



شبیه‌سازی الکترونیک قدرت
و
سیستم‌های واسط تبدیل انرژی

ام. گودوی سیموئز

فلیکس.ای.فارت

ترجمه: بهروز طوسی، دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه ارومیه

وحید تلاوت، دانشیار گروه مهندسی برق دانشگاه ارومیه

حامد نژادخاتمی، دانشجوی دکتری مهندسی برق قدرت دانشگاه ارومیه



سرشناسه	:	سیموئینس، ام. گودوی، ۱۹۶۳ - م.	Simões, M. Godoy
عنوان و نام پدیدآور :		شبییه سازی الکترونیک قدرت و سیستم‌های واسط تبدیل انرژی / تالیف ام. گودوی سیموئز، فلیکس. آفرت؛ ترجمه بهروز طوسی، وحید تلاوت و حامد نژادخاتمی.	
مشخصات نشر :		ارومیه: انتشارات دانشگاه ارومیه، ۱۴۰۰.	
مشخصات ظاهری :		۳۷۷ص.	
فروست :		انتشارات دانشگاه ارومیه؛ ۲۹۲.	
شابک :		978-600-8681-82-3	
وضعیت فهرست نویسی:		فیبا	
عنوان اصلی :		Modeling power electronics and interfacing energy conversion systems, 2016	
موضوع :		الکترونیک نیرو -- الگوهای ریاضی (Power electronics -- Mathematical models)	
موضوع :		تبدیل انرژی -- الگوهای ریاضی (Energy conversion -- Mathematical models)	
شناسه افزوده :		فارت، فلیکس ا.، ۱۹۴۷ - م.	Farret, Felix A
شناسه افزوده :		طوسی، بهروز، ۱۳۴۳-، مترجم	
شناسه افزوده :		تلاوت، وحید، ۱۳۵۸-، مترجم	
شناسه افزوده :		نژادخاتمی، حامد، ۱۳۶۵-، مترجم	
شناسه افزوده :		انتشارات دانشگاه ارومیه.	
رده بندی کنگره :		TK۷۸۸۱/۱۵	
رده بندی دیویی :		۶۲۱/۳۱۷	
شماره کتابشناسی ملی:		۷۵۴۷۹۹۶	

مرکز انتشارات دانشگاه ارومیه

ارومیه، کیلومتر ۱۱ جاده سرو، صندوق تلفن: ۳۱۹۴۲۲۷۴ - ۳۲۷۷۹۹۳۰ - ۰۴۴، دورنگار ۳۲۷۷۹۹۳۰

عنوان: شبیه‌سازی الکترونیک قدرت و سیستم‌های واسط تبدیل انرژی

ترجمه: بهروز طوسی، وحید تلاوت و حامد نژادخاتمی

ناشر: انتشارات دانشگاه ارومیه

لیتوگرافی، چاپ و صحافی: قم، نشر هم میهن ۰۹۱۰۲۸۰۷۰۲۱

نوبت چاپ: اول

سال چاپ: ۱۴۰۰

شمارگان: ۲۰۰ نسخه

قیمت پشت جلد: ۸۰۰۰۰۰ ریال

شابک: ۳-۸۲-۸۶۸۱-۶۰۰-۹۷۸

پیشگفتار

کتاب حاضر منبع ارزشمندی برای دروس دانشگاهی مانند الکترونیک قدرت، سیستم‌های قدرت و انرژی‌های تجدیدپذیر است، چرا که طراحی و تحلیل به کمک رایانه نقش به‌سزایی در آن‌ها داشته و چنان که آگاهید این دروس در مهندسی برق از عناوین اصلی و پایه محسوب می‌گردند.

علاوه بر دانشجویان، مهندسان برق شاغل در صنعت نیز با داشتن دانش پایه در مباحث حالات گذرا در مدارهای الکتریکی، الکترونیک قدرت و سیستم‌های قدرت، می‌توانند با مطالعه این کتاب از مطالب آن بهره مند گردند. چیدمان مطالب کتاب به نحوی است که از مفاهیم ساده آغاز شده و به تدریج مباحث پیچیده‌تر مطرح می‌شوند. در کل، فصول کتاب شامل مقدمه، مثال‌های حل‌شده، پروژه‌های عملی و آزمایشگاهی و مسائل پیشنهادی است.

در این کتاب، با مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی و تحلیل مدارهای الکتریکی، مدل‌سازی مدارهای الکتریکی به صورت بلوک دیاگرامی مطرح می‌شود. مدارات الکترونیک قدرت بر مبنای مدار معادل الکتریکی و بر مبنای بلوک دیاگرام‌ها به همراه مثال‌هایی با به‌کارگیری نرم‌افزار PSIM، نرم‌افزار Matlab، جعبه ابزار Power System و Simulink در Matlab مدل‌سازی می‌شوند. پیاده‌سازی عملی سیستم‌های کنترل به دانشجویان و مهندسان نشان می‌دهد که چگونه از نرم‌افزارهای رایانه‌ای برای طراحی فیدبک در مبدل‌های DC/DC، موتورهای DC و مبدل‌های انرژی خورشیدی و بادی متصل یا منفصل از شبکه قدرت، استفاده کنند.

