهومی است که توسط SVC‌ها برای بهبود ظرفیت سیستم انتقال توسط کنترل سریع ولتاژ باس‌ها استفاده می‌شود. صرف‌نظر از SVC‌ها، دو نوع از ادوات FACTS که به طور مؤثر برای میراسازی نوسانات سیستم استفاده می‌شود، خازن‌های سری کنترل‌شده با ترستور (TCSC) و تنظیم‌کننده زاویه فاز کنترل‌شده با ترستور (TCPAR) هستند. ادوات FACTS، با توجه به آرایش سیستم قدرت و نوسانات بین ناحیه‌ای، می‌توانند اقتصادی‌ترین ابزار برای حل این مشکل باشند.

روش‌های زیادی جهت طراحی کنترل‌کننده‌ها برای میراسازی نوسانات بین ناحیه‌ای موجود است. یکی از موضوعات مهم در طراحی و عملکرد کنترل‌کننده «مقاوم بودن» است. کنترل‌کننده باید بتواند در محدوده وسیع شرایطی که سیستم قدرت ممکن است با آن مواجه شود، عملکرد مطلوبی از خود نشان دهد. و همچنین از آنجایی که مدل تجهیزات فقط به صورت تقریبی قابل شناسایی است، کنترل‌کننده باید نسبت به پارامترهای اجزای سیستم کمترین حساسیت را داشته باشد.

روش جبران‌سازی فاز و بهره در تئوری کنترل کلاسیک، در طراحی کنترل‌های سیستم روشی است که بسیار استفاده شده و هم‌چنین به‌طور وسیع تطبیق یافته است. هر چند زمانی که تعداد حلقه‌های کنترلی زیادی وجود داشته باشد، برای امکان در نظر گرفتن تغییرات مدل نیروگاه به‌خاطر رنج وسیع شرایط کاری، وجود یک روش هماهنگ‌سازی ضروری است. استفاده از یک روش چندمتغیره برای تحلیل کنترل و نتیجه‌گیری، تحت این شرایط، می‌تواند روشی منظم را برای تعیین میزان مقاوم بودن عملکرد کنترل انتخاب‌شده فراهم کند.

کتاب حاضر در مورد کنترل مقاوم سیستم‌های قدرت، حول کاربرد روش‌های جدید در تئوری سیستم‌های خطی در کنترل نوسانات الکترومکانیکی سیستم‌های قدرت بحث می‌کند. توجه عمده بر روی اعمال میراسازی کافی نوسانات بین‌ناحیه‌ای، تحت شرایط کاری متغیر قرار دارد. آقایان دکتر بیکاش پال و بالارکو چاودوری، کنترل اضافی در بین کنترل‌کننده‌های مختلف ادوات FACTS مانند SVC، TCSC، TCPAR را مورد مطالعه قرار داده‌اند.

مروری بر تئوری سیستم‌های خطی از دیدگاه کنترل میراسازی سیستم‌های قدرت به کمک چندین مثال تشریح شده است. طراحی کنترل میراسازی به‌صورت یک مسأله‌ی بهینه‌سازی نرم فرمول‌بندی شده است. نرم‌های H_2 و H_∞ توابع تبدیل تعریف شده و در چهارچوب نامعادلات خطی ماتریسی (LMI) کمینه می‌شوند تا سطح قدرتمند پایداری و عملکرد مطلوب حاصل شود. از هر دو نوع کنترل متمرکز و غیر متمرکز استفاده شده است. با استفاده از سیستم‌های کنترل در سطح وسیع (WACS)^۱، توسط استفاده‌ی بجا از واحدهای اندازه‌گیری فازور (PMU)^۲ هم‌زمان، راه‌حل‌ها و طرح‌های کنترلی مختلفی ارائه شده است، که برای عملکرد امن سیستم‌های قدرت به‌هم‌پیوسته مفید خواهند بود.

با توجه فشار سنگینی که امروزه بر سیستم قدرت تحمیل می‌شود، کنترل مقاوم نقشی مهم را در عملکرد امن و قابل اطمینان آن بازی می‌کند. اینجانبان شدیداً اعتقاد داریم که این کتاب منبعی بسیار گرانبها در این موضوع خواهد بود.

پرابها. اس. کندر

رییس و مدیر اجرایی مؤسسه آزمایشگاهی پاور تک

سوری، بی. سی.

کانادا- فوریه ۲۰۰۵