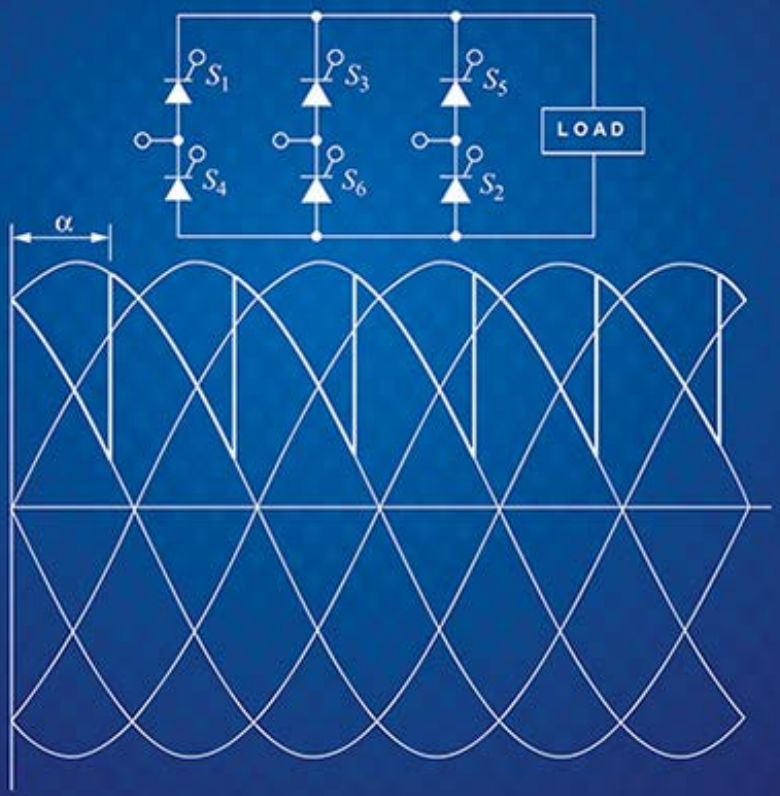
www.takbook.com

ترجمه کتاب

الکترونیک قدرت

دنیل هارت

همراه با ۱۰۰ مثال حل شده و سی دی شبیه سازی



مترجم

حسن مسعودی

www.takbook.com

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه ۱

۱-۱- الکترونیک قدرت ۱
۱-۲- طبقه‌بندی مبدل‌ها ۱
۱-۳- مفاهیم الکترونیک قدرت ۳
۱-۴- کلیدهای الکترونیکی ۶
دیود ۶
تریستور ۷
ترانزیستور ۹
۱-۵- انتخاب کلید ۱۱
۱-۶- نرم‌افزار Spice, PSpice, Capture ۱۳
۱-۷- کلیدها در PSpice ۱۴
کلید کنترل‌شده با ولتاژ ۱۴
ترانزیستورها ۱۷
دیودها ۱۸
تریستورها (SCRs) ۱۸
مشکل همگرایی در PSpice ۱۹
مسائل ۲۰

فصل دوم: محاسبات توان ۲۱

۲-۱- مقدمه ۲۱
۲-۲- توان و انرژی ۲۱
توان لحظه‌ای ۲۱
انرژی ۲۲

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

توان متوسط ۲۲
۲-۳- سلف و خازن ۲۵
۲-۴- بازیابی انرژی ۲۷
۲-۵- مقدار مؤثر: RMS ۳۳
۲-۶- توان ظاهری و ضریب توان ۴۱
توان ظاهری S ۴۱
ضریب توان ۴۱
۲-۷- محاسبات توان برای مدارهای AC سینوسی ۴۱
۲-۸- محاسبات توان برای شکل موج‌های متناوب غیر سینوسی ۴۳
سری فوریه ۴۳
توان متوسط ۴۴
منبع غیرسینوسی و بار خطی ۴۵
منبع سینوسی و بار غیرخطی ۴۶
۲-۹- محاسبات توان با استفاده از PSpice ۴۹
۲-۱۰- خلاصه ۵۶
مسائل ۵۷

www.powerbooks.ir

فصل سوم: یکسوساز نیم‌موج ۶۳

۳-۱- مقدمه ۶۳
۳-۲- بار مقاومتی ۶۳
ایجاد یک مؤلفه DC توسط کلید الکترونیکی ۶۳
۳-۳- بار مقاومتی- سلفی ۶۵
۳-۴- شبیه‌سازی با PSpice ۷۰
استفاده از نرم‌افزار شبیه‌سازی برای محاسبات عددی ۷۰
۳-۵- بار منبع-RL ۷۴
تغذیه توان منبع DC از یک منبع AC ۷۴
۳-۶- بار منبع سلفی ۷۷

www.takbook.com

استفاده از سلف جهت محدود کردن جریان ۷۷
۳-۷- دیود هرزگرد ۷۹
ایجاد جریان DC ۷۹
کاهش هارمونیک‌های جریان بار ۸۴
۳-۸- یکسوساز نیم‌موج با فیلتر خازن ۸۶
ایجاد ولتاژ DC از منبع AC ۸۶
۳-۹- یکسوساز نیم‌موج کنترل‌شده ۹۲
بار مقاومتی ۹۲
بار RL ۹۴
بار منبع-RL ۹۷
۳-۱۰- راه‌حل‌های PSpice برای یکسوسازهای کنترل‌شده ۹۹
مدل‌سازی SCR در PSpice ۹۹
۳-۱۱- کموتاسیون ۱۰۱
تأثیر اندوکتانس منبع ۱۰۱
۳-۱۲- خلاصه ۱۰۳
مسائل ۱۰۴

فصل چهارم: یکسوساز تمام‌موج ۱۱۱

۴-۱- مقدمه ۱۱۱
۴-۲- یکسوساز تمام‌موج تک فاز ۱۱۱
یکسوساز پل ۱۱۱
یکسوساز با ترانس سر وسط ۱۱۳
بار مقاومتی ۱۱۵
بار RL ۱۱۵
هارمونیک‌های منبع ۱۱۸
شبیه‌سازی با PSpice ۱۱۹
بار منبع-RL ۱۲۰

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

خازن فیلتر خروجی ۱۲۳
دو برابر کننده ولتاژ ۱۲۵
فیلتر LC خروجی ۱۲۶
۴-۳- یکسوساز تمام‌موج کنترل‌شده ۱۳۱
بار مقاومتی ۱۳۲
بار RL با جریان ناپیوسته ۱۳۳
بار RL با جریان پیوسته ۱۳۶
شبیه‌سازی یکسوساز تمام پل کنترل‌شده با PSpice ۱۳۹
یکسوساز کنترل‌شده با بار منبع-RL ۱۴۰
عملکرد مبدل تک فاز کنترل‌شده به عنوان اینورتر ۱۴۲
۴-۴- یکسوساز سه فاز ۱۴۴
۴-۵- یکسوساز سه فاز کنترل‌شده ۱۴۹
یکسوساز دوازده پالسه ۱۵۱
عملکرد مبدل سه فاز به عنوان اینورتر ۱۵۴
۴-۶- انتقال توان DC ۱۵۶
۴-۷- کموتاسیون: تأثیر اندوکتانس منبع ۱۵۹
یکسوساز پل تک فاز ۱۵۹
یکسوساز پل سه فاز ۱۶۱
۴-۸- خلاصه ۱۶۲
مسائل ۱۶۳

فصل پنجم: کنترل‌کننده‌های ولتاژ AC ۱۷۱

۵-۱- مقدمه ۱۷۱
۵-۲- کنترل‌کننده ولتاژ AC تک فاز ۱۷۱
عملکرد پایه ۱۷۱
کنترل‌کننده تک فاز با بار مقاومتی ۱۷۳
کنترل‌کننده تک فاز با بار RL ۱۷۶

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

شبیه‌سازی کنترل‌کننده ولتاژ AC تک فاز با PSpice ۱۸۰
۵-۳- کنترل‌کننده‌های ولتاژ سه فاز ۱۸۲
اتصال ستاره بار مقاومتی ۱۸۲
اتصال ستاره بار *RL* ۱۸۷
اتصال مثلث بار مقاومتی ۱۸۹
۵-۴- کنترل سرعت موتور القایی ۱۹۱
۵-۵- کنترل استاتیکی توان راکتیو ۱۹۲
۵-۶- خلاصه ۱۹۲
مسائل ۱۹۳