این کتاب، ابزار توانمندی برای شبیه‌سازی مدارات و سیستم‌های مشتمل بر تجهیزات ابزار دقیق و حسگرها با استفاده از شبیه‌ساز PSIM ارائه می‌کند. همچنین، گریزی به مدل‌سازی ماشین‌های الکتریکی بر مبنای مدار معادل می‌زند. مثال‌های فصل مربوطه (فصل ۷) شامل ماشین‌های القایی از دو سو تغذیه (DFIM)، ژنراتورهای القایی خود تحریک (SEIG)، ماشین‌های سنکرون با آهنربای دائم، ترانسفورماتور تک‌فاز غیرایده آل با تغذیه هارمونیک‌دار می‌باشد؛ همچنین این کتاب مدل‌سازی منابع انرژی جایگزین از قبیل سلول‌های خورشیدی، ژنراتورهای القایی SEIG، DFIG، PMSG، سلول‌های سوختی و باتری‌های شیمیایی را پوشش داده است. به موضوعات دیگری نیز از قبیل اینورترهای متصل به شبکه و منفصل از شبکه به همراه سیستم‌های متنوع کنترلی و جزئیات طراحی نمونه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی آنها پرداخته شده است.

در فصول پایانی، مرتبط با پردازش دیجیتال (DSP) در الکترونیک قدرت، به شکل عمیق تری به مباحث کیفیت توان و طراحی برنامه‌هایی مبتنی بر کیفیت توان جهت ارزیابی و طراحی فیلترها به منظور به کارگیری در سیستم‌های قدرت با استفاده از تبدیل فوریه گسسته (DFT) و نرم افزار Matlab پرداخته شده است، همچنین در این قسمت چندین تکنیک DSP، محاسبه THD، PLL تک‌فاز و سه‌فاز و روش MPPT به همراه پروژه‌های آزمایشگاهی ارائه شده است.

امید داریم این کتاب بتواند کمکی هر چند کوچک در راستای افزایش توانایی علمی دانشجویان و مهندسان شاغل در صنعت باشد. از خوانندگان عزیز خواهشمندیم هر گونه نقد علمی و نوشتاری بر ترجمه حاضر و پیشنهادهای خود را با آدرس b.tousi@urmia.ac.ir در میان بگذارند تا در ویراست‌ها و تجربیات پیش‌رو، مد نظر قرار گیرد.

گروه مترجمان

فصل اول: مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی در مهندسی برق	۱
۱-۱- اصول بنیادی مدل‌سازی مبتنی بر فضای حالت.....	۶
۱-۲- مثالی از مدل‌سازی یک شبکه الکتریکی	۹
۱-۳- تابع تبدیل	۱۲
۱-۳-۱- فضای حالت برای تبدیل تابع تبدیل	۱۳
۱-۴- مدل‌سازی و شبیه‌سازی سیستم‌های انرژی و الکترونیک قدرت.....	۱۷
۱-۵- مسائل پیشنهادی.....	۲۳
فصل دوم: تحلیل مدارهای الکتریکی با تحلیل مش و گره.....	۳۲
۲-۱- مقدمه.....	۳۳
۲-۲- حل معادلات ماتریسی.....	۳۴
۲-۳- پروژه آزمایشگاهی: تحلیل مش و گره مدارهای الکتریکی با استفاده از قضیه جمع آثار.....	۳۵
۲-۴- مسائل پیشنهادی.....	۴۵
فصل سوم: مدل‌سازی و تحلیل مدارهای الکتریکی با بلوک دیاگرام‌ها.....	۵۱
۳-۱- مقدمه.....	۵۲
۳-۲- پروژه آزمایشگاهی: مطالعه پاسخ گذرا و شبیه‌سازی بلوک دیاگرام با تحلیل برپایه تبدیل لاپلاس.....	۵۴
۳-۳- مقایسه با تحلیل فضای حالت فازوری.....	۶۲
۳-۴- یافتن معادل تونن.....	۶۵
۳-۵- مسائل پیشنهادی.....	۶۷

فصل چهارم: الکترونیک قدرت: شبیه‌سازی بر مبنای مدارهای الکتریکی.....	۷۱
۴-۱- مقدمه.....	۷۲
۴-۲- مطالعه موردی: یکسوساز نیم‌موج	۷۸
۴-۳- پروژه آزمایشگاهی: شبیه‌سازی مدار الکتریکی با استفاده از PSIM و آنالیز SIMSCAPE POWER	۸۴
SYSTEMS MATLAB.....	۸۴
۴-۴- مسائل پیشنهادی.....	۹۱
فصل پنجم: طراحی سیستم‌های کنترل الکترونیک قدرت.....	۹۵
۵-۱- مقدمه.....	۹۶
۵-۱-۱- طراحی سیستم کنترلی.....	۹۸
۵-۱-۲- کنترل حلقه بسته تناسبی-انتگرالی.....	۹۹
۵-۲- پروژه آزمایشگاهی: طراحی یک کنترل مبدل بوست DC/DC	۱۰۳
۵-۲-۱- مبدل بوست ایده‌آل.....	۱۰۴
۵-۲-۲- مدل سیگنال کوچک و استخراج تابع تبدیل مبدل بوست.....	۱۰۴
۵-۲-۳- بلوک دیاگرام کنترلی و تابع تبدیل.....	۱۰۹
۵-۲-۳-۱- جبران‌ساز نوع ۳	۱۰۹
۵-۳- طراحی یک تقویت‌کننده خطای جبران‌شده نوع ۳.....	۱۱۱
۵-۳-۱- روش K	۱۱۱
۵-۳-۲- جای‌گذاری قطب‌ها و صفرها در تقویت‌کننده نوع ۳.....	۱۱۲
۵-۴- طراحی کنترل‌کننده.....	۱۱۳
۵-۵- مطالعات شبیه‌سازی PSIM برای مبدل بوست DC/DC	۱۱۶
۵-۶- مبدل بوست : مدل متوسط.....	۱۱۷
۵-۷- مدار کامل مبدل بوست DC/DC	۱۲۱
۵-۸- پروژه آزمایشگاهی: طراحی یک کنترل گسسته در MATLAB همراه با مدل یک موتور DC در	۱۲۴
SIMULINK.....	۱۲۴

