

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

منابع مبتنی بر اینورتر

مدل سازی و تأثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

تألیف

دکتر معین عابدینی

استادیار دانشگاه تهران

مهندس حمیدرضا دریابار

دکتر مجید صنایع پسند

استاد دانشگاه تهران



شماره مسلسل ۱۲۱۸۷

شماره انتشار ۴۷۰۹

انتشارات دانشگاه تهران

سرشناسه	: عابدینی، معین، ۱۳۶۸ -
عنوان و نام پدیدآور	: منابع مبتنی بر اینورتر: مدل سازی و تأثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت/ تألیف معین عابدینی، حمیدرضا دریابار، مجید صنایع پسند.
مشخصات نشر	: تهران: دانشگاه تهران، مؤسسه انتشارات، ۱۴۰۳.
مشخصات ظاهری	: ۴۹۲ص.
فروست	: انتشارات دانشگاه تهران؛ شماره انتشار ۴۷۰۹.
شابک (چاپی)	: 978-964-03-7791-8
شابک (الکترونیکی)	: 978-964-03-7792-5
وضعیت فهرست نویسی	: فیپا
عنوان دیگر	: مدل سازی و تأثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت.
موضوع	: مبدل های انرژی
موضوع	: Electric Inverters
موضوع	: برق -- سیستم ها -- پایداری
موضوع	: Electric Power System Stability
شناسه افزوده	: دریابار، حمیدرضا، ۱۳۷۵ -
شناسه افزوده	: صنایع پسند، مجید، ۱۳۴۳ -
شناسه افزوده	: دانشگاه تهران. مؤسسه انتشارات. University of Tehran. Press
رده بندی کنگره	: TK۷۸۷۲ ۱۴۰۳
رده بندی دیویی	: ۶۲۱/۳۸۱۵۳۲۲
شماره کتابشناسی ملی	: ۹۹۱۸۴۲۷

این کتاب مشمول قانون حمایت از حقوق مؤلفان و مصنفان است. تکثیر کتاب به هر روش اعم از فتوکپی، ریسوگرافی، تهیه فایل های pdf لوح فشرده، بازنویسی در وبلاگ ها، سایت ها، مجله ها و کتاب، بدون اجازه کتبی ناشر مجاز نیست و موجب پیگرد قانونی می شود و تمامی حقوق برای ناشر محفوظ است.



عنوان: منابع مبتنی بر اینورتر: مدل سازی و تأثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت
 مؤلفان: دکتر معین عابدینی - مهندس حمیدرضا دریابار - دکتر مجید صنایع پسند
 نوبت چاپ: اول
 تاریخ انتشار: ۱۴۰۳
 شمارگان: ۱۰۰ نسخه
 ناشر: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران
 چاپ و صحافی: مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

«مسئولیت صحت مطالب کتاب با مؤلفان است»

بها: ۵,۱۰۰,۰۰۰ ریال

خیابان کارگر شمالی - خیابان شهید فرشی مقدم - مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران

پست الکترونیک: press@ut.ac.ir - تارنما: <http://press.ut.ac.ir>

پخش و فروش: تلفکس ۸۸۳۳۸۷۱۲

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ
فهرست مطالب

۱	پیشگفتار مؤلفان
۳	مقدمه مؤلفان
۵	فهرست علائم
۲۳	فصل اول: مقدمه
۲۳	۱-۱ پیش زمینه
۲۴	۲-۱ منبع مبتنی بر اینورتر (IBR)
۲۶	۱-۲-۱ واحد IBR
۲۶	۲-۲-۱ سیستم کنترل
۲۷	۳-۲-۱ سیستم جمع کننده
۲۷	۴-۲-۱ ترانسفورماتورها
۲۷	۵-۲-۱ تجهیزات جانبی
۲۷	۳-۱ ویژگی های IBRها
۲۸	۱-۳-۱ پاسخ دینامیکی وابسته به سیستم کنترل
۲۸	۲-۳-۱ جریان خطای مستقل از شبکه
۲۹	۳-۳-۱ امیدانس توالی منفی بزرگ
۲۹	۴-۳-۱ رفتار منبع جریان
۳۰	۵-۳-۱ فقدان اینرسی ذاتی
۳۰	۶-۳-۱ محدودیت در پاسخ فرکانسی
۳۱	۷-۳-۱ توان راکتیو غیرآنی حین خطا
۳۱	۸-۳-۱ انعطاف پذیری بالا
۳۱	۹-۳-۱ از دست دادن همگامی
۳۲	۱۰-۳-۱ تزریق جریان هارمونیک
۳۲	۱۱-۳-۱ محدودیت در بازیابی شبکه پس از خاموشی
۳۳	۱۲-۳-۱ تعمیر و نگهداری آسان
۳۳	۴-۱ اهمیت مطالعه IBRها
۳۶	۵-۱ ساختار کتاب

