روش‌های کنترلی در سیستم‌های الکترونیک قدرت

(تحلیل مدار)

مؤلفین:

مهندس حسین فروزانی

مهندس حنیف فروزانی

فهرست مطالب

فصل اول

آشنایی با الکترونیک قدرت و کاربردهای آن ۱۴

۱-۱ الکترونیک قدرت چیست؟ ۱۵

۱-۲ دسته‌بندی مبدل‌های سوئچینگ توان ۱۶

۱-۲-۱ مبدل‌های توان DC به DC - برش‌دهنده‌ها ۱۷

۱-۲-۲ مبدل‌های AC به DC- یکسوسازها ۱۹

۱-۲-۳ مبدل‌های DC به AC - اینورترها ۲۳

۱-۲-۴ مبدل‌های AC به AC، سیکلوکانورترها و کنترل‌کننده‌های ولتاژ ۲۵

۱-۳ تعریف بازده و تأثیرات آن در سیستم‌های الکترونیک قدرت ۳۰

۱-۴ اولین مثال از یک مبدل برش‌دهنده ۳۳

۱-۴-۱ مدار اول: مدار تقسیم ولتاژ مقاومتی ۳۳

۱-۴-۲ مدار دوم: مدار ترانزیستوری به همراه درایور حلقه بسته‌ی بیس ۳۴

۱-۵ مبدل کاهنده‌ی سوئیچینگ ۳۵

۱-۵-۱ طرح اولیه مدار مبدل کاهنده سوئیچینگ ۳۵

۱-۵-۲ نقش فیلتر LC در مدار مبدل کاهنده‌ی سوئیچینگ ۳۷

۱-۵-۳ تکمیل مدار مبدل کاهنده با حلقه‌ی فیدبک ۳۹

۱-۶ مروری بر مباحث مطرح شده در این فصل ۳۹

فصل دوم

شبیه‌سازی مداری در LTspice ۴۱

۲-۱ معرفی مختصر SPICE ۴۲

۲-۱-۱ نسخه‌های تجاری SPICE ۴۲

۲-۲ بررسی اجمالی ویژگی‌های نرم‌افزار LTspice ۴۳
۲-۳ شروع کار در نرم‌افزار LTspice ۴۵
۲-۳-۱ تحلیل نقطه‌ی کار DC ۴۸
۲-۴ مثالی از تحلیل حالت گذرا در LTspice ۵۱
۲-۴-۱ اعمال پالس کلیدزنی به کمک گزینه‌ی Pulse در LTspice ۵۲
۲-۴-۲ ابزار تحلیل حالت گذرا در LTspice ۵۳
۲-۴-۳ خروجی‌های برنامه‌ی تحلیل حالت گذرا ۵۵
۲-۴-۴ نحوه‌ی مشاهده‌ی نتایج شبیه‌سازی در نمودار ۵۶
۲-۵ المان‌های مورد نیاز برای مدار کاهنده‌ی سوئیچینگ ۵۸
۲-۵-۱ ماسفتِ IRFS4010 به عنوان سوئیچ قدرت ۵۹
۲-۵-۲ نکات اولیه‌ی درباره‌ی ماسفت‌ها به عنوان سوئیچ‌های قدرت ۶۰
۲-۵-۳ ناحیه‌ی Cut-off یا مود خاموش ماسفت ۶۱
۲-۵-۴ ناحیه‌ی اشباع یا مود روشن ماسفت ۶۱
۲-۵-۵ دیود RF1601NS2D به منظور تکمیل مدار سوئیچینگ ۶۲
۲-۵-۶ بازیابی معکوس در دیود چیست؟ ۶۳
۲-۵-۷ معرفی تراشه‌های تولید موج PWM ۶۴
۲-۵-۸ تنظیم فرکانس و دوره‌ی کار موج PWM ۶۵
۲-۵-۹ ایجاد تنظیمات تراشه‌ی LTC6992-1 در نرم‌افزار LTspice ۶۹
۲-۵-۱۰ استفاده از ابزار محاسباتی آنلاین شرکت Analog Devices ۷۲
۲-۶ معرفی تراشه‌های درایور گیت ماسفت ۷۴
۲-۷ مروری بر مباحث طرح شده در این فصل ۷۵