۱۲۹.....	۵-۹- مسائل پیشنهادی.....
۱۳۵.....	فصل ششم: واسط ابزار دقیق و کنترل در سیستم‌های انرژی و الکترونیک قدرت.....
۱۳۶.....	۱-۶-مقدمه.....
۱۳۷.....	۱-۱-۶- حسگرها و مبدل‌ها جهت کسب داده در سیستم های قدرت
۱۳۸.....	۲-۶- حسگرهای الکتریکی غیرفعال.....
۱۳۸.....	۱-۲-۶- حسگرهای مقاومتی.....
۱۴۱.....	۲-۲-۶- حسگرهای خازنی.....
۱۴۳.....	۶-۲-۳- حسگرهای القایی.....
۱۴۵.....	۳-۶- رابط الکترونیکی برای داده‌های محاسباتی در سیستم‌های قدرت و ابزار دقیق.....
۱۴۶.....	۱-۳-۶- تقویت کننده های عملیاتی.....
۱۴۶.....	۴-۶- تقویت کننده های آنالوگ برای کسب داده و تحریک سیستم قدرت.....
۱۴۶.....	۱-۴-۶- آشکارساز سطح یا مقایسه کننده.....
۱۴۷.....	۲-۴-۶- تقویت کننده تفاضلی استاندارد برای ابزار دقیق و کنترل.....
۱۴۹.....	۳-۴-۶- تقویت کننده ایزوله شده نوری.....
۱۵۲.....	۴-۴-۶- مبدل $V-I$ تک ورودی و بار شناور.....
۱۵۲.....	۵-۴-۶- مقایسه گر اشمیت تریگر.....
۱۵۳.....	۶-۴-۶- نوسانگر کنترل شده با ولتاژ (VCO).....
۱۵۳.....	۷-۴-۶- شیفت فاز.....
۱۵۶.....	۸-۴-۶- دیود دقیق، یکسوساز دقیق و تقویت کننده قدرمطلق.....
۱۵۸.....	۹-۴-۶- تقویت کننده با بهره بالا و مقاومت های کم مقدار.....
۱۵۹.....	۱۰-۴-۶- تقویت کننده های پوش-پول فیدبک کلاس B.....

۱۵۹.....	۱۱-۴-۶-مولد شکل موج مثلثی
۱۶۱.....	۱۲-۴-۶-مدولاسیون عرض پالس سینوسی (PWM)
۱۶۳.....	۵-۶-پروژه آزمایشگاهی: طراحی یک کنترل کننده PWM با تقویت کننده خطا
۱۶۳.....	۶-۶-مسائل پیشنهادی
۱۷۱.....	فصل هفتم: مدل سازی ماشین های الکتریکی
۱۷۲.....	۱-۷-مقدمه ای بر مدل سازی ماشین های الکتریکی
۱۷۲.....	۲-۷-مدار معادل یک ماشین القایی خطی متصل به شبکه
۱۷۴.....	۳-۷-بلوک PSIM یک موتور القایی خطی متصل به شبکه توزیع
۱۷۶.....	۴-۷-مدل PSIM موتور القایی اشباع شده متصل به شبکه توزیع
۱۷۸.....	۵-۷-ماشین القایی تغذیه دابل متصل به شبکه توزیع
۱۸۲.....	۶-۷-موتور DC تغذیه کننده شفت یک مولد القایی خودتحریک
۱۸۳.....	۷-۷-مدل سازی یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم (PMSM)
۱۸۴.....	۸-۷-مدل سازی یک ترانسفورماتور اشباع شده
۱۸۴.....	۹-۷-پروژه آزمایشگاهی: پاسخ گذرای یک ترانسفورماتور غیرایده آل تک فاز برای ۳ نوع منبع تغذیه: سینوسی، موج مربعی و SPWM
۱۹۵.....	۱۰-۷-مسائل پیشنهادی
۲۰۲.....	فصل هشتم: اینورترهای مستقل و متصل به شبکه
۲۰۳.....	۱-۸-مقدمه
۲۰۷.....	۲-۸-کنترل جریان ثابت
۲۰۸.....	۳-۸-کنترل P-Q ثابت
۲۱۰.....	۴-۸-کنترل P-V ثابت
۲۱۰.....	۵-۸-IEEE 1547 و کنترل های مرتبط
۲۱۳.....	۶-۸-کنترل فریم ساکن رزونانسی P+