فصل ششم: مبدل‌های DC-DC ۱۹۷

۶-۱- رگولاتورهای ولتاژ خطی ۱۹۷
۶-۲- مبدل سوئیچینگ پایه ۱۹۸
۶-۳- مبدل باک (کاهنده) ۱۹۹
روابط ولتاژ و جریان ۱۹۹
ریپل ولتاژ خروجی ۲۰۴
مقاومت خازن و تأثیر آن بر ریپل خروجی ۲۰۷
یکسوسازی سنکرون برای مبدل باک ۲۰۸
۶-۴- ملاحظات طراحی ۲۰۸
۶-۵- مبدل بوست ۲۱۲
روابط ولتاژ و جریان ۲۱۲
ریپل ولتاژ خروجی ۲۱۶
مقاومت سلف ۲۱۹
۶-۶- مبدل باک- بوست ۲۲۱
روابط ولتاژ و جریان ۲۲۱
ریپل ولتاژ خروجی ۲۲۴
۶-۷- مبدل چوک ۲۲۶

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

۶-۸- مبدل SEPIC ۲۳۰
۶-۹- مبدل‌های چند لایه ۲۳۶
۶-۱۰- کلید غیر ایده‌آل و عملکرد مبدل ۲۳۸
افت ولتاژ کلید ۲۳۸
تلفات کلیدزنی ۲۳۹
۶-۱۱- عملکرد جریان- ناپیوسته ۲۴۰
مبدل باک با جریان ناپیوسته ۲۴۰
مبدل بوست با جریان ناپیوسته ۲۴۳
۶-۱۲- مبدل‌های خازن سوئیچ شده ۲۴۵
مبدل خازن سوئیچ شده افزاینده ۲۴۶
مبدل خازن سوئیچ شده معکوس کننده ۲۴۷
مبدل خازن سوئیچ شده کاهنده ۲۴۸
۶-۱۳- شبیه‌سازی مبدل‌های DC-DC با PSpice ۲۴۹
یک مدل سوئیچینگ PSpice ۲۵۰
مدل مداری متوسط ۲۵۲
۶-۱۴- خلاصه ۲۵۶
مسائل ۲۵۷

فصل هفتم: منابع تغذیه DC ۲۶۳

۷-۱- مقدمه ۲۶۳
۷-۲- مدل‌های ترانس ۲۶۳
۷-۳- مبدل فلای‌بک ۲۶۵
حالت جریان پیوسته ۲۶۵
حالت جریان ناپیوسته در مبدل فلای‌بک ۲۷۲
خلاصه‌ای از عملکرد مبدل فلای‌بک ۲۷۴
۷-۴- مبدل فوروارد ۲۷۴
خلاصه‌ای از عملکرد مبدل فوروارد ۲۸۰
۷-۵- مبدل فوروارد دو کلیده ۲۸۲

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

۷-۶- مبدل پوش پول ۲۸۴
خلاصه‌ای از عملکرد پوش پول ۲۸۷
۷-۷- مبدل‌های DC-DC تمام پل و نیم پل ۲۸۸
۷-۸- مبدل‌های منبع جریانی ۲۹۱
۷-۹- مبدل چند خروجی ۲۹۴
۷-۱۰- انتخاب مبدل ۲۹۵
۷-۱۱- اصلاح ضریب توان ۲۹۶
۷-۱۲- شبیه‌سازی منابع تغذیه DC با PSpice ۲۹۸
۷-۱۳- کنترل منبع تغذیه ۳۰۰
پایداری حلقه کنترل ۳۰۱
آنالیز سیگنال کوچک ۳۰۲
تابع انتقال کلید ۳۰۲
تابع انتقال فیلتر ۳۰۳
تابع انتقال مدولاسیون پهنای پالس ۳۰۴
تقویت کننده خطا نوع ۲ با جبران‌ساز ۳۰۴
طراحی یک جبران‌ساز تقویت‌کننده خطا نوع ۲ ..... ۳۰۸
شبیه‌سازی کنترل فیدبک با PSpice ۳۱۱
جبران‌ساز تقویت‌کننده خطا نوع ۳ ..... ۳۱۳
طراحی یک جبران‌ساز تقویت‌کننده خطا نوع ۳ ..... ۳۱۴
قرار دادن دستی قطب و صفر در تقویت‌کننده نوع ۳ ..... ۳۱۹
۷-۱۴- مدارهای کنترل PWM ۳۱۹
۷-۱۵- فیلتر خط AC ۳۱۹
۷-۱۶- منبع تغذیه DC کامل ۳۲۱
مسائل ۳۲۲

فصل هشتم: اینورتر ۳۲۷

۸-۱- مقدمه ۳۲۷
۸-۲- مبدل تمام پل ۳۲۷

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

۸-۳- اینورتر موج مربعی ۳۲۹
۸-۴- آنالیز سری فوریه ۳۳۳
۸-۵- اعوجاج هارمونیکی کل ۳۳۵
۸-۶- شبیه‌سازی اینورتر موج مربعی با PSpice ۳۳۶
۸-۷- کنترل دامنه و هارمونیک ۳۳۸
۸-۸- اینورتر نیم پل ۳۴۳
۸-۹- اینورترهای چند سطحی ۳۴۴
مبدل‌های چند سطحی با منابع DC مستقل ۳۴۴
برابر کردن متوسط توان منبع با مبادله الگو ۳۴۸
اینورترهای چند سطحی Diode-Clampe ۳۵۰
۸-۱۰- خروجی PWM ۳۵۱
سوئیچینگ دو قطبی ۳۵۳
سوئیچینگ تک قطبی ۳۵۳
۸-۱۱- تعاریف و ملاحظات PWM ۳۵۵
۸-۱۲- هارمونیک‌های PWM ۳۵۷
سوئیچینگ دو قطبی ۳۵۷
سوئیچینگ تک قطبی ۳۶۱
۸-۱۳- تقویت‌کننده‌های صوتی کلاس D ۳۶۲
۸-۱۴- شبیه‌سازی اینورترهای PWM ۳۶۲
PWM دو قطبی ۳۶۲
PWM تک قطبی ۳۶۶
۸-۱۵- اینورترهای سه فاز ۳۶۹
اینورتر شش پله‌ای ۳۶۹
اینورترهای سه فاز PWM ۳۷۲
اینورترهای سه فاز چند سطحی ۳۷۴
۸-۱۶- شبیه‌سازی اینورترهای سه فاز با PSpice ۳۷۵
اینورتر سه فاز شش پله‌ای ۳۷۵
اینورترهای سه فاز PWM ۳۷۶
۸-۱۷- کنترل سرعت موتور القایی ۳۷۶

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

۸-۱۸- خلاصه ۳۷۸
مسائل ۳۷۹

فصل نهم: مبدل‌های رزونانسی ۳۸۳

۹-۱- مقدمه ۳۸۳
۹-۲- یک مبدل سوئیچ رزونانسی: سوئیچینگ جریان صفر ۳۸۳
عملکرد پایه ۳۸۳
ولتاژ خروجی ۳۸۷
۹-۳- یک مبدل سوئیچ رزونانسی: سوئیچینگ ولتاژ صفر ۳۹۰
عملکرد پایه ۳۹۰
ولتاژ خروجی ۳۹۴
۹-۴- اینورتر رزونانسی سری ۳۹۶
تلفات سوئیچینگ ۳۹۸
کنترل دامنه ۳۹۸
۹-۵- مبدل DC-DC رزونانسی سری ۴۰۱
عملکرد پایه ۴۰۱
عملکرد برای $\omega_s < \omega_0$ ۴۰۳
عملکرد برای $\omega_0 < \omega_s < 2\omega_0$ ۴۰۷
عملکرد برای $2\omega_0 < \omega_s$ ۴۰۸
تغییرات مبدل DC-DC رزونانسی سری ۴۰۹
۹-۶- مبدل DC-DC رزونانسی موازی ۴۰۹
۹-۷- مبدل DC-DC سری- موازی ۴۱۲
۹-۸- مقایسه مبدل‌های رزونانسی ۴۱۵
۹-۹- مبدل لینک DC رزونانسی ۴۱۵
۹-۱۰- خلاصه ۴۱۹
مسائل ۴۲۰