ح □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

۳۹	فصل دوم: مقدمه ای بر مدل سازی IBR ها
۳۹	۱-۲ مقدمه
۳۹	۲-۲ انواع مدل سازی عناصر سیستم های قدرت
۳۹	۱-۲-۲ مدل های حالت ماندگار و دینامیکی
۳۹	۱-۲-۲-۱ مدل های حالت ماندگار
۴۰	۲-۲-۲ مدل های دینامیکی
۴۱	۲-۲-۲ مدل های عمومی و ویژه
۴۲	۳-۲-۲ مدل های دقیق و تجمیع شده
۴۵	۳-۲-۲ مروری بر مدل های ارائه شده برای IBR ها
۴۶	۴-۲ اهمیت و چالش های مدل سازی IBR ها
۴۸	۵-۲ ویژگی های توصیه شده برای مدل IBR ها
۴۸	۱-۵-۲ ویژگی های مرتبط با دقت
۴۹	۲-۵-۲ ویژگی های مرتبط با قابلیت استفاده
۵۰	۳-۵-۲ ویژگی های مرتبط با کارایی
۵۰	۶-۲ جمع بندی
۵۲	تمرین و تحقیق

۵۳	فصل سوم: مدل سازی نیروگاه مبتنی بر فتوولتائیک خورشیدی
۵۳	۱-۳ مقدمه
۵۴	۲-۳ ساختار نیروگاه مبتنی بر فتوولتائیک خورشیدی
۵۵	۳-۳ مدار قدرت
۵۵	۱-۳-۳ آرایه خورشیدی
۵۹	۱-۳-۳-۱ مدل آرایه خورشیدی در نرم افزار PSCAD
۶۰	۲-۳-۳ مبدل DC/DC
۶۲	۱-۲-۳-۳ مدل سازی مبدل بوست در نرم افزار PSCAD
۶۳	۳-۳-۳ خازن لینک DC و اینورتر
۶۴	۱-۳-۳-۳ مدل سازی اینورتر در نرم افزار PSCAD
۶۵	۴-۳-۳ فیلتر خروجی
۶۶	۱-۴-۳-۳ مدل سازی فیلتر LCL در نرم افزار PSCAD
۶۶	۵-۳-۳ سیستم جمع کننده
۶۷	۱-۵-۳-۳ مدل سازی سیستم جمع کننده در نرم افزار PSCAD

فهرست مطالب □ خ

۶۸	..... ۳-۳-۶ ترانسفورماتور واحد و اصلی
۶۸	..... ۳-۳-۱ مدل ترانسفورماتور در نرم افزار PSCAD
۶۸	..... ۳-۴-۴ سیستم کنترل
۶۹	..... ۳-۴-۱ عنصر MPPT
۷۱	..... ۳-۴-۱-۱ مدل عنصر MPPT در نرم افزار PSCAD
۷۲	..... ۳-۴-۲ عنصر PLL
۷۲	..... ۳-۴-۲-۱ PLL قاب مرجع سنکرون (SRF-PLL)
۷۳	..... ۳-۴-۲-۲ حلقه قفل فرکانس (FLL) قاب مرجع ثابت
۷۴	..... ۳-۴-۲-۳ مدل عنصر PLL در نرم افزار PSCAD
۷۴	..... ۳-۴-۳ کنترل کننده مبدل DC/DC
۷۷	..... ۳-۴-۴ کنترل کننده اینورتر
۷۷	..... ۳-۴-۴-۱ مدل ریاضی توان خروجی اینورتر
۷۹	..... ۳-۴-۴-۲ کنترل کننده جریان اینورتر
۸۱	..... ۳-۴-۴-۳ محاسبه مراجع جریان
۸۷	..... ۳-۴-۴-۴ ساختار نهایی کنترل کننده اینورتر
۸۹	..... ۳-۴-۵ کنترل کننده نیروگاه
۸۹	..... ۳-۴-۵-۱ حالت های کنترل توان راکتیو-ولتاژ
۹۱	..... ۳-۴-۵-۲ حالت های کنترل توان اکتیو-فرکانس
۹۴	..... ۳-۴-۵-۳ قابلیت های مربوط به اغتشاش های ولتاژی
۹۵	..... ۳-۴-۵-۴ سایر قابلیت ها
۹۶	..... ۳-۴-۶ عناصر سیستم کنترل در نرم افزار PSCAD
۹۶	..... ۳-۵ جمع بندی
۹۸	..... تمرین و تحقیق

فصل چهارم: مدلسازی نیروگاه مبتنی بر مولد توربین بادی نوع ۴..... ۱۰۱

۱۰۱	..... ۴-۱ مقدمه
۱۰۲	..... ۴-۲ ساختار نیروگاه مبتنی بر مولد توربین بادی نوع ۴
۱۰۳	..... ۴-۳ توربین بادی و کنترل کننده آن
۱۰۸	..... ۴-۴ مدار قدرت
۱۰۸	..... ۴-۴-۱ ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG)
۱۰۹	..... ۴-۴-۱-۱ مدل PMSG در نرم افزار PSCAD