۲۱۵.....	۸-۷- حلقه قفل فاز PLL برای همگام‌سازی شبکه.....
۲۱۷.....	۸-۸- پروژه آزمایشگاهی: شبیه‌سازی یک اینورتر متصل به شبکه یا مستقل.....
۲۲۶.....	۸-۹- مسائل پیشنهادی
۲۳۳.....	فصل نهم: مدل‌سازی منابع جایگزین انرژی.....
۲۳۴.....	۹-۱- مدل‌سازی الکتریکی نیروگاه‌های جایگزین.....
۲۳۴.....	۹-۲- مدل‌سازی یک نیروگاه فتوولتائیک.....
۲۳۶.....	۹-۳- مدل‌سازی یک مولد القایی IG.....
۲۳۸.....	۹-۴- مدل‌سازی یک نیروگاه بادی SEIG.....
۲۳۹.....	۹-۵- مدل‌سازی یک نیروگاه بادی DFIG.....
۲۳۹.....	۹-۶- مدل‌سازی یک نیروگاه بادی PMSG.....
۲۴۲.....	۹-۷- مدل‌سازی یک پشته سلول سوختی.....
۲۴۷.....	۹-۸- مدل‌سازی یک بانک باتری اسیدی.....
۲۵۲.....	۹-۹- مدل‌سازی یک نیروگاه مجتمع.....
۲۵۷.....	۹-۱۰- مسائل پیشنهادی.....
۲۶۲.....	فصل دهم: تحلیل کیفیت توان.....
۲۶۳.....	۱۰-۱- مقدمه.....
۲۶۷.....	۱۰-۲- سری فوریه.....
۲۷۴.....	۱۰-۳- تبدیل فوریه گسسته برای ارزیابی هارمونیک سیگنال‌های الکتریکی.....
۲۷۴.....	۱۰-۳-۱- پیاده‌سازی عملی مسائل DFT با استفاده از FFT.....
۲۷۷.....	۱۰-۴- محاسبه توان الکتریکی و ضریب توان برای شرایط اعوجاج.....

۱۰-۵- پروژه آزمایشگاهی: طراحی یک تابع ارزیابی توان الکتریکی مبتنی بر DFT در MATLAB.....	۲۸۰
۱۰-۶- مسائل پیشنهادی	۲۸۸
فصل یازدهم: از شبیه‌سازی در PSIM تا پیاده‌سازی سخت افزاری در DSP.....	۲۹۴
۱۱-۱- مقدمه.....	۲۹۵
۱۱-۲- بررسی اجمالی PSIM.....	۲۹۵
۱۱-۳- از کنترل آنالوگ تا کنترل دیجیتال.....	۲۹۸
۱۱-۴- تولید اتوماتیک کد در PSIM.....	۳۰۶
۱۱-۴-۱- بلوک های جنبی DSP مدل TI F28335.....	۳۰۷
۱۱-۴-۲- افزودن بلوک های جنبی DSP.....	۳۰۹
۱۱-۴-۳- تعریف بلوک های SCI برای پایش و اشکال‌زدایی بلادرنگ.....	۳۱۴
۱۱-۵- شبیه سازی PIL با PSIM.....	۳۱۶
۱۱-۶- نتیجه‌گیری.....	۳۲۰
فصل دوازدهم: روش‌های پردازش دیجیتال به کار رفته در الکترونیک قدرت.....	۳۲۲
۱۲-۱- مقدمه.....	۳۲۳
۱۲-۲- روش های اساسی پردازش دیجیتال.....	۳۲۳
۱۲-۲-۱- محاسبات سیگنال لحظه‌ای و گسسته.....	۳۲۴
۱۲-۲-۲- محاسبه مقدار مشتق و انتگرال.....	۳۲۴
۱۲-۲-۳- فیلتر متوسط متحرک.....	۳۲۶
۱۲-۲-۴- پروژه آزمایشگاهی: محاسبه جریان اکتیو.....	۳۳۱
۱۲-۳- تعیین مولفه بنیادی.....	۳۳۲

۳۳۳	..... IIR فیلتر ۱۲-۳-۱
۳۳۶	..... FIR فیلتر ۱۲-۳-۲
۳۳۸	..... ۱۲-۳-۳- پروژه آزمایشگاهی: محاسبه THD
۳۴۰	..... ۱۲-۴- تعیین مؤلفه‌های توالی فورسکیو
۳۴۳	..... ۱۲-۴-۱- تعیین مؤلفه‌های توالی با استفاده از فیلتر IIR
۳۴۴	..... ۱۲-۴-۲- تعیین مؤلفه توالی با استفاده از فیلتر DCT
۳۴۵	..... ۱۲-۴-۳- پروژه آزمایشگاهی : محاسبه ضرایب توالی منفی و صفر
۳۴۸	..... ۱۲-۵- PLL های فریم مرجع طبیعی
۳۴۸	..... ۱۲-۵-۱- PLL تک‌فاز
۳۴۹	..... ۱۲-۵-۲- PLL سه فاز
۳۵۰	..... ۱۲-۵-۳- پروژه آزمایشگاهی: پیاده‌سازی PLL تک‌فاز
۳۵۴	..... ۱۲-۵-۴- پروژه آزمایشگاهی: شناساگر موج بنیادی مبتنی بر PLL
۳۵۵	..... ۱۲-۵-۶- روش های MPPT
۳۵۸	..... ۱۲-۶-۱- آشفتگی و مشاهده
۳۵۹	..... ۱۲-۶-۲- هدایت افزایشی
۳۶۱	..... ۱۲-۶-۳- روش بتا
۳۶۱	..... ۱۲-۶-۴- پروژه آزمایشگاهی: پیاده‌سازی روش IC
۳۶۳	..... ۱۲-۷- شناسایی جزیره‌ای شدن
۳۶۴	..... ۱۲-۷-۱- پروژه آزمایشگاهی: شناسایی جزیره‌ای شدن پسیو بر اساس IEEE Std. 1547
۳۶۷	..... ۱۲-۸- مسائل پیشنهادی