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

فصل دهم: مدارهای راه‌انداز، اسنابر و گرماگیر ۴۲۵

۱۰-۱- مقدمه ۴۲۵
۱۰-۲- مدارهای راه‌انداز MOSFET و IGBT ۴۲۵
راه‌اندازهای سمت ضعیف ۴۲۵
راه‌اندازهای سمت قوی ۴۲۹
۱۰-۳- مدارهای راه‌انداز ترانزیستورهای دوقطبی ۴۳۱
۱۰-۴- مدارهای راه‌انداز تریستور ۴۳۴
۱۰-۵- مدارهای اسنابر ترانزیستور ۴۳۵
۱۰-۶- مدارهای اسنابر بازیابی انرژی ۴۴۳
۱۰-۷- مدارهای اسنابر تریستور ۴۴۴
۱۰-۸- گرماگیر و مدیریت حرارتی ۴۴۴
دماهای حالت دائم ۴۴۴
دماهای متغیر با زمان ۴۴۷
۱۰-۹- خلاصه ۴۵۱
مسائل ۴۵۲

پیوست الف: سری فوریه برخی شکل موج‌های رایج ۴۵۵

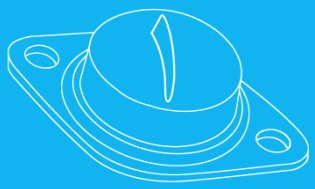
پیوست ب: متوسط‌گیری فضای حالت ۴۵۹

مراجع ۴۶۴

www.powerbooks.ir

www.takbook.com

مقدمه



۱-۱- الکترونیک قدرت

مدارهای الکترونیک قدرت با استفاده از تجهیزات الکترونیکی انرژی الکتریکی را از صورتی به صورت دیگر تبدیل می‌کنند. این مدارها با استفاده از قطعات نیمه‌هادی به عنوان کلید عمل می‌کنند، بنابراین می‌توانند ولتاژ و یا جریان را کنترل و یا اصلاح نمایند. محدوده کاربرد الکترونیک قدرت از تجهیزات توان‌های بالا مانند خطوط انتقال توان DC تا لوازم کاربردی روزانه مانند پیچ‌گوشتی‌های شارژی، منابع تغذیه کامپیوترها، شارژر موبایل و خودروهای برقی را دربرگرفته و از میلی‌وات تا مگاوات را شامل می‌شود. از جمله کاربردهای رایج الکترونیک قدرت تبدیل AC به DC، تبدیل DC به AC، تبدیل یک ولتاژ DC تنظیم نشده به یک ولتاژ DC تنظیم شده و تبدیل یک منبع AC با دامنه و فرکانس مشخص به یک فرکانس و دامنه دیگر است.

طراحی تجهیزات تبدیل توان، بسیاری از رشته‌های مهندسی برق همچون الکترونیک قدرت، تئوری مدار، تئوری کنترل، الکترونیک، الکترومغناطیس، میکروکنترلر (برای کنترل) و انتقال حرارت را فرا می‌گیرد. پیشرفت در توانایی سوئیچینگ نیمه‌هادی‌ها همراه با میل به بهبود راندمان و عملکرد تجهیزات الکتریکی، الکترونیک قدرت را به یک عرصه مهم و رو به رشد در مهندسی برق تبدیل کرده است.

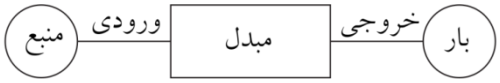
۱-۲- طبقه‌بندی مبدل‌ها

هدف یک مدار الکترونیک قدرت، تطبیق ولتاژ و جریان مورد نیاز بار با توجه به منبع آن است. مدارهای الکترونیک قدرت یک نوع و یا یک سطح از شکل موج ولتاژ و یا جریان را به نوع و یا سطح دیگری تبدیل می‌کنند و از این رو آنها را مبدل[۱] می‌نامند. مبدل‌ها به عنوان یک رابط بین منبع و بار بکار گرفته می‌شوند (شکل ۱-۱).

---

[۱] Converter

www.takbook.com



شکل ۱-۱ ارتباط بین منبع و بار توسط یک مبدل الکترونیک قدرت

با توجه به رابطه میان ورودی و خروجی، مبدل‌ها به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند:

ورودی AC- خروجی DC

مبدل AC-DC یک خروجی DC از یک ورودی AC را تولید می‌کند. در این مبدل توان متوسط از منبع AC به سمت یک بار DC منتقل می‌شود. مبدل AC-DC به عنوان یک یکسوساز[۱] نیز طبقه‌بندی می‌شود. برای مثال یک مبدل AC-DC با تبدیل سیگنال AC به یک سیگنال DC مناسب، مدارهای مجتمع را قادر می‌سازد تا با یک ولتاژ AC ۶۰ هرتز کار کنند.

ورودی DC- خروجی AC

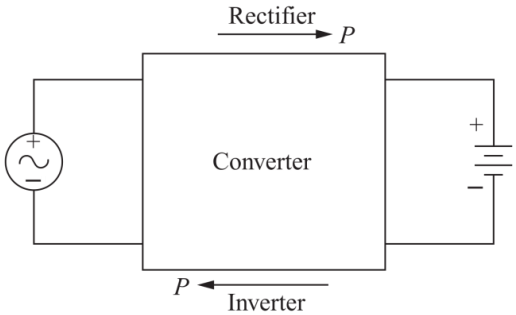
مبدل DC-AC به عنوان یک اینورتر[۲] طبقه‌بندی می‌شود که در آن توان متوسط از سمت DC به سمت AC جریان پیدا می‌کند. از جمله موارد کاربرد اینورتر، تولید یک ولتاژ ۱۲۰ ولت مؤثر ۶۰ هرتز از یک باتری ۱۲ ولت و یا رابط بودن بین منابع مختلف انرژی همچون رابط بین آرایه سلول خورشیدی و یک تجهیز الکترونیکی است.

ورودی DC- خروجی DC

مبدل DC-DC زمانی که یک بار به یک ولتاژ DC یا جریان (اغلب تنظیم شده) نیاز داشته ولی منبع، ولتاژ DC متفاوت و یا تنظیم نشده دارد مفید است، برای مثال ولتاژ ۵ ولت از یک منبع ۱۲ ولت توسط مبدل DC-DC قابل دستیابی است.

ورودی AC- خروجی AC

مبدل AC-AC برای تغییر سطح و یا فرکانس یک سیگنال AC استفاده می‌شود. یک تنظیم کننده نور[۳] معمولی و کنترل سرعت یک موتور القایی مثال‌هایی از کاربرد این نوع مبدل هستند.



شکل ۱-۲ عملکرد اینورتری یا یکسوسازی مبدل بر حسب جهت انتقال توان متوسط

---

[۱] Rectifier
[۲] Inverter
[۳] Light-Dimmer

www.takbook.com

برخی مدارهای مبدل‌ها بسته به مدار و پارامترهای کنترلی، در حالت‌های مختلف می‌توانند کار کنند. برای مثال برخی مدارهای یکسوساز، با اصلاح روش کنترل قطعات نیمه‌هادی می‌توانند به عنوان یک اینورتر عمل کنند. در چنین مواردی جهت و سمت انتقال توان، طبقه‌بندی مبدل را مشخص می‌کند. در شکل ۱-۲ اگر باتری از منبع AC شارژ شود مبدل در طبقه یکسوسازها قرار می‌گیرد و اگر پارامترهای مبدل تغییر کرده، به طوری که باتری به عنوان یک منبع تغذیه برای سیستم AC عمل کند، مبدل به عنوان یک اینورتر طبقه‌بندی می‌شود.