د □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل‌سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

۱۱۰	۲-۴-۴ مدل AC/DC
۱۱۱	۳-۴-۴ مدار برشگر
۱۱۲	۴-۴-۴ سایر عناصر
۱۱۲	۵-۴ سیستم کنترل
۱۱۲	۱-۵-۴ کنترل کننده مدل AC/DC
۱۱۶	۲-۵-۴ کنترل کننده مدار برشگر
۱۱۷	۳-۵-۴ کنترل کننده اینورتر
۱۱۹	۴-۵-۴ کنترل کننده نیروگاه
۱۲۰	۶-۴ جمع بندی
۱۲۱	تمرین و تحقیق

۱۲۳ **فصل پنجم: مدل تجميع شده نیروگاه‌های IBR**

۱۲۳	۱-۵ مقدمه
۱۲۴	۲-۵ مدل تجميع شده واحدهای Solar PV
۱۲۵	۱-۲-۵ مدل تجميع شده مدار قدرت
۱۲۹	۲-۲-۵ مدل تجميع شده سیستم کنترل
۱۳۰	۳-۵ عنصر مقیاس دهی نرم افزار PSCAD
۱۳۲	۴-۵ ترانسفورماتور واحد معادل
۱۳۲	۵-۵ سیستم جمع کننده معادل
۱۴۵	۶-۵ جمع بندی
۱۴۶	تمرین و تحقیق

۱۴۷ **فصل ششم: بررسی و تحلیل استاندارد IEEE-2800/2022**

۱۴۷	۱-۶ مقدمه
۱۴۷	۲-۶ الزامات عمومی
۱۴۸	۱-۲-۶ نقطه مرجع کاربردی (RPA)
۱۴۸	۲-۲-۶ ولتاژ و فرکانس کارکرد
۱۴۸	۳-۲-۶ دقت اندازه گیری
۱۴۹	۴-۲-۶ اولویت پاسخ دهی IBR
۱۵۰	۵-۲-۶ اتصال به شبکه و شروع سرویس
۱۵۰	۶-۲-۶ مدل سازی الزامات عمومی

ذ فهرست مطالب

۱۵۱	..... ۳-۶ الزامات پایداری فرکانس
۱۵۳	..... ۱-۳-۶ الزامات پاسخ توان اکتیو-فرکانس
۱۵۴	..... ۱-۳-۶ پاسخ فرکانسی اولیه (PFR)
۱۵۸	..... ۲-۳-۶ پاسخ فرکانسی سریع (FFR)
۱۶۵	..... ۲-۳-۶ الزامات عبور از اغتشاش فرکانسی
۱۶۵	..... ۱-۲-۳-۶ اغتشاش کاهش فرکانس
۱۶۶	..... ۲-۲-۳-۶ اغتشاش افزایش فرکانس
۱۶۶	..... ۳-۲-۳-۶ الزامات عبور از نرخ تغییر فرکانس (ROCOF ride through)
۱۶۶	..... ۳-۳-۶ مدل سازی الزامات پایداری فرکانس
۱۶۷	..... ۴-۶ الزامات پایداری ولتاژ
۱۶۷	..... ۱-۴-۶ الزامات کنترل توان راکتیو-ولتاژ
۱۶۷	..... ۱-۴-۶ قابلیت توان راکتیو
۱۷۰	..... ۲-۴-۶ حالت های کنترل توان راکتیو-ولتاژ
۱۷۱	..... ۲-۴-۶ الزامات عبور از اغتشاشات ولتاژ
۱۷۴	..... ۱-۲-۴-۶ الزامات محدوده کارکرد اجباری در شرایط کاهش و افزایش ولتاژ
۱۷۷	..... ۲-۴-۶ قابلیت عبور از اغتشاشات ولتاژ متوالی
۱۷۸	..... ۳-۲-۴-۶ بازیابی خروجی پس از اغتشاش ولتاژ
۱۷۹	..... ۴-۲-۴-۶ الزامات عبور از اضافه ولتاژهای گذرا
۱۸۰	..... ۳-۴-۶ مدل سازی الزامات پایداری ولتاژ
۱۸۱	..... ۵-۶ الزامات کیفیت توان
۱۸۱	..... ۱-۵-۶ محدودیت اعوجاج هارمونیک
۱۸۳	..... ۲-۵-۶ محدودیت مشارکت در اضافه ولتاژ
۱۸۳	..... ۳-۵-۶ مدل سازی الزامات کیفیت توان
۱۸۳	..... ۶-۶ الزامات حفاظت
۱۸۴	..... ۱-۶-۶ حفاظت ولتاژی بخش AC
۱۸۴	..... ۲-۶-۶ حفاظت جریانی بخش AC
۱۸۴	..... ۳-۶-۶ مدل سازی الزامات حفاظت
۱۸۵	..... ۷-۶ جمع بندی
۱۸۶	..... تمرین و تحقیق