فصل اول

مقدمه‌ای بر شبیه‌سازی در مهندسی برق

تحلیل مبتنی بر مدل سازی نظری، فرایندی است که در آن، مدلی بر اساس قوانین طبیعی و منطقی ایجاد می گردد و این کار عموماً با بهره گیری از ریاضیات، فیزیک و مهندسی و در آغاز کار با مفروضات ساده شده در مورد فرایندهایشان و با هدف یافتن یک مدل ورودی/خروجی انجام می شود. روش ها و فرمول بندی های زیر، معمولاً در تأیید یک مدل نظری یا آزمایشگاهی به کار می روند:

۱. معادلات تعادل برای اجرام، انرژی ها و ضربه های ذخیره شده

۲. معادلات ترکیبی فیزیکی-شیمیایی

۳. معادلات پدیده شناختی فرایندهای برگشت ناپذیر (رسانایی گرمایی، دیفیوژن و واکنش شیمیایی)

۴. معادلات تعادل آنتروپی، در صورتی که چندین فرایند برگشت ناپذیر وابسته به هم باشند.

۵. معادلات اتصال که توصیف کننده اتصال متقابل بین عناصر فرایند هستند.

با استفاده از چنین اصول فرمول بندی، می توان یک سیستم را بر حسب معادلات دیفرانسیل عادی یا معادلات جبری آن ها شناخت و سپس می تواند یک ابزار فیزیکی یا شبیه سازی رایانه ای یا نمونه سازی ایجاد گردد تا از چنین معادلاتی پیروی نماید. سیستم فیزیکی با مقادیر اولیه مناسب، مقداردهی می شود و بسط آن ها در طول زمان از معادلات دیفرانسیلی تبعیت می کند.

انتگرال گیرها و تولید تابع می تواند شبیه سازی یک معادله دیفرانسیلی عادی یا ODE را انجام دهد. این مطلب در سال ۱۹۴۷ توسط راگازینی^۱ مطرح شد که می توان توابع پیوسته چند متغیره را با ترکیبی از ضرایب عددی، توابع عددی و مشتقات زمانی شان بیان کرد. ابتدا باید متغیرهای حالت مناسب را بیابیم، یعنی متغیرهایی که مسئول ذخیره انرژی هستند. معمولاً این متغیرها در معادلات دیفرانسیلی عادی به شکل دیفرانسیلی ظاهر می شوند.

شبیه سازی های متعدد بر پایه رایانه، وابسته به اصول محاسبات آنالوگ هستند که در آن، یک معادله دیفرانسیلی همچون معادله ۱-۱ باید بر حسب عملیات بنیادی چون انتگرال، جمع، ضرب و تابع سازی بیان شود. مدارات رایانه های آنالوگ قدیمی به مقیاس بندی متغیرها نیاز داشتند اما در رایانه های مدرن، اعداد با ممیزهای شناور^۲، نشان دهنده متغیرها هستند و نیازی به مقیاس گذاری نیست. دقت بالاتر، انعطاف پذیری در اصلاح، پایداری بهتر، گزارش امکانات و هزینه های کمتر مزایای اصلی پردازش دیجیتال هستند. محاسبات آنالوگ ممکن است مزیتی در پردازش داده سرعت بالای برخط داشته

باشد برای مثال، ولتاژ روی یک مقاومت، پاسخ آنی دارد. یک تابع مشابه آنچه در معادله (۱-۱) نشان داده شده است، برای نمایش محاسبات مورد نیاز، به چندین اتصال داخلی نیاز دارد.

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x) \quad (1-1)$$

برای حل معادله دیفرانسیلی، استفاده از روش‌ها و الگوریتم‌های پاسخ عددی ضروری است که در رایانه‌های دیجیتال مورد استفاده قرار می‌گیرد. روش‌های زیادی برای یافتن پاسخ‌های عددی تقریبی برای معادلات دیفرانسیل عادی از جمله موردی که در معادله (۱-۱) بیان شد، وجود دارد. روش‌ها بر پایه جایگزینی معادلات دیفرانسیل با یک معادله تفاضلی نهاده شده‌اند. روش اویلر^۱ بر پایه تقریب مشتق با تفاضل درجه اول بنیان نهاده شده است اما روش‌های مؤثرتری چون رانگ-کوتا^۲ و چندگامی^۳ نیز وجود دارند. این روش‌ها در سال ۱۹۶۰ زمانی که شبیه‌سازهای دیجیتالی ظهور کردند، شناخته شده بودند؛ اما افزودن چندین بخش کمکی، آن‌ها را در حل تقریب‌های تفاضلی بهتر و پایدارتر کرد؛ برای مثال، تنظیم اتوماتیک طول پله، بخش کمکی بسیار مهمی بود. مدل با پایه ریاضی بیشتر برای سیستم‌های دینامیکی، می‌تواند مبتنی بر معادلات جبری-تفاضلی^۴ یا DAE باشد که ترکیبی از معادلات جبری و تفاضلی است، چنان که در معادله (۲-۱) نمایش داده شده است:

$$g(t, x, \dot{x}) = 0 \quad (1-2)$$

همواره تبدیل یک معادله به یک ODE ممکن نیست، زیرا امکان دارد ژاکوبین $\frac{\partial g}{\partial x}$ وارون‌پذیر نباشد. روش‌های عددی برای DAEها در دهه ۱۹۷۰ میلادی پدیدار شد، اما تا به امروز نیز الگوریتم‌های DAE به خوبی معادلات تفاضلی عادی، توسعه نیافته‌اند. اکثر شبیه‌سازها و نمونه‌سازهای قابل اطمینان، بر پایه روش‌های عددی ODEها می‌باشند؛ بنابراین DAE اساساً یک کاوش ریاضی است و معمولاً مسائل فیزیک و مهندسی با بهره‌گیری از ODEها مدل می‌شوند.