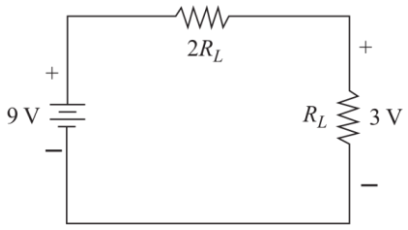
تبدیل توان می‌تواند به عنوان یک فرآیند چند مرحله‌ای که بیش از یک نوع مبدل را شامل می‌شود باشد. برای مثال همان‌طور که در شکل ۱-۳ نشان داده شده‌است یک تبدیل AC-DC-AC می‌تواند ابتدا با تبدیل یک منبع AC به DC و سپس تبدیل سیگنال DC به دست آمده به یک سیگنال AC که دامنه و فرکانس آن متفاوت با منبع AC اصلی است، انجام شود.

شکل ۱-۳ استفاده از دو مبدل در یک فرآیند چند مرحله‌ای

www.powerbooks.ir

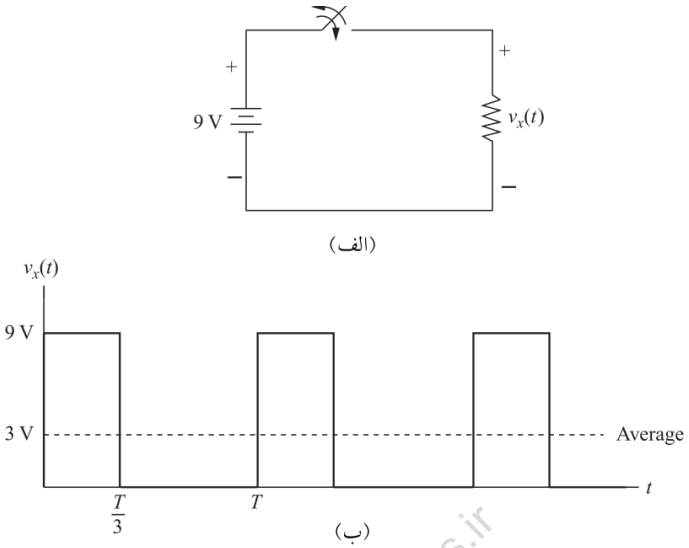
۱-۳- مفاهیم الکترونیک قدرت

برای نشان دادن برخی مفاهیم الکترونیک قدرت مسئله طراحی یک ولتاژ ۳ ولت DC از یک باتری ۹ ولت را در نظر بگیرید که هدف در آن تغذیه یک بار مقاومتی است. همان‌طور که در شکل ۱-۴ نشان داده شده، یک راه‌حل ساده استفاده از تقسیم ولتاژ است به این صورت که برای یک بار مقاومتی R_L، قرار دادن یک مقاومت سری $2R_L$، ولتاژ ۳ ولت روی R_L را نتیجه می‌دهد. اولین مشکل این روش این است که توان جذب شده توسط مقاومت $2R_L$ که به صورت حرارت تلف می شود، دو برابر توان بار است و راندمان مدار را به ۳۳.۳ درصد می‌رساند. مشکل دیگر این است که اگر مقدار مقاومت بار تغییر کند ولتاژ خروجی نیز تغییر خواهد کرد مگر اینکه مقاومت $2R_L$ نیز به تناسب تغییر کند. یک راه‌حل برای حل این مشکل استفاده از ترانزیستور بجای مقاومت $2R_L$ است. ترانزیستور طوری کنترل خواهد شد که ولتاژ روی آن در ۶ ولت باقی بماند و بنابراین خروجی در ۳ ولت تنظیم می‌شود، ولی درعین حال، همچنان مشکل راندمان پایین در این روش باقی خواهد ماند.



شکل ۱-۴ ایجاد ولتاژ ۳ ولت از یک باتری ۹ ولت توسط تقسیم ولتاژ

www.takbook.com



شکل ۱-۵ الف) یک مدار سوئیچینگ ب) شکل موج ولتاژ پالسی

برای رسیدن به راه‌حل‌های طراحی مطلوب، مدار شکل ۱-۵-الف را در نظر بگیرید. در این مدار یک کلید به طور متناوب باز و بسته می‌شود. زمانی که کلید بسته است مدار اتصال کوتاه شده و زمانی که کلید باز است مدار باز است، بنابراین ولتاژ دو سر R_L زمانی که کلید بسته است برابر ۹ ولت و زمانی که کلید باز است برابر صفر می‌گردد و در نتیجه شکل موج ولتاژ دو سر R_L شبیه شکل ۱-۵-ب خواهد شد. مشخص است که این یک ولتاژ DC ثابت نیست ولی اگر کلید یک سوم دوره تناوب بسته شود مقدار متوسط v_x (که با V_x نشان داده شده) برابر یک سوم ولتاژ منبع خواهد بود که این مقدار متوسط از رابطه زیر حساب می‌شود:

$$avg(v_x) = V_x = \frac{1}{T}\int_0^T v_x(t)dt = \frac{1}{T}\int_0^{T/3} 9dt + \frac{1}{T}\int_{T/3}^{T} 0dt = 3V \qquad (۱-۱)$$

با توجه به راندمان مدار، توان لحظه‌ای (به فصل ۲ مراجعه کنید) که کلید جذب می‌کند برابر با حاصل‌ضرب ولتاژ در جریان است. بنابراین زمانی که کلید باز است به‌دلیل صفر بودن جریان، توان جذب شده صفر می‌شود و نیز زمانی که کلید بسته است به خاطر صفر بودن ولتاژ روی آن باز هم توان جذب شده صفر می‌گردد. بنابراین توان جذب شده توسط کلید برای هر دو حالت باز و بسته بودن کلید صفر شده و از همین رو تمام توان منبع به R_L رسیده و راندمان مدار ۱۰۰ درصد می‌شود.

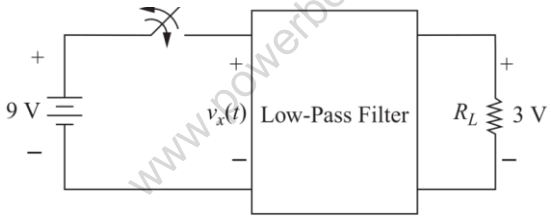
اما این مدار هنوز هدف طراحی که ایجاد یک ولتاژ ۳ ولت بود را انجام نداده است. با این حال شکل موج ولتاژ v_x را می‌توان به صورت یک سری فوریه که دارای یک قسمت DC (مقدار متوسط) به اضافه قسمت‌های سینوسی با فرکانس‌هایی چند برابر فرکانس پالس است، نشان داد. برای تولید ولتاژ ۳ ولت DC، سیگنال v_x به یک فیلتر پایین

www.takbook.com

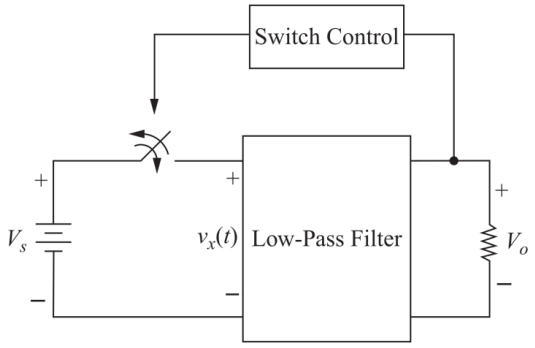
گذر[۱] اعمال می‌شود. یک فیلتر پایین گذر ایده‌آل اجازه عبور مؤلفه DC ولتاژ به خروجی را می‌دهد و قسمت‌های AC را نیز حذف می‌کند و بنابراین مقدار خروجی DC مطلوب ایجاد می‌گردد.

اگر فیلتر بدون تلفات باشد راندمان مبدل ۱۰۰ درصد خواهد شد ولی در عمل فیلتر دارای تلفات است و مقداری از توان را جذب خواهد کرد. به‌علاوه وسایل الکترونیکی که برای کلید استفاده می‌شود ایده‌آل نبوده و دارای تلفات هستند. با این حال راندمان مبدل هنوز به اندازه کافی زیاد (بیشتر از ۹۰ درصد) خواهد بود. مقادیر مورد احتیاج برای اجزای فیلتر با افزایش فرکانس سوئیچینگ می‌تواند کوچک‌تر شود، بنابراین فرکانس سوئیچینگ بالا مطلوب است. فصل ۶ و ۷ فرآیند تبدیل DC–DC را با جزئیات شرح می‌دهد. کلمه "کلید" در این مثال یک وسیله الکترونیکی مانند یک ماسفت[۲] و یا بیش از یک وسیله الکترونیکی است.