ر □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل‌سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

فصل هفتم: پایداری فرکانس در حضور نیروگاه‌های IBR.....	۱۸۷
۱-۷ مقدمه.....	۱۸۷
۲-۷ پایداری فرکانس.....	۱۸۷
۱-۲-۷ پاسخ فرکانسی سیستم قدرت سنتی.....	۱۸۸
۲-۲-۷ شاخص‌های مهم فرکانسی و مولفه‌های تاثیرگذار بر آنها.....	۱۹۷
۳-۷ تاثیر نیروگاه‌های IBR بر پایداری فرکانس.....	۱۹۹
۴-۷ بهبود پایداری فرکانس در شبکه با نفوذ بالای IBRها.....	۲۰۲
۵-۷ پاسخ فرکانسی سریع (FFR): مفاهیم، ویژگی‌ها و تاثیر بر پایداری فرکانس.....	۲۰۴
۱-۵-۷ زمان پاسخ FFR.....	۲۰۶
۲-۵-۷ انواع FFR.....	۲۰۸
۳-۵-۷ سایر جنبه‌های مهم FFR.....	۲۰۹
۴-۵-۷ مروری بر تاثیر FFR و پارامترهای آن بر پایداری فرکانس.....	۲۱۰
۶-۷ حلقه‌های کنترلی پاسخ‌های فرکانسی در IBRها.....	۲۱۱
۱-۶-۷ کنترل بار کاهش یافته.....	۲۱۲
۱-۱-۶-۷ روش‌های کاهش بار.....	۲۱۲
۲-۱-۶-۷ کنترل بار کاهش یافته WTG ها.....	۲۱۴
۳-۱-۶-۷ کنترل بار کاهش یافته Solar PV ها.....	۲۱۷
۲-۶-۷ پیاده‌سازی انواع پاسخ فرکانسی در IBRها.....	۲۱۹
۱-۲-۶-۷ پیاده‌سازی پاسخ‌های فرکانسی در واحدهای WTG نوع ۴.....	۲۱۹
۲-۲-۶-۷ پیاده‌سازی پاسخ‌های فرکانسی در واحدهای Solar PV.....	۲۲۷
۷- الزامات فرکانسی در نظام‌نامه کشورهای مختلف.....	۲۲۸
۸-۷ مطالعه مبتنی بر شبیه‌سازی تاثیر نیروگاه‌های IBR بر پایداری فرکانس.....	۲۳۰
۱-۸-۷ شبکه تحت مطالعه.....	۲۳۱
۲-۸-۷ بررسی تاثیر مولفه‌های مختلف شبکه و نیروگاه IBR بر پایداری فرکانس.....	۲۳۴
۱-۲-۸-۷ اثر ضریب نفوذ نیروگاه‌های IBR.....	۲۳۴
۲-۲-۸-۷ اثر شیب دروپ PFR.....	۲۳۷
۳-۲-۸-۷ اثر ارائه FFR توسط نیروگاه‌های IBR.....	۲۴۱
۴-۲-۸-۷ اثر نوع مشخصه FFR.....	۲۴۷
۳-۸-۷ بررسی تاثیر نیروگاه‌های IBR و پاسخ فرکانسی آنها بر اینرسی شبکه.....	۲۴۸
۴-۸-۷ بررسی تاثیر ارائه FFR توسط نیروگاه‌های IBR بر اینرسی بحرانی.....	۲۵۰
۵-۸-۷ بررسی تاثیر وقوع همزمان اغتشاش فرکانسی و ولتاژی بر پایداری فرکانس.....	۲۵۱