زمانی که یک سیستم بر اساس DAE فرمول‌بندی می‌شود، معمولاً مشتقات به‌وضوح بیان نمی‌شوند. به‌علاوه، برخی مشتقات متغیرهای وابسته ممکن است در معادلات ظاهر نشوند. یک سیستم DAE می‌تواند با مشتق‌گیری نسبت به متغیر مستقل، به سیستم ODE تبدیل گردد. شاخص یک DAE.

^۱ Euler
^۲ Runge-Kutta

^۳ Multistep
^۴ DAE

در واقع، تعداد دفعات مورد نیاز برای مشتق‌گیری از آن است تا به یک ODE تبدیل گردد. حتی اگر مشتق‌گیری ممکن باشد، عموماً از آن به عنوان یک روش محاسباتی استفاده نمی‌شود، زیرا ویژگی‌های DAE اصلی، اغلب در شبیه‌سازی‌های عددی معادلات مشتق‌گرفته‌شده از بین می‌روند.

فرض کنید یک سیستم خطی با معادله جبری مشابه آنچه در معادله (۱-۳) است، تعریف می‌شود:

$$AX = B \quad (1-3)$$

اگر A یک ماتریس $m * n$ باشد، یک پاسخ عددی، سناریوهای محتمل زیر را خواهد داشت:

- $m = n$ یک سیستم مربعی است و با شرط آن که هیچ ردیف یا ستونی به طور خطی به هم وابسته نباشند، می‌تواند پاسخ یکتا داشته باشد. این معمولاً یک مسئله عددی ماتریس معکوس است. وقتی A نامشخص است، مسیره‌ی ورودی-خروجی سیستم‌های بزرگ قابل توجه است و داده‌های تجربی، تعریف ماتریس A را مثلاً با شیوه‌های کاهش گرادیان^۱ برای شناسایی سیستم تأیید خواهند کرد.

- $m > n$ یک سیستم فرامعین^۲ (یا فرامشخص^۳) است و حداقل یک پاسخ قابل تعریف است. سیستم‌های فرامعین معمولاً با داده‌های تجربی برازش منحنی^۴ می‌شوند و شیوه حداقل مربعات^۵ برای کمینه‌کردن مجموع مربعات انحراف داده از مدل، روش مناسبی است.

- $m < n$ یک سیستم فرومعین^۶ است که یک پاسخ صفر^۷ با بیشترین مؤلفه‌های غیرصفر m می‌تواند تعریف شود. سیستم‌های نامعین شامل معادلات ناشناخته بیشتری هستند در نتیجه پاسخ هیچ‌گاه یکتا نیست. جواب خصوصی آن‌ها توسط اصطلاحاً فاکتورگیری QR و با شیوه ستون محورگیری^۸ محاسبه می‌شود. این نوع مسئله احتمالاً محدودیت‌های بیشتری دارد و روش شناسی^۹ آن اصطلاحاً برنامه‌نویسی خطی خواهد بود.

در این کتاب، ما بر کاربردهای ODE، به طور خاص در فرمت فضای حالت آن‌ها برای مدل‌سازی سیستم‌های انرژی و الکترونیک قدرت تأکید می‌کنیم. سپس می‌توانیم روی دینامیک^{۱۰} و پاسخ گذرای آن‌ها مطالعه کنیم یا از سیستم‌های جبری خطی برای درک پاسخ ایستا^{۱۱} یا حالت پایدار چنین

method ۱ gradient descent
۲ overdetermined
۳ overidentified
۴ curve fitting

least square method ۵
۶ underdetermined
۷ trivial solution
method ۸ column pivoting

۹ methodology
۱۰ dynamic response
۱۱ static response

سیستم‌هایی بهره ببریم. روش اتخاذشده در این کتاب برای درس کارشناسی در ترم‌های بالاتر یا سطح تحصیلات تکمیلی در سال اول مناسب است. سیستم‌ها بر پایه معادلات دیفرانسیلی ایجاد شده و نمونه‌های کاربردی شبیه‌سازی شده است که بر مصارف رایج مدار الکتریکی، تبدیل انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر، اتصالات تولید پراکنده، الکترونیک قدرت، سیستم‌های قدرت و مسائل کیفیت توان تمرکز نموده‌اند. خطی‌سازی سیستم‌ها بر پایه مدل متوسط و استفاده از بسط سری تیلور^۱ خواهد بود. روش‌های بسط فوریه برای فرضیات کیفیت توان بسط داده شده‌اند که مستلزم درک تبدیل فوریه گسسته، تبدیل فوریه سریع و روش‌های موجک^۲ است. از نرم‌افزار MATLAB جهت برنامه‌نویسی، حل برخی از الگوریتم‌های عددی و رسم نمودار استفاده می‌شود. SIMULINK جهت مدل‌سازی بر پایه بلوک دیاگرام به کار گرفته شده است. مدل‌سازی مبتنی بر مدار الکتریکی با استفاده بخش جعبه ابزار سیستم‌های قدرت^۳ نرم‌افزار MATLAB همچنین شبیه‌ساز مدار PSIM تحلیل می‌شود.