فرآیند تبدیل توان معمولاً سیستم کنترل را نیز شامل می‌شود. کمیت‌های خروجی مبدل مانند ولتاژ و جریان اندازه‌گیری شده و پارامترهای عملیاتی طوری تنظیم می‌شوند که خروجی مطلوب حاصل شود. برای مثال اگر باتری ۹ ولت در مثال شکل ۱–۶ به ۶ ولت کاهش یابد، کلید باید ۵۰ درصد زمان خاموش شود تا مقدار متوسط خروجی برای v_x در ۳ ولت باقی بماند. اگر ولتاژ خروجی ۳ ولت نباشد، سیستم فیدبک کنترلی آن را تشخیص داده و بر این اساس همان‌طور که در شکل ۱–۷ نشان داده شده باز و بسته شدن کلید را تنظیم می‌کند.



شکل ۱–۶ عبور متوسط ولتاژ v_x به بار از طریق فیلتر پایین گذر



شکل ۱–۷ تنظیم ولتاژ خروجی در مقدار مطلوب از طریق فیدبک و کنترل کلید

---

[۱] Low-Pass Filter
[۲] MOSFET

www.takbook.com

۱-۴- کلیدهای الکترونیکی

یک کلید الکترونیکی با داشتن دو حالت روشن و خاموش، به طور ایده‌آل یا اتصال کوتاه و یا مدار باز است. به‌خاطر تلفات نسبی کوچک در این قطعات، از آنها در کاربردهای سوئیچینگ استفاده می‌شود. اگر کلید ایده‌آل باشد، توان جذب شده توسط کلید به‌دلیل صفر بودن ولتاژ و یا جریان کلید، صفر می‌شود. قطعات واقعی در حالتی که روشن هستند و نیز زمان انتقال بین حالت‌های روشن و خاموش، مقداری توان جذب می‌کنند ولی با این حال راندمان مدار هنوز به اندازه کافی زیاد است. برخی قطعات الکترونیکی مانند ترانزیستورها می‌توانند در ناحیه فعال که هیچ یک از ولتاژ و جریان صفر نیستند عمل کنند، اما استفاده از این قطعات به عنوان "کلید" در حین فرآیند توان مطلوب است.

تأکید این کتاب بجای کارایی قطعات بر روی عملکرد مدار پایه است. قطعات سوئیچینگ مشخصی که در مدارهای الکترونیک قدرت استفاده می‌شوند به تکنولوژی موجود بستگی دارند. رفتار مدارهای الکترونیک قدرت اغلب تحت تأثیر قطعات واقعی مورد استفاده برای سوئیچینگ قرار نمی‌گیرد بخصوص زمانی که افت ولتاژ روی یک کلیدِ در حال هدایت در مقایسه با ولتاژهای دیگر مدار کوچک باشد. بنابراین قطعات نیمه‌هادی معمولاً به صورت یک کلید ایده‌آل مدل می‌شوند و در نتیجه رفتار مدار می‌تواند مورد تأکید قرار گیرد. زمان عبور از حالت‌ها معمولاً آنی فرض می‌شود اما تأثیر سوئیچینگ غیرایده‌آل بعداً توضیح داده خواهد شد. یک توضیح مختصر در مورد کلیدهای نیمه‌هادی در این بخش داده می‌شود و اطلاعات اضافی مرتبط با مدارهای راه‌انداز[۱] و اسنابر[۲] در فصل ۱۰ خواهد آمد. تکنولوژی کلیدهای الکترونیکی به طور پیوسته در حال تغییر است و رفتار دقیق قطعات پیشرفته را می‌توان در دیگر نگاشته‌ها پیدا کرد.

www.powerbooks.ir

دیود

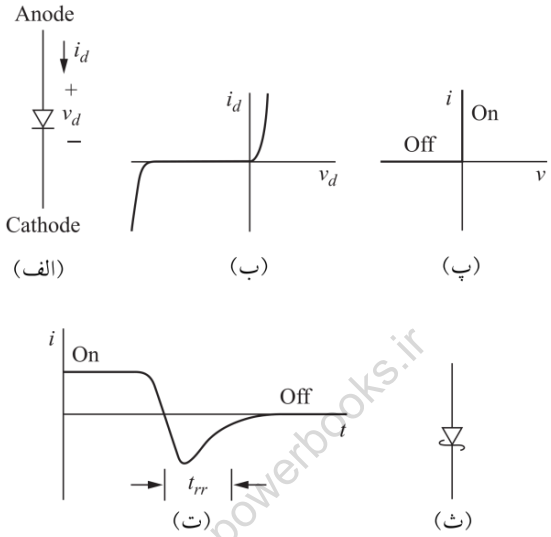
دیود ساده‌ترین کلید الکترونیکی است که غیرقابل کنترل می‌باشد، بدین معنی که حالت روشن و خاموش بودن آن توسط ولتاژها و جریان‌های مدار تعیین می‌شود. دیود زمانی که جریان i_d (شکل ۱-۸-الف) مثبت است به صورت مستقیم بایاس (روشن) شده و زمانی که v_d منفی است به صورت معکوس بایاس (خاموش) می‌گردد. در حالت ایده‌آل زمانی که دیود به صورت مستقیم بایاس شده‌است اتصال کوتاه و زمانی که به صورت معکوس بایاس شده مدار باز می‌باشد. مشخصه جریان- ولتاژ دیود واقعی و ایده‌آل در شکل ۱-۸-ب و ۱-۸-پ نشان داده شده‌است. در این کتاب مشخصه ایده‌آل برای اغلب تحلیل‌ها استفاده می‌شود. مشخصه دینامیکی مهم یک دیود غیرایده‌آل، جریان بازیابی معکوس[۳] است. زمانی که یک دیود خاموش می‌شود، جریان آن کاهش یافته و برای یک لحظه قبل از اینکه صفر شود همان‌طور که در شکل ۱-۸-ت نشان داده شده منفی می‌شود. زمان t_{rr} زمان بازیابی معکوس[۴]

---

[۱] Drive Circuits
[۲] Snubber Circuits
[۳] Reverse Recovery Current
[۴] Reverse Recovery Time

www.takbook.com

است که به طور معمول کمتر از $1\ \mu s$ است. این پدیده در کاربردهای فرکانس بالا اهمیت پیدا می‌کند. دیودهای بازیابی سریع[۱] طوری طراحی شده‌اند که مقدار t_{rr} آنها از دیودهای استفاده شده در کاربردهای فرکانس خط کمتر باشد. دیودهای سیلیکون کاربید (SiC) زمان بازیابی معکوس خیلی کوچکی دارند و در نتیجه باعث افزایش راندمان مدار، خصوصاً در کاربردهای توان بالا می‌شوند.



شکل ۱-۸ الف) دیود یکسوساز ب) مشخصه $i - v$ پ) مشخصه $i - v$ ایده‌آل ت) زمان بازیابی معکوس ث) دیود شاتکی

دیودهای شاتکی[۲] (شکل ۱-۸-ث) بجای پیوند P-N دارای یک سد فلز- سیلیکون هستند. دیودهای شاتکی به طور معمول دارای افت ولتاژ مستقیم 0.3 ولت هستند. این دیودها در کاربردهای ولتاژ پایین که افت ولتاژ روی دیود نسبت به ولتاژهای دیگر مدار قابل توجه است استفاده می‌شود. ولتاژ معکوس دیودهای شاتکی به حدود ۱۰۰ ولت محدود می‌شود. سد فلز- سیلیکون در یک دیود شاتکی طوری نیست که زمان بازیابی گذرا و روشن و خاموش شدن آن را سریع‌تر از دیودهای پیوند P-N کند.