فصل سوم

تکمیل مدار مبدل سوئیچینگ ۷۶

۳-۱ اصول درایو گیت ماسفت‌های قدرت ۷۷
۳-۲ نقش مدار Bootstrap در درایور گیت High-Side ۷۹

۳-۳ نکات تکمیلی در ارتباط با مدار درایور گیت نیم پل ۸۱
۳-۳-۱ اهمیت بسیار بالای Dead-Time در زمان‌بندی مربوط به کلیدزنی سوئیچ‌های قدرت ۸۲
۳-۳-۲ مدل مداریِ درایور گیت برای بررسی دقیق‌تر عملکرد آن ۸۳
۳-۳-۳ قرار دادن مقاومت در گیت ماسفت HS برای حذف نوسانات ناخواسته ۸۶
۳-۳-۴ تکمیل مدار گیت ماسفت HS با قرار دادن دیود معکوس شانت ۸۸
۳-۳-۵ مبدل کاهنده مبتنی بر مدار درایور گیت نیم پل، سخت یا نرم؟ ۸۹
۳-۴ بررسی دقیق‌تر دیودهای قدرت و اهمیت ماسفت سنکرون ۹۳
۳-۴-۱ معادله‌ی کنترل بار در حالت ماندگار ۹۵
۳-۴-۲ اثبات رابطه‌ی جریان دیود در بایاس مستقیم از رابطه‌ی تراکم بار ۹۶
۳-۴-۳ رابطه‌ی بین جریان بایاس مستقیم با بار اقلیت ذخیره شده در دیود ۹۹
۳-۴-۴ ارتباط معادله‌ی کنترل بار با جریان، ولتاژ و تراکم بار دیود در حالت گذرا ۱۰۱
۳-۴-۵ تحلیل توان مصرف شده در حالت گذرا در دیود ۱۰۵
۳-۵ تلفات توان سوئیچینگ ۱۰۷
۳-۵-۱ محاسبه‌ی تلفات توان در ماسفت با فرض بر ایده‌آل بودن دیود ۱۰۹
۳-۵-۲ بررسی دقیق تلفات ناشی از بازیابی معکوس دیود ۱۱۱
۳-۶ فاکتورِ S در دیودها ۱۱۵
۳-۷ مقایسه‌ی دو دیود فوق سریعِ ISL9R860 و STTH8R06 ۱۱۸
۳-۸ افزایش مقدار I_{rrm} و لزوم استفاده از مدار Snubber ۱۲۱
۳-۹ مروری بر مباحث مطرح شده در این فصل ۱۲۷
فصل چهارم
تحلیل و طراحی مدار اسنابر RC ۱۲۹
۴-۱ مدار اسنابر و تشکیل معادله‌ی دیفرانسیل ولتاژ دو سر دیود ۱۳۰
۴-۱-۱-۱ مدار زیرمیرا $0 < \xi < 1$ ۱۳۴
۴-۱-۱-۲ مدار میرای بحرانی $\xi = 1$ ۱۳۵
۴-۱-۱-۳ مدار فوق بحرانی $\xi > 1$ ۱۳۵