الگوی محاسبات آنالوگ نیاز به مدل‌های با وضعیت معین و ارتباط از سمت ورودی به خروجی دارد. این خود نوعی محدودیت است، چرا که بلوک‌ها باید جریان داده یک‌سویه از ورودی به خروجی داشته باشند اما چنین الگویی، اکثر راه‌حل‌ها برای سیستم‌های مهندسی را پشتیبانی می‌کند. نتیجه آن است که ایجاد کتاب‌خانه مدل‌های مبتنی بر فیزیک در زبان‌های بلوک دیاگرامی با جریان داده یا جریان انرژی دوسویه مشکل خواهد بود. الگوهای پیشرفته دیگری جهت شبیه‌سازی دامنه چندفیزیکی^۴ در برنامه‌نویسی شیء‌گرا^۵ با استفاده از نرم‌افزاری برای ارزیابی سیستم‌های دیفرانسیلی-جبری در مدل‌سازی غیرعالی با معادلات ریاضی وجود دارند. چنین شیوه شیء‌گرایی استفاده دوباره از دانش مدل‌سازی را تسهیل می‌کند. با این حال، این کتاب روی چنین شبیه‌سازی‌های رایانه‌ای ترکیبی پیشرفته‌ای تمرکز نمی‌کند. هدف این کتاب، پشتیبانی از آزمایشگاه مبتنی بر رایانه جهت الکترونیک قدرت، سیستم‌های قدرت، تولید پراکنده و انرژی جایگزین است؛ همچنین کتابی خودخوان جهت افرادی است که پیش‌زمینه‌ای در مهندسی برق قدرت دارند و علاقه‌مند به کار بستن ابزارهای ریاضی و مهندسی برای مدل‌سازی، شبیه‌سازی و طراحی کنترل سیستم‌های انرژی و الکترونیک قدرت می‌باشند. ترتیب فصل‌ها از پیچیدگی تدریجی تبعیت می‌کند اما امکان تغییر یا حذف محتوا برای رسیدن به بهترین تناسب در ترتیبی که ترکیبی از موضوعات بنیادی (الکترونیک قدرت، سیستم‌های قدرت،

۱ Taylor
۲ wavelet

Power ۳ Systems Toolbox
۴ Multiphysics
۵ object-oriented

تولید پراکنده و انرژی تجدیدپذیر) باشد، وجود دارد. در اغلب فصول، روی یک پروژه آزمایشگاهی به عنوان یک نمونه تمرکز شده است اما برخی فصل‌ها دارای استدلال بیشتر با تشریح کاربردی چگونگی مدل‌سازی انواع مختلف سیستم‌های مهندسی برق می‌باشند.

این کتاب از روش استراتژی آموزش مبتنی بر مسئله و از برخی روش‌شناسی‌های آموزش مبتنی بر پروژه، پیروی می‌کند. هر فصل مقدمه‌ای کوتاه در زمینه نظری، توصیف مسائل حل‌شده و اهداف حاصله دارد. بلوک دیاگرام‌ها، مدارهای الکتریکی، تحلیل ریاضی یا کدهای رایانه‌ای بحث شده‌اند. راه حلی برای مسائل یا روشی برای پروژه‌های پیشنهادی ارائه شده است. هر فصل به خواننده در درک تئوری، مدل‌سازی و موضوعات محاسباتی که در فصل مطرح شده با پیشنهادهایی برای مطالعات بیشتر، کار روی مسائل کاربردی و راهنمایی برخی کارهای تجربی کمک می‌کند.

۱-۱- اصول بنیادی مدل‌سازی مبتنی بر فضای حالت

اکثر سیستم‌های الکتریکی شامل شبکه یکپارچه خطی دارای ویژگی علی هستند. این سیستم‌ها را می‌توان به فرم فضای حالت به شکل ذیل بیان کرد:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (۱-۴)$$

$$y(t) = Cx(t) + Du(t) \quad (۱-۵)$$

این دستگاه معادلات دیفرانسیل درجه اول به عنوان معادله فضای حالت سیستم تعریف می‌شود که $x(t)$ بردار حالت، $u(t)$ بردار ورودی و $y(t)$ خروجی است. معادله دوم، معادله خروجی نامیده می‌شود. خروجی، ترکیبی خطی از حالات و ورودی‌ها در نظر گرفته می‌شود. ماتریس A ، ماتریس حالت نامیده می‌شود، ماتریس B ، ماتریس ورودی، ماتریس C ، ماتریس ترکیب حالات شرکت‌کننده در خروجی و D ماتریس گذار مستقیم^۱ می‌باشد. یک مزیت فضای حالت، مناسب بودن برای مدل‌سازی مبتنی بر ساختار آنالوگ یا دیجیتال، روش کنترلی یا روابط ریاضی است. علاوه بر این، روش فضای حالت می‌تواند به سیستم‌های غیرخطی نیز تعمیم داده شود. معادلات حالت می‌تواند از یک معادله دیفرانسیل درجه بالا مرتبه n ام و گاهی نیز از مدل سیستم با تشخیص متغیرهای حالت مناسب (معمولاً