تریستور

تریستورها کلیدهای الکترونیکی هستند که در برخی مدارهای الکترونیک قدرت که به کنترل روشن شدن کلید نیاز است، استفاده می‌شوند. کلمه تریستور اغلب به یک خانواده از قطعات که دارای سه ترمینال هستند اطلاق می‌شود که از جمله آنها یکسوساز کنترل‌شده سیلیکونی[۳] (SCR)، تریاک[۱]، تریستور خاموش شونده با گیت[۲] (GTO)،

---

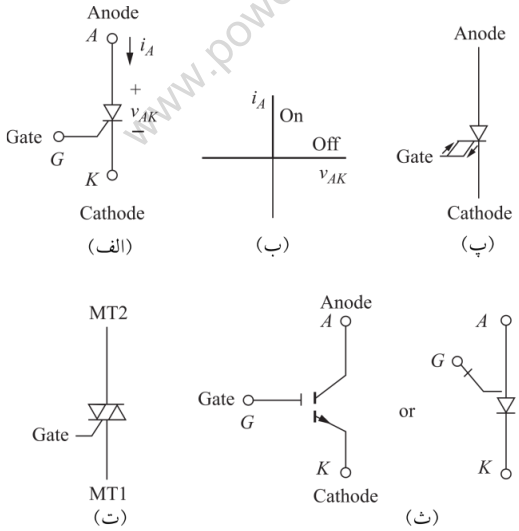
[۱] Fast-Recovery
[۲] Schottky Diodes
[۳] Silicon-Controlled Rectifier

www.takbook.com

تریستور کنترل‌شده با MOS[۳] (MCT) و ... می‌باشند. کلمه تریستور و SCR گاهی اوقات به صورت مترادف استفاده می‌شوند. SCR که در این کتاب استفاده می‌شود نشان دهنده قطعات روشن شونده کنترلی در خانواده تریستورها است. تریستورها قابلیت جریان و ولتاژهای بالا برای کاربردهای توان بالا را دارا هستند اما فرکانس سوئیچینگ آن‌ها به زیادی فرکانس سوئیچینگ قطعات دیگر همچون ماسفت‌ها نمی‌باشد.

سه ترمینال یک SCR عبارت‌اند از آند، کاتد و گیت (شکل ۱-۹-الف). برای اینکه هدایت در یک SCR آغاز شود، باید زمانی که ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت است جریان گیت اعمال شود و پس از آغاز شدن هدایت، برای حفظ جریان آند دیگر نیازی به جریان گیت نیست. SCR تا زمانی که جریان آند مثبت و بالاتر از یک مقدار حداقل به نام سطح نگهدارنده[۴] باقی بماند هدایت را ادامه خواهد داد. شکل‌های ۱-۹-الف و ۱-۹-ب علامت مداری SCR و مشخصه ایده‌آل جریان- ولتاژ آن را نشان می‌دهند.

تریستور خاموش شونده با گیت (GTO) شکل ۱-۹-پ مانند SCR، اگر ولتاژ آند نسبت به کاتد مثبت باشد با تزریق یک جریان کوتاه‌مدت به گیت روشن می‌گردد. ولی برخلاف SCR، GTO می‌تواند با تزریق جریان منفی به گیت خاموش شود، بنابراین GTO برای برخی کاربردها که هم روشن شدن و هم خاموش شدن کلید در آن نیاز است مناسب می‌باشد. جریان منفی خاموش کننده گیت باید کوتاه (حدود چند میکروثانیه) باشد ولی دامنه آن باید نسبت به جریان روشن کننده خیلی بزرگ باشد. به طور معمول جریان خاموش کننده گیت یک سوم جریان حالت روشن آند است. مشخصه ایده‌آل جریان- ولتاژ GTO شبیه شکل ۱-۹-ب برای SCR است.



شکل ۱-۹ قطعات تریستوری الف) یکسوساز کنترل‌شده سیلیکونی (SCR) ب) مشخصه $v - i$ ایده‌آل SCR پ) تریستور خاموش شونده با گیت (GTO) ت) تریاک ث) تریستور کنترل‌شده با MOS (MCT)

---

۱ Triac
۲ Gate Turn-Off Thyristor
۳ MOS-Controlled Thyristor
۴ Holding Level

www.takbook.com

تریاک (شکل ۱-۹-ت) تریستوری است که توانایی عبور جریان از دو طرف را دارد. از نظر عملکرد، تریاک معادل دو SCR موازی است که به صورت عکس به هم متصل هستند. مدارهای تنظیم نور لامپ‌های رشته‌ای از یک تریاک برای تغییر دادن هر دو نیم سیکل مثبت و منفی شکل موج ورودی سینوسی استفاده می‌کنند.

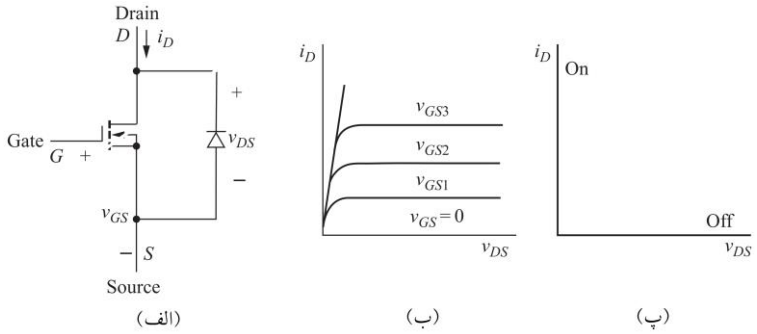
تریستور کنترل‌شده با MOS (MCT) که در شکل ۱-۹-ث نشان داده شده، قطعه‌ای است که از نظر عملکرد معادل GTO است ولی به جریان زیاد خاموش کننده گیت نیازی ندارد. MCT دارای یک SCR و دو MOSFET است که در یک قطعه مجتمع شده‌اند. یکی از ماسفت‌ها، SCR را روشن و دیگری آن را خاموش می‌کند. MCT برخلاف ایجاد جریان گیت در GTO، با ایجاد ولتاژ مناسب روی گیت نسبت به کاتد روشن و خاموش می‌شود.

تریستورها در طول تاریخ به‌خاطر سطح ولتاژ و جریان بالایشان از انتخاب‌های موجود کلیدهای الکترونیک قدرت بوده‌اند و هنوز هم در کاربردهای توان بالا استفاده می‌شوند، اما سطح توان ترانزیستورهای قدرت به طور قابل توجهی افزایش یافته به طوری که ترانزیستورها در اکثر کاربردها مناسب‌تر هستند.

ترانزیستور

ترانزیستورها به عنوان کلید در مدارهای الکترونیک قدرت کاربرد دارند. مدار راه‌انداز ترانزیستور به گونه‌ای طراحی می‌شود که ترانزیستور در حالت کاملاً روشن و یا در حالت کاملاً خاموش باشد. این عملکرد نسبت به کاربردهای دیگر ترانزیستور، مانند عملکرد آن در مدار تقویت‌کننده خطی که در ناحیه‌ای همزمان هم جریان و هم ولتاژ بالایی دارد، متفاوت است.