۴-۱-۱-۴ مقایسه‌ی ولتاژ دیود به ازای ضرایب میرایی متفاوت..... ۱۳۶
۴-۲ یافتن مقدار ماکزیمم شیب نمودار ولتاژ دیود dV_D / dt به ازای مقادیر مختلف ζ. ۱۳۷
۴-۳ نمودارهای بر واحد ماکزیمم ولتاژ و ماکزیمم شیب ولتاژ دیود به ازای زتای مختلف ۱۴۰
۴-۴ انتخاب مقادیر مناسب برای خازن و مقاومت اسنابر..... ۱۴۳
۴-۴-۱ فرمول محاسبه‌ی ظرفیت خازن اسنابر ۱۵۰
۴-۴-۲ فرمول محاسبه‌ی مقاومت اسنابر ۱۵۱
۴-۴-۳ اثبات فرمول مقاومت اسنابر به روش تقریب مرتبه‌ی دوم ۱۵۲
۴-۵ حل یک مثال عملی از طراحی گام به گام مدار اسنابر..... ۱۵۵
۴-۵-۱ گام اول: اندازه‌گیری فرکانس نوسانات بدون استفاده از خازن خارجی..... ۱۵۵
۴-۵-۲ گام دوم: اندازه‌گیری فرکانس نوسانات پس از افزودن یک خازن موازی با دیود..... ۱۵۷
۴-۵-۳ گام سوم: محاسبه‌ی ظرفیت خازن پارازیتی و مقدار اندوکتانس پارازیتی و امپدانس مشخصه‌ی مدار ۱۵۸
۴-۵-۴ گام چهارم: انتخاب مقادیر خازن و مقاومت مدار اسنابر ۱۵۹
۴-۵-۵ گام پنجم: محاسبه‌ی توان مصرف شده در مدار اسنابر و انتخاب سایز مقاومت اسنابر ۱۶۰
۴-۶ اثبات رابطه‌ی تلفات توان در مدار اسنابر..... ۱۶۲
۴-۷ تکنیک شرکت Maxim Integrated برای طراحی اسنابر..... ۱۶۴
۴-۸ مروری بر مباحث مطرح شده در این فصل..... ۱۶۶

فصل پنجم

تحلیل و طراحی مدار اسنابر RCD ۱۶۷

۵-۱ معرفی اسنابر RCD و موارد استفاده از آن..... ۱۶۸
۵-۱-۱ مدار اسنابر RCD کلمپ..... ۱۷۱
۵-۱-۲ مدار RCD اسنابر ولتاژ..... ۱۷۱
۵-۲ نیاز به اسنابر RCD کلمپ در یک مبدل Flyback..... ۱۷۳
۵-۲-۱ اصول کاری مبدل Flyback و تفاوت ترانسفورماتور به کار رفته در آن با ترانسفورماتورهای عادی..... ۱۷۵

۵-۲-۵ تبعات ایجاد فاصله‌ی هوایی در هسته‌ی ترانسفورماتورِ Flyback ۱۷۹
۵-۲-۵-۱ کاهش اندوکتانس ترانسفورماتور و راه حل آن ۱۷۹
۵-۲-۵-۲ افزایش اندوکتانس نشتیِ ترانسفورماتور و راه حل آن ۱۸۰
۵-۲-۳ تحلیل مداری مبدلِ Flyback بدون مدار اسنابر ۱۸۵
۵-۳ تفاوت نمودارهای ولتاژ و جریان ماسفت در حالت‌های هدایت پیوسته و ناپیوسته... ۱۸۷
۵-۴ طراحی مدار اسنابرِ RCD کلمپ ۱۹۰
۵-۵ انتخاب مقادیر مقاومت و خازنِ مدار اسنابر RCD کلمپ ۱۹۴
۵-۵-۱ اثبات رابطه‌ی دامنه‌ی ریپل ولتاژ بر حسب سایر پارمترها ۱۹۵
۵-۶ حل یک مثال عملی از طراحی گام به گام مدار اسنابر RCD کلمپ ۱۹۸
۵-۶-۱ گام اول: انتخاب ماسفت بر اساس ولتاژهای ورودی و خروجی ۱۹۸
۵-۶-۲ گام دوم: اندازه‌گیری اندوکتانس نشتی ترانسفورماتورِ Flyback ۱۹۹
۵-۶-۲-۱ استفاده از LCR متر مدل ۸۷۹B و ۸۸۰ ..... ۲۰۱
۵-۶-۳ گام سوم: انتخاب مقدار مقاومت مدار اسنابرِ RCD کلمپ ۲۰۲
۵-۶-۳-۱ محاسبه‌ی توان تلف شده در مقاومت اسنابر ۲۰۲
۵-۶-۴ گام چهارم: انتخاب مقدار خازن مدار اسنابرِ RCD کلمپ ۲۰۳
۵-۷ جایگزینی مقاومت و خازن با یک دیود زنر برای کلمپ ولتاژ ۲۰۴
۵-۸ مروری بر مباحث مطرح شده در این فصل ۲۰۴