ز □ فهرست مطالب

۲۵۴ ۹-۷ جمع‌بندی
۲۵۵ تمرین و تحقیق

فصل هشتم: پایداری ولتاژ در حضور نیروگاه‌های IBR ۲۵۷

۲۵۷ ۱-۸ مقدمه
۲۵۷ ۲-۸ پایداری ولتاژ
۲۵۹ ۱-۲-۸ دسته‌بندی پایداری ولتاژ
۲۵۹ ۱-۲-۸-۱ پایداری ولتاژ حالت ماندگار
۲۶۰ ۲-۲-۸-۱ پایداری ولتاژ دینامیکی
۲۶۴ ۲-۲-۸ پایداری بار
۲۶۵ ۳-۲-۸ روش‌های پیشگیری از ناپایداری ولتاژ
۲۷۱ ۳-۸ تأثیر نیروگاه‌های IBR بر پایداری ولتاژ
۲۷۲ ۱-۳-۸ تأثیر بر پایداری حالت ماندگار
۲۷۴ ۲-۳-۸ تأثیر بر پایداری دینامیکی
۲۷۶ ۴-۸ الزامات FRT در نظامنامه کشورهای مختلف
۲۷۸ ۵-۸ مطالعه تأثیر نیروگاه‌های IBR بر پدیده FIDVR
۲۷۹ ۱-۵-۸ اثر ضریب نفوذ موتور القایی
۲۸۳ ۲-۵-۸ اثر ضریب نفوذ نیروگاه‌های IBR
۲۸۳ ۱-۲-۵-۸ اثر افزایش همزمان ضریب نفوذ نیروگاه‌های IBR و بار موتوری
۲۹۱ ۲-۲-۵-۸ اثر افزایش ضریب نفوذ نیروگاه‌های IBR در FIDVR شدید
۲۹۵ ۳-۵-۸ اثر ضریب K
۲۹۹ ۶-۸ پیشنهاد تطبیق الزامات FRT با FIDVR
۲۹۹ ۱-۶-۸ نیازمندی‌های سازگاری IBRها با الزامات FRT منطبق با FIDVR
۳۰۰ ۷-۸ ارزیابی رفتار IBR در خطاهای اتصال کوتاه نامتقارن
۳۰۹ ۸-۸ جمع‌بندی
۳۱۰ تمرین و تحقیق

فصل نهم: مدل‌سازی فضای حالت سیستم قدرت دارای نیروگاه‌های IBR با رویکرد تحلیل

اغتشاش کوچک ۳۱۳
۳۱۳ ۱-۹ مقدمه
۳۱۳ ۲-۹ مدل‌سازی ژنراتور سنکرون

س □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل‌سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

۳۱۹	۱-۲-۹ تبدیل پارک
۳۲۲	۲-۲-۹ پروینیت‌سازی
۳۲۴	۳-۲-۹ رابطه بین جریان با شار پیوندی
۳۲۶	۴-۲-۹ مدل گشتاور میراکننده
۳۲۶	۵-۲-۹ استخراج شرایط حالت ماندگار
۳۲۷	۳-۳-۹ مدل‌سازی کنترل‌کننده‌های ژنراتور سنکرون
۳۲۷	۱-۳-۹ مدل‌سازی سیستم مکانیکی توربین-ژنراتور
۳۲۸	۱-۳-۹ توربین آبی
۳۳۰	۲-۳-۹ توربین بخار
۳۳۳	۲-۳-۹ مدل‌سازی سیستم تحریک و AVR
۳۳۶	۳-۳-۹ مدل‌سازی سیستم گاورنر
۳۳۶	۴-۳-۹ مدل‌سازی پایدارساز سیستم قدرت (PSS)
۳۳۷	۴-۹ مدل‌سازی فضای حالت WTG نوع ۴
۳۳۷	۱-۴-۹ مدل PMSG
۳۳۸	۲-۴-۹ مدل مبدل AC/DC
۳۳۹	۳-۴-۹ مدل اینورتر
۳۴۰	۴-۴-۹ مدل PLL
۳۴۰	۵-۹ معادلات جبری شبکه چندماشینه
۳۴۳	۱-۵-۹ مدل بار
۳۴۳	۲-۵-۹ تعیین زاویه مرجع
۳۴۴	۶-۹ حل معادلات دیفرانسیل شبکه چندماشینه و تحلیل مقادیر ویژه
۳۴۴	۱-۶-۹ محاسبه شرایط اولیه
۳۴۴	۲-۶-۹ مدل برداری معادلات دیفرانسیل
۳۴۴	۳-۶-۹ خطی‌سازی سیستم
۳۴۶	۴-۶-۹ تحلیل مقادیر ویژه
۳۴۶	۷-۹ ارزیابی و صحت‌سنجی مدل اغتشاش کوچک WTG
۳۴۷	۱-۷-۹ تغییر در سرعت باد
۳۴۹	۲-۷-۹ خطای اتصال کوتاه سه فاز در ابتدای خط متصل‌کننده WTG به شین بی‌نهایت
۳۵۰	۳-۷-۹ خطای اتصال کوتاه در ۵۰ درصد خط متصل‌کننده WTG به شین بی‌نهایت
۳۵۱	۴-۷-۹ خطای اتصال کوتاه در انتهای خط متصل‌کننده WTG به شین بی‌نهایت
۳۵۲	۵-۷-۹ تغییر در ولتاژ شین بی‌نهایت