^۱ direct transition matrix

متغیرهای مرتبط با ذخیره انرژی در سیستم) به دست آید. فرض کنید مدل دستگاه خطی درجه n ام با معادله دیفرانسیل زیر توصیف شده است:

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = u(t) \quad (1-6)$$

که $y(t)$ خروجی دستگاه و $u(t)$ ورودی دستگاه است. مدل حالت برای این سیستم یکتا نیست و فرمول، وابسته به انتخاب دستگاه متغیرهای حالت است. به منظور تبدیل این معادله دیفرانسیل درجه بالا به فضای حالت، می‌توانیم دستگاه متغیرهای حالت (به عنوان متغیرهای فاز) را چنین تعریف کنیم:

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = \ddot{y}, \dots, x_n = y^{n-1} \quad (1-7)$$

با مشتق‌گیری خواهیم داشت: $\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dot{x}_3 = x_4, \dots$ و بعد از بازآرایی معادله ۱، ۶، \dot{x}_n به صورت زیر بیان می‌شود:

$$\dot{x}_n = -a_0 x_1 - a_1 x_2 - \dots - a_{n-1} x_n + u(t) \quad (1-8)$$

که می‌توان آن را در فرم ماتریسی زیر بیان کرد:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \vdots \\ \dot{x}_{n-1} \\ \dot{x}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \vdots & 1 \\ -a_0 & -a_1 & -a_2 & \dots & -a_{n-1} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \quad (1-9)$$

و معادله خروجی چنین خواهد بود:

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ \dots \ 0] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_{n-1} \\ x_n \end{bmatrix} \quad (1-10)$$

برای مثال، معادله دیفرانسیل زیر را در نظر می‌گیریم:

$$2\frac{d^3y}{dt^3} + 4\frac{d^2y}{dt^2} + 6\frac{dy}{dt} + 8y = 10u(t) \quad (1-11)$$

ضریب بالاترین درجه مشتق باید یک باشد، بنابراین:

$$\frac{d^3y}{dt^3} + 2\frac{d^2y}{dt^2} + 3\frac{dy}{dt} + 4y = 5u(t) \quad (1-12)$$

این رابطه یک معادله درجه ۳ است؛ بنابراین می‌توان ۳ متغیر حالت را چنین تعریف نمود:

$$x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = \ddot{y} \quad (1-13)$$

و مشتقات آن‌ها خواهد بود:

$$\dot{x}_1 = x_2, \dot{x}_2 = x_3, \dot{x}_3 = -4x_1 - 3x_2 - 2x_3 + 5u(t) \quad (1-14)$$

در فرم ماتریسی:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -4 & -3 & -2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 5 \end{bmatrix} u(t) \quad (1-15)$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

فرمول فضای حالت، امکان پیاده‌سازی با حل‌کننده‌های ODE^۱ را می‌دهد. (که می‌تواند توسط MATLAB محاسبه شود) و از تعریف یک بلوک دیاگرام برای شبیه‌سازهای مدل‌سازی سیگنال پشتیبانی می‌کند. (از جمله SIMULINK)

۲-۱- مثالی از مدل سازی یک شبکه الکتریکی

متغیرهای حالت مستقیماً به المان‌های ذخیره انرژی یک سیستم مرتبط می‌شوند و ODE ها از تحلیل گره یا مش حاصل می‌شوند. با این حال، تعداد متغیرهای حالت مستقل، بستگی به این دارد که هیچ حلقه‌ای شامل خازن‌ها و منابع ولتاژ و هیچ کاتستی شامل سلف‌ها و منابع جریان نباشد. عموماً اگر n_L و خازن و ولتاژ منابع شامل حلقه n_C کاتست شامل سلف و منابع جریان باشند، تعداد متغیرهای حالت برابر است با:

$$n = e_L + e_C - n_C - n_L \quad (1-17)$$

که

e_L تعداد سلف

e_C تعداد خازن

n_C تعداد حلقه‌های خازنی و منابع ولتاژ

n_L تعداد کاتست‌های سلفی و منابع جریان

یک مدار الکتریکی در نظر بگیرید، چنان که در شکل (۱-۱) نمایش داده شده است، معادله توصیف‌کننده مدار را (با استفاده از تونن^۱) حل کنید و فرمول فضای حالت را بیابید.

با تعریف جریان سلف و ولتاژ دو سر خازن‌ها به عنوان متغیرهای حالت، سرانجام باید به معادلات درجه اولی دست یابیم که $\frac{di_L}{dt}$ ، $\frac{dv_{c_2}}{dt}$ و $\frac{dv_{c_1}}{dt}$ در سمت چپ معادلاتشان، تنها شده‌اند. ابتدا معادلات دو گره شامل خازن‌ها و معادله حلقه شامل سلف را بنویسید. متغیرهای حالت i_L ، v_{c_1} و v_{c_2} هستند. معادلات KCL چنین می‌باشند:

$$0.25 \frac{dv_{c_1}}{dt} + i_L + \frac{v_{c_1} - v_i}{4} = 0 \Rightarrow \dot{v}_{c_1} = -v_{c_1} - 4i_L + v_i \quad (1-18)$$

$$0.5 \frac{dv_{c_2}}{dt} - i_L + \frac{v_{c_2}}{1} - i_s = 0 \Rightarrow \dot{v}_{c_2} = 2i_L - 2v_{c_2} + 2i_s \quad (1-19)$$