برخلاف دیود، روشن و خاموش شدن یک ترانزیستور قابل کنترل است. انواع ترانزیستورهایی که در مدارهای الکترونیک قدرت استفاده می‌شود عبارت است از ماسفت‌ها، ترانزیستورهای پیوند دوقطبی (BJTs) و قطعات ترکیبی مانند ترانزیستور دوقطبی با گیت عایق شده (IGBTs). شکل‌های ۱-۱۰ تا ۱-۱۲ علامت‌های مداری و مشخصه‌های جریان- ولتاژ را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۰ الف) ماسفت با دیود بدنه ب) مشخصه ماسفت پ) مشخصه ایده‌آل ماسفت

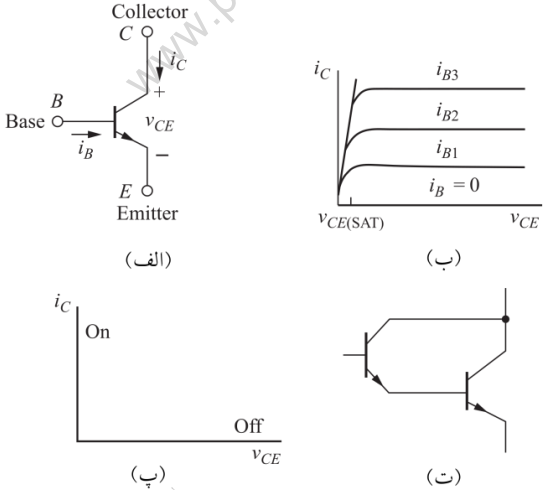
ماسفت (شکل ۱-۱۰-الف) یک قطعه کنترل‌شده با ولتاژ است که در شکل ۱-۱۰-ب مشخصه‌های آن نشان داده شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در ساختار ماسفت یک دیود بدنه وجود دارد که گاهی اوقات می‌تواند به

www.takbook.com

عنوان یک مزیت در مدارهای الکترونیک قدرت بکار گرفته شود. ماسفت‌های قدرت از نوع افزایشی[۱] هستند و نـه از نوع تهی[۲]. یک ولتاژ گیت-سورس که به اندازه کافی بزرگ باشد می‌تواند آن را روشن نموده و در نتیجه ولتاژ کوچک درین- سورس را ایجاد نماید. در حالت روشن، تغییرات v_{DS} به صورت نسبت خطی باعث تغییرات i_D می‌شـود و بنابراین ماسفت می‌تواند با یک مقاومت حالت روشن به نام $R_{DS(on)}$ مدل شـود. ماسـفت‌ها مقاومت‌هـای حالـت روشنی در حدود چند میلی اهم دارند. به عنوان یک تقریب ابتدایی ماسفت می‌تواند به صورت یک کلید ایـده‌آل بـا مشخصه نشان داده شده در شکل ۱-۱۰-پ مدل شود. مقادیر نامی ماسفت‌ها تا ۱۵۰۰ ولـت و بـیش از ۶۰۰ آمپـر (البته نه به طور همزمان) موجود است. سرعت سوئیچینگ ماسفت بیشتر از BJT است بنابراین در مبدل‌هایی که در رنج مگاهرتز کار می‌کنند از ماسفت استفاده می‌شود.

مشخصات یک BJT معمولی در شکل ۱-۱۱-ب نشان داده شده‌است. حالت روشن برای ترانزیستور با فراهم کردن جریان بیس کافی برای بردن BJT به اشباع به دست می‌آید. ولتاژ اشباع کلکتور- امیتر به طور معمول حدود ۱ تـا ۲ ولت برای BJT قدرت است. جریان بیس صفر باعث خاموش شدن ترانزیستور می‌شود. مشخصه ایـده‌آل جریـان- ولتاژ برای BJT در شکل ۱-۱۱-پ نشان داده شده‌است. BJT یک قطعه کنترل‌شـده بـا جریـان اسـت و BJTهـای قدرت مقادیر h_{FE} کوچکی در حدود کمتر از ۲۰ دارند. بـرای مثـال اگـر یـک BJT قـدرت بـا $h_{FE} = 20$ جریـان کلکتور ۶۰ آمپر از خود عبور دهد، برای بردن ترانزیستور به اشباع جریان بیس به بیش از ۳ آمپر نیاز خواهد داشـت. مدار راه‌انداز برای فراهم کردن جریان بیس بالا باید توان بالایی در خودش داشته باشد.

همان‌طور که در شکل ۱-۱۱-ت نشان داده شده، ساختار دارلینگتون[۳] دارای دو BJT متصل به هم می‌باشد.



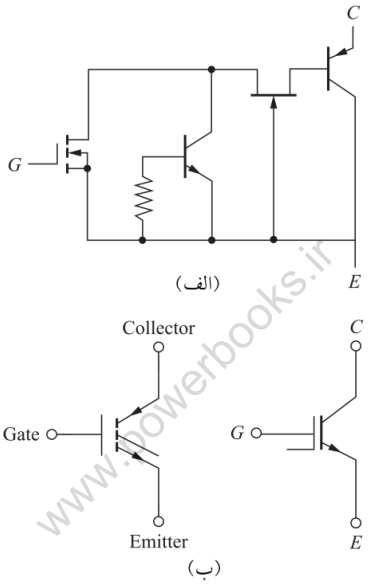
شکل ۱-۱۱ الف) مدل مداری BJT ب) مشخصه BJT پ) مشخصه ایده‌آل BJT ت) ساختار دارلینگتون

---

[۱] Enhancement Type
[۲] Depletion Type
[۳] Darlington configuration

www.takbook.com

بهره جریان مؤثر حاصل از ترکیب، تقریباً برابر حاصل‌ضرب تک تک بهره‌ها در یکدیگر است که می‌تواند جریان خواسته شده از مدار راه‌انداز را کاهش دهد. ساختار دارلینگتون می‌تواند از دو ترانزیستور مجزا تشکیل شود و یا به صورت یک مدار مجتمع استفاده گردد. BJTهای قدرت به‌ندرت در کاربردهای جدید استفاده می‌شوند چرا که ماسفت‌ها و IGBTها از آن پیشی گرفته‌اند. IGBT (شکل ۱-۱۲) از ترکیب یک ماسفت و یک BJT تشکیل می‌شود. مدار راه‌انداز IGBT شبیه ماسفت می‌باشد درحالی‌که مشخصه روشن بودن آن شبیه BJT است. IGBTها در بسیاری از کاربردها جایگزین BJTها شده‌اند.



شکل ۱-۱۲ الف) مدار معادل IGBT ب) علامت مداری IGBT

۱-۵- انتخاب کلید

انتخاب یک کلید قدرت برای یک کاربرد خاص فقط به سطح ولتاژ و جریان بستگی نداشته و به مشخصه سوئیچینگ قطعه نیز وابسته است. ترانزیستورها و GTOها می‌توانند روشن و خاموش شدن را کنترل کنند و SCRها فقط روشن شدن را و دیودها هیچ‌یک را نمی‌توانند کنترل کنند.

سرعت سوئیچینگ و تلفات توان مرتبط با آن در مدارهای الکترونیک قدرت بسیار مهم هستند. BJT یک قطعه حامل اقلیت[۱] است درحالی‌که ماسفت به عنوان یک قطعه حامل اکثریت[۲] تأخیر ذخیره حامل‌های اقلیت ندارد، بنابراین ماسفت‌ها مزیتی در سرعت سوئیچینگ دارند. زمان سوئیچینگ BJT بیشتر از ماسفت است و بنابراین ماسفت به طور کلی تلفات سوئیچینگ کمتری دارد که در نتیجه بر BJT ترجیح داده می‌شود.

---

۱ Minority carrier
۲ Majority carrier

www.takbook.com

در زمان انتخاب یک قطعه مناسب برای سوئیچینگ، اولین ملاحظه نقطه کار مورد نیاز و مشخصات خاموش و روشن شدن است. مثال ۱-۱ فرآیند انتخاب قطعه را شرح می‌دهد.

مثال ۱-۱ انتخاب کلید

مدار شکل ۱-۱۳-الف دارای دو کلید است. کلید S_1 روشن و منبع ولتاژ ($V_s = 24\ V$) را به منبع جریان ($I_o = 2\ A$) متصل می‌کند و سپس کلید S_1 باز شده تا منبع V_s از منبع جریان جدا شود. بنابراین همان‌طور که در شکل ۱-۱۳-ب نشان داده شده، نیاز است که کلید S_2 بسته شود تا مسیری برای جریان I_o به وجود آید. پس از آن باید کلید S_1 دوباره بسته و کلید S_2 باید باز شود تا مدار به وضعیت اولیه خود باز گردد. این سیکل با فرکانس $200\ kHz$ تکرار می‌شود. نوع قطعه مورد احتیاج برای هر کلید و حداکثر ولتاژ و جریان مورد نیاز برای هر یک را مشخص کنید.