فهرست مطالب □ ش

۳۵۸	۸-۹ بررسی تأثیر نیروگاه‌های IBR بر پایداری اغتشاش کوچک شبکه ۳۹ شین IEEE
۳۵۸	۱-۸-۹ تأثیر نیروگاه‌های مبتنی بر WTG نوع ۴
۳۶۵	۲-۸-۹ تأثیر نیروگاه‌های مبتنی بر Solar PV
۳۶۹	۸-۹ جمع‌بندی
۳۷۰	تمرین و تحقیق
۳۷۱	فصل دهم: پایداری زاویه در نیروگاه‌های IBR
۳۷۲	۱-۲-۱۰ تعریف ناپایداری زاویه
۳۷۸	۱-۵-۱۰ مقدمه
۳۸۰	۲-۵-۱۰ استخراج معادله دینامیکی بیانگر پایداری زاویه‌ای در IBR
۳۸۳	۱-۶-۱۰ تحلیل پایداری استاتیک
۳۸۵	۲-۶-۱۰ تحلیل پایداری اغتشاش کوچک
۳۹۴	۳-۶-۱۰ روش‌های بهبود پایداری اغتشاش کوچک پدیده همگام‌سازی
۳۹۸	۴-۶-۱۰ تحلیل پایداری زاویه‌ای اغتشاش بزرگ (گذرا)
۴۰۵	۵-۶-۱۰ روش‌های کنترلی بهبود پایداری گذرای همگام‌سازی
۴۱۸	تمرین و تحقیق
۴۱۹	پیوست الف - مدولاسیون عرض پالس (PWM)
۴۱۹	الف-۱ مدولاسیون عرض پالس سینوسی
۴۲۱	الف-۲ پیاده‌سازی PWM در نرم‌افزار PSCAD
۴۲۳	پیوست ب - انواع ساختار مبدل‌های الکترونیک قدرت
۴۲۳	ب-۱ اینورتر برشی سه سطحی با نقطه خنثی (NPC)
۴۲۴	ب-۲ انواع ساختار مبدل‌های پشت به پشت
۴۲۷	پیوست ج - چارچوب مرجع سنکرون dq
۴۲۷	ج-۱ تبدیل چارچوب مرجع abc به dq و برعکس
۴۳۰	ج-۲ تبدیل پارک در نرم‌افزار PSCAD
۴۳۱	پیوست د - مدل‌سازی بار و اهمیت آن در مطالعات سیستم‌های قدرت
۴۳۱	د-۱ مدل بار
۴۳۱	د-۱-۱ مدل‌های بار استاتیکی

ص □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل‌سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

د-۱-۲ مدل‌های بار دینامیکی ۴۳۳

د-۱-۲-۱ مدل‌های موتور القایی ۴۳۳

د-۱-۲-۲ مدل بار بازیابی نمایی ۴۳۵

د-۲ مدل‌های بار در نرم‌افزار PSCAD ۴۳۶

د-۳ اهمیت مدل بار در مطالعات پایداری فرکانس ۴۳۷

پیوست هـ - روشهای تجزیه و تحلیل پایداری ولتاژ ۴۳۹

هـ-۱ تحلیل استاتیکی پایداری ولتاژ ۴۳۹

هـ-۲ تحلیل دوشاخگی ۴۴۰

هـ-۳ منحنی‌های P-V ۴۴۲

هـ-۴ منحنی‌های V-Q ۴۴۴

هـ-۵ تحلیل مُدال ۴۴۶

منابع ۴۴۹

اصطلاحات تخصصی (واژه‌نامه) ۴۶۷

پیشگفتار مؤلفان

بیش از یک قرن از پیدایش شبکه‌های برق و بهره‌برداری از آنها در نقاط مختلف دنیا می‌گذرد. در طی این دوران، این سیستم بزرگ تغییرات و تحولات پیچیده‌ای را با گذشت زمان تجربه کرده است که البته این تحولات به دلیل ابعاد وسیع سیستم و پیچیدگی تکنولوژی به کندی صورت پذیرفته است. اما در سالیان اخیر، به دلیل محدودیت منابع فسیلی و انرژی در دنیا، کمبود آب و همچنین آلودگی‌های زیست‌محیطی، تحولات نوظهور و سریعی در فرآیند تبدیل انرژی پدید آمده است. بهره‌گیری از منابع خورشید و باد، مهم‌ترین استراتژی جدید کشورهای پیشرفته جهت تأمین برق و گذر از بحران کمبود انرژی است. برخلاف گذشته، تغییرات مذکور به قدری سریع است که حتی در حال حاضر برخی از کشورهای اروپایی در مدت زمان کوتاهی با افزایش ضریب نفوذ نیروگاه‌های جدید، بیش از ۵۰٪ انرژی برق خود را از طریق دو منبع خدادادی مذکور تأمین می‌نمایند. در راستای بهره‌برداری بهینه از این منابع جدید که با عنوان منابع مبتنی بر اینورتر (IBR) شناخته می‌شوند، حوزه‌های الکترونیک قدرت، پایداری سیستم قدرت، الگوریتم‌های کنترلی نوظهور و حتی سیستم حفاظت شبکه‌ها ضمن تجربه چالش‌های جدید به سرعت در حال تغییر نسل تکنولوژی هستند.