فصل ششم

تحلیل حالت ماندگار مبدل‌ها ۲۰۶

۶-۱ انگیزه‌ی عملی از تحلیل‌های حالت ماندگار ۲۰۷
۶-۲ تقریب ریپل کوچک و تعادل ولت-ثانیه‌ی در القاگر ۲۰۹
۶-۲-۱ ولتاژ و جریان القاگر مبدل توان کاهنده در بازه‌ی زمانی روشن بودن سوئیچ اصلی ۲۱۰
۶-۲-۲ ولتاژ و جریان القاگر مبدل توان کاهنده در بازه‌ی زمانی خاموش بودن سوئیچ اصلی . ۲۱۱
۶-۲-۳ شکل موج جریان و ولتاژ القاگر در یک دوره‌ی تناوب ۲۱۲
۶-۲-۴ اصل تعادلِ ولت-ثانیه در القاگر ۲۱۴

۶-۳ اصل تعادل آمپر-ثانیه (تعادل بار) در خازن..... ۲۱۵

۶-۴ تحلیل حالت ماندگار مبدل افزاینده Boost..... ۲۱۶

۶-۵ تعادل ولت-ثانیه و آمپر-ثانیه در مبدل افزاینده Boost..... ۲۱۸

۶-۵-۱ یافتن نسبت تبدیل مبدل Boost..... ۲۱۹

۶-۵-۲ مؤلفه‌ی جریان DC و رابطه‌ی آن با دوره‌ی کار..... ۲۲۰

۶-۶ محاسبه‌ی ریپل جریان و اندوکتانس در القاگر مبدل افزاینده..... ۲۲۱

۶-۶-۱ مقاومت ESR در مدل واقعی خازن..... ۲۲۳

۶-۶-۲ فاکتور اتلاف خازن‌ها -DF در فرکانس‌های سوئیچینگ بالا..... ۲۲۶

۶-۶-۳ روش محاسبه و اندازه‌گیری مقاومت ESR..... ۲۲۸

۶-۷ تحلیل حالت ماندگار مبدل چوک Ćuk..... ۲۳۰

۶-۷-۱ معادلات حاکم بر مدار مبدل Ćuk در بازه‌ی زمانی روشن بودن سوئیچ اصلی..... ۲۳۱

۶-۷-۲ معادلات حاکم بر مدار مبدل Ćuk در بازه‌ی زمانی خاموش بودن سوئیچ اصلی..... ۲۳۲

۶-۸ تعادل ولت-ثانیه و تعادل آمپر-ثانیه در مبدل توان Ćuk..... ۲۳۳

۶-۸-۱ به کارگیری اصل تعادل ولت-ثانیه برای القاگرهای مبدل Ćuk..... ۲۳۳

۶-۸-۲ به کارگیری اصل تعادل آمپر-ثانیه برای خازن‌های مبدل Ćuk..... ۲۳۴

۶-۸-۳ یافتن مقادیر ماندگار مبدل Ćuk و نسبت تبدیل آن..... ۲۳۶

۶-۹ محسابه‌ی مقادیر ریپل جریان و ولتاژ..... ۲۳۷

۶-۱۰ مروری بر مباحث مطرح شده در این فصل..... ۲۳۹

مراجع..... ۲۴۱

مراجع

برخی از مراجع مورد استفاده در این کتاب به شرح زیر است:

Muhammad Rashid-POWER ELECTRONICS HANDBOOK, Third Edition-Butterworth-Heinemann

Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins - Power Electronics_ Converters, Applications, and Design, Third edition

Robert W. Erickson Dragan Maksimovic - Fundamentals of Power Electronics (Second Edition)

Adel S. Sedra, Kenneth C. Smith-Microelectronic Circuits-Oxford University Press

Ben G. Streetman_ Sanjay Kumar Banerjee - Solid State Electronic Devices_ Global Edition (2016, Pearson Education Limited)

Simon Ang and Alejandro Oliva - Power-Switching Converters, Second Edition (Electrical Engineering and Electronics) (CRC Press)

P. C. Sen - Principles of electric machines and power electronics, Second Edition (Wiley Press)

همچنین محتوای سایت برخی از شرکت‌های زیر از مراجع مجازی مورد استفاده در نگارش این کتاب می‌باشد:

www.ti.com
www.analog.com
www.infineon.com
www.st.com
www.rohm.com
www.toshiba.com
www.onsemi.com
www.irf.com