حل

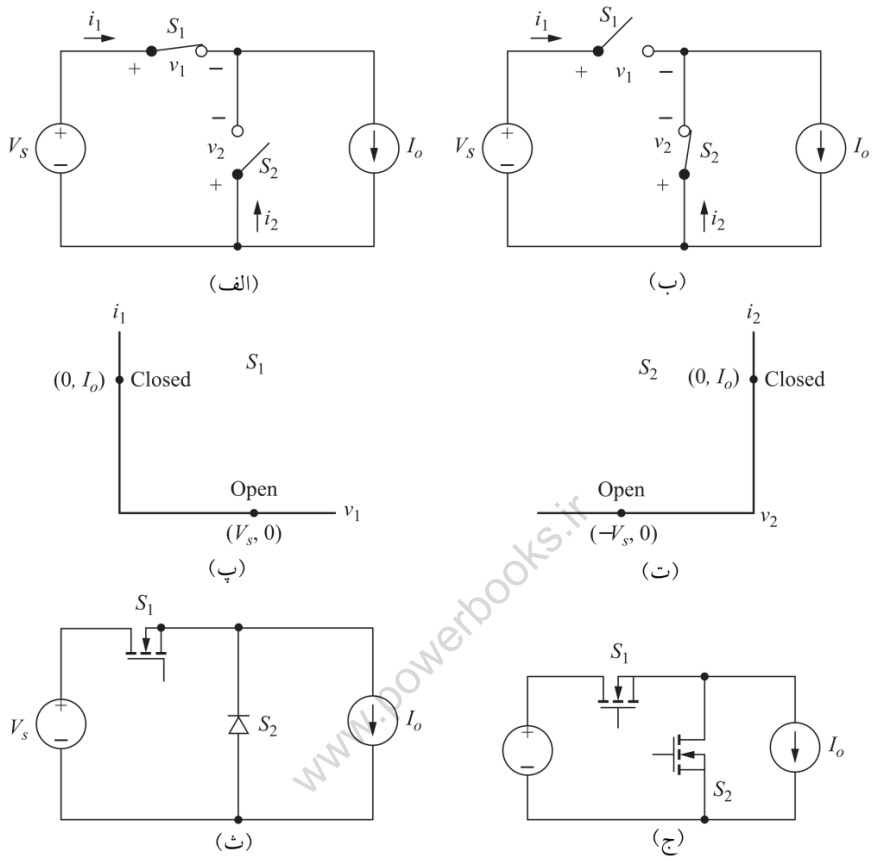
نوع قطعه بر اساس نیازهای روشن و خاموش شدن، ولتاژ و جریان کلید برای حالت‌های روشن و خاموش بودن و سرعت سوئیچینگ خواسته شده انتخاب می‌شود.

نقطه کار حالت دائم S_1 زمانی که S_1 بسته است در $(v_1, i_1) = (0, I_0)$ و زمانی که S_1 باز است در $(V_s, 0)$ قرار دارد (شکل ۱-۱۳-پ). نقطه کار بر روی محورهای مثبت i و v است و زمانی که $i_1 = I_0 > 0$ باید کلید S_1 خاموش و زمانی که $v_1 = V_s > 0$ باید روشن شود، بنابراین قطعه استفاده شده برای S_1 باید کنترل هم روشن و هم خاموش شدن را داشته باشد. مشخصه ماسفت (شکل ۱-۱۰-ت) یا مشخصه BJT (شکل ۱-۱۱-پ) این نیاز را برآورده می‌سازد. با توجه به سرعت سوئیچینگ مورد نیاز، سادگی مدار راه‌انداز و ولتاژ و جریان مورد نیاز نسبتاً کم (۲۴ ولت و ۲ آمپر)، یک ماسفت انتخاب خوبی خواهد بود.

نقطه کار حالت دائم S_2 در شکل ۱-۱۳-الف برابر $(v_2, i_2) = (-V_s, 0)$ و در شکل ۱-۱۳-ب برابر $(0, I_0)$ است. نقاط کار بر روی محور مثبت جریان و محور منفی ولتاژ قرار دارند. بنابراین برای روشن شدن S_2 یک جریان مثبت و برای خاموش شدن آن یک ولتاژ منفی باید اعمال شود. از آنجایی که نقاط کار مطابق دیود (شکل ۱-۸-پ) هستند و هیچ کنترلی برای این قطعه نیاز نیست، برای S_2، یک دیود انتخاب مناسبی است. شکل ۱-۱۳-ث پیاده‌سازی مدار سوئیچینگ را نشان می‌دهد.

اگر چه یک دیود یک قطعه مناسب و کافی برای کلید S_2 به نظر می‌رسد، همان‌طور که در شکل ۱-۱۳-ج نشان داده‌شده، یک ماسفت نیز می‌تواند در این مکان قرار گیرد. زمانی که S_2 روشن و S_1 خاموش است جریان از سمت بالای درین S_2 خارج می‌شود. مزیت استفاده از ماسفت این است که افت ولتاژ روی آن در زمان هدایت، در مقایسه با دیود خیلی کمتر است که این امر سبب کمتر شدن تلفات توان و افزایش راندمان مدار می‌شود. البته عیب آن نیز پیچیده‌تر شدن مدار کنترلی برای روشن کردن S_2 در زمان خاموش بودن S_1 است. با این حال چندین مدار کنترلی برای انجام این کار وجود دارد که روش کنترلی استفاده شده در اینجا به عنوان یکسوسازی سنکرون و یا سوئیچینگ سنکرون شناخته می‌شود.

www.takbook.com



شکل ۱-۱۳ مدار مثال ۱-۱ الف) کلید S_1 بسته و کلید S_2 باز ب) کلید S_1 باز و کلید S_2 بسته پ) نقطه کار ت) نقطه کار S_2 ث) پیاده‌سازی کلیدها توسط یک ماسفت و دیود ج) پیاده‌سازی کلیدها توسط دو ماسفت

در کاربردهای الکترونیک قدرت، منبع جریان می‌تواند معرف یک سلف که جریان آن تقریباً ثابت است باشد.

۱-۶- نرم‌افزار Spice, PSpice, Capture

شبیه‌سازی کامپیوتری یک وسیله تحلیل و طراحی ارزشمند است که در سرتاسر این کتاب بر آن تأکید شده‌است. Spice یک برنامه شبیه‌سازی است که در دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کالیفرنیای برکلی توسعه داده شده‌است. PSpice نسخه تجاری Spice است که برای کامپیوترهای شخصی توسعه داده شده‌است. Capture نیز یک رابط گرافیکی است که شبیه‌سازی را با استفاده نمایش گرافیکی مدار ممکن می‌سازد. شرکت Cadence نیز

www.takbook.com

Power Electronics

Daniel W. Hart

کتاب پیش رو علاوه بر پوشش تمامی
سر فصـل ها شامل موضوعـات جدید و کاربردی بوده و
اخیراً به عنوان یک کتاب مرجـع برای درس الکترونیک قدرت در دوره
کارشناسی و درس منابع تغذیه سوئیچینگ در دوره کارشناسی ارشـد مورد توجه
قرار گـرفته است. از مزایای این کتاب وجود بیش از ۱۰۰ مثال حل شـده در پایان هر
مبحث است که می تواند به دانشـجویان گرامـی جهت تمرین و فهم بهتـر مطالب و نحوه
استفاده از فرمول های ارائه شده در هر بخش کمک کند. همچنین در انتهای هر فصل مسائل
مختلفی برای تمرین بیشتر وجود دارد. از مزایای دیگر این کتاب استفاده از نرم افزارPSpice
برای شبیه سازی مدارهای الکترونیـک قدرت است تا دانشجویان گرامی بتوانند عـلاوه بر
حل دستی مسائل، با نحوه استفاده از نرم افزارهای کامپیوتری نیز آشنا شوند. در انتهای
هر فصل نحوه استفاده از نرم افزار PSpice برای شبیه سازی مدارها و مبدل های
مطرح شده در آن فصل ارائه شده است. تمام فایل های شبیه سازی درCD
همراه کتاب موجود می باشد که دانشجویان علاقه مند می توانند
از آنها جهت تمرین شبیه‌سازی استفاده نمایند.

ISBN:978-600-04-4024-4

فروشگاه
این کتاب صرفا به صورت اینترنتی به فروش می رسد. جهت
خرید به وب سایت زیر مراجعه نمایید:
www.powerbooks.ir