کشور ایران نیز در سالیان گذشته و حال حاضر با بحران کمبود انرژی دست و پنجه نرم می‌کند. در تابستان‌ها به دلیل کمبود منابع آبی، به کارگیری نیروگاه‌های آبی محدودیت دارد و در زمستان‌ها نیز به دلیل دشوار بودن انتقال گاز از مناطق جنوبی (دارای ذخایر گازی) به مناطق شمالی کشور (فاقد ذخایر گازی)، امکان بهره‌گیری از نیروگاه‌های گازی با ظرفیت کامل در شمال کشور میسر نیست. لذا نظر به شرایط جغرافیایی کشور، بهره‌گیری از IBRها که از انرژی‌های تجدیدپذیر خورشید و باد بهره می‌برند، راه‌حل مناسبی برای عبور از شرایط بحرانی تأمین انرژی خواهد بود. در این راستا می‌بایست نیروگاه‌های IBR با ظرفیت تا چند صد مگاوات به شبکه‌های انتقال و فوق توزیع متصل گردند. از آنجا که دینامیک منابع IBR مبهم، پیچیده و در عین حال هر روز دستخوش تغییر است، مؤلفان اقدام به مطالعه، تحقیق و انجام پروژه‌های عملی در این راستا کرده‌اند. ماحصل این پروژه‌ها، طراحی و پیاده‌سازی چندین نیروگاه خورشیدی در کشور بوده است که در حال حاضر بهره‌برداری می‌شود. علاوه بر این، برحسب نیاز کشور،

۲ □ منابع مبتنی بر اینورتر: مدل‌سازی و تاثیر آنها بر دینامیک و پایداری سیستم قدرت

قراردادهای پروژه‌هایی تحقیقاتی با مهم‌ترین متولی و سیاستگذار انرژی کشور که شرکت توانیر است، منعقد شده است که یکی از خروجی این پروژه‌ها، راه‌اندازی یک آزمایشگاه مبتنی بر IBR در دانشگاه تهران است. همچنین در سالیان اخیر، پایان‌نامه‌های متعدد کارشناسی ارشد و رساله‌های دکتری مختلف در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه تهران تعریف گردیده که نتایج مهم و دستاوردهای ارزنده ملی و بین‌المللی در قالب انتشار مقالات معتبر گوناگون داشته است.

با در نظر گرفتن تجربیات مذکور، دیدگاه اصلی این کتاب آموزش ساختار، مدل‌سازی، جزییات و چالش‌های بهره‌برداری و پایداری در حوزه IBR و ارائه راه‌حل‌های مناسب برای دانشجویان و مهندسان صنعت است. مسلماً اولین گام در راستای افزایش نفوذ نیروگاه‌های جدید به شبکه برق، تربیت نیروهای فنی است. لذا این نیروها در صورت فراگیری اصول و بر اساس تجارب قبلی می‌توانند شبکه برق کشور را راهبری نمایند.

یکی از اهداف عمده این کتاب، آموزش مدل‌سازی IBRهای مبتنی بر فتوولتائیک خورشیدی و توربین بادی است. سعی شده است در این راستا جزییات به‌طور کامل بیان گردند. بعد از تشریح نحوه کارکرد این نیروگاه‌ها، مهم‌ترین استاندارد بین‌المللی منتشرشده در حوزه IBRها یعنی استاندارد IEEE-2800 (انتشار یافته در سال ۲۰۲۲) بررسی شده است. در نهایت تاثیر IBRها بر پایداری شبکه در قالب تحلیل و شبیه‌سازی برای خواننده تبیین گردیده است. لذا کتاب حاضر علاوه بر بعد آموزشی برای دانشجویان کشور به خصوص دانشجویان تحصیلات تکمیلی حوزه مهندسی برق قدرت، می‌تواند برای مهندسین صنعت که در شرکت‌های برق منطقه‌ای، توزیع و مدیریت شبکه، شرکت‌های مشاور و حتی شرکت‌های فولاد، پتروشیمی و پالایشگاهی که از IBRها برای تأمین انرژی خود استفاده می‌نمایند، مفید فایده واقع شود.

در راستای تألیف کتاب حاضر افراد مختلفی در دانشگاه و صنعت همکاری داشته و حمایت کرده‌اند، لذا مؤلفان بر خود لازم می‌دانند که از تمامی این افراد سپاسگزاری و قدردانی نمایند. مؤلفان از آقایان مهندسین سروش قمری، سید علی موسوی، سامان مددزاده، اشکان شیخ صراف و امیر پاشایی که در تدوین جزییات برخی از فصل‌های کتاب کمک‌های ارزنده‌ای داشته‌اند کمال تشکر و قدردانی را ابراز می‌نمایند. همچنین از جناب آقای دکتر رجبی مشهدی مدیرعامل محترم شرکت توانیر، جناب آقای مهندس ملاعلیا، جناب آقای دکتر تقوایی و جناب آقای مهندس آبنیکی از مدیران محترم شرکت توانیر که حامی انتشار این کتاب بوده‌اند قدردانی می‌گردد.

مقدمه مؤلفان

پیشرفت تکنولوژی و کاهش هزینه توسعه منابع تجدیدپذیر و از طرفی توجه جامعه جهانی به کاهش آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی، سبب شده تا احداث نیروگاه‌های تجدیدپذیر با ظرفیت بالا (تا چند صد مگاوات) به سرعت در حال افزایش باشد. برخلاف گذشته که منابع تجدیدپذیر کوچک به شبکه‌های توزیع متصل می‌شدند، این نیروگاه‌های بزرگ بخشی از شبکه انتقال هستند. به‌طور معمول جهت کنترل پذیری مناسب و تبدیل جریان از DC به AC، نیروگاه‌های تجدیدپذیر توسط مبدل‌های الکترونیک قدرت به شبکه انتقال متصل می‌شوند. به همین دلیل به این منابع، منابع مبتنی بر اینورتر (IBR) اطلاق می‌شود. رفتار IBRها در شرایط بهره‌برداری مختلف برخلاف ژنراتورهای سنکرون به‌طور کامل توسط سیستم کنترل آنها تعیین می‌گردد. لذا ویژگی‌های رفتاری این منابع می‌تواند بسیار متفاوت از منابعی باشد که سال‌ها در شبکه قدرت حضور داشته‌اند. به همین دلیل ممکن است عملکرد سیستم‌هایی که بر اساس رفتار ژنراتورهای سنکرون توسعه یافته‌اند، دچار چالش گردد. از طرفی شبکه‌های امروزی به دلیل افزایش مصرف معمولاً در مرز پایداری خود در حال کار هستند. این مسائل منجر شده است که مطالعه و بررسی تأثیر نیروگاه‌های IBR بر ابعاد مختلف پایداری شبکه‌های قدرت و سیستم‌های تأثیرگذار بر آن، اهمیت ویژه‌ای یابد.

با این حال، اولین قدم برای مطالعه IBRها و تأثیر آنها بر شبکه قدرت، مدل‌سازی مناسب و کارآمد آنها است. اما مشکلاتی نظیر ساختارهای متنوع اجزاء، نبود اطلاعات کافی از سازندگان، نبود الزامات مدل‌سازی و استاندارد برای این نوع از منابع، این امر را دچار چالش کرده است. همچنین حوادث واقعی مختلف نشان داده، مدل‌های عمومی که تا به امروز مورد استفاده قرار می‌گرفتند، کفایت لازم را نداشته و باید از مدل‌های حالت گذرای الکترومغناطیسی (EMT¹) برای مطالعات سیستم قدرت در حضور IBRها استفاده شود.

در راستای مسائل بیان‌شده، این کتاب در ده فصل به روش‌شناسی مدل‌سازی IBRها و بررسی تأثیر آنها بر پایداری سیستم قدرت می‌پردازد. در فصل اول، ساختار کلی نیروگاه‌های IBR بیان شده و ویژگی‌های متمایز آن از ژنراتورهای سنکرون برشمرده می‌شود. در فصل دوم تلاش می‌شود تا درکی از

اهمیت و چالش‌های مدل‌سازی IBRها ایجاد گردد و ویژگی‌های یک مدل مناسب برای IBRها شناسایی شود. فصل‌های سوم و چهارم به ترتیب به توسعه یک مدل عمومی حوزه EMT برای نیروگاه‌های مبتنی بر فتوولتائیک خورشیدی (Solar PV)^۱ و نیروگاه‌های مبتنی بر مولد توربین بادی (WTG)^۲ می‌پردازند. فصل پنجم به چگونگی تجمیع‌سازی مدل واحدهای IBR جهت امکان‌پذیری انجام مطالعات و شبیه‌سازی‌ها و کاهش زمان آنها اختصاص داده شده است. در فصل ششم، الزامات استاندارد IEEE-2800/2022 که اولین و تنها استاندارد موجود برای بهره‌برداری IBRها است، تحلیل و بررسی خواهند شد. در فصول هفتم و هشتم به ترتیب تاثیر نیروگاه‌های IBR بر پایداری فرکانس و ولتاژ سیستم‌های قدرت بحث و بررسی می‌گردد. در فصل نهم مدل‌سازی اغتشاش کوچک شبکه قدرت دارای نیروگاه IBR شرح و بسط داده می‌شود. در نهایت، در فصل دهم، پایداری زاویه نیروگاه IBR شرح و بررسی می‌گردد.

1- Solar Photovoltaic
2- Wind Turbine Generator