بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد قدرت

عنوان پایان‌نامه:

طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت برای سیستم‌های فتوولتائیک

مصطفی برزگر کلشانی

استاد راهنما:

دکتر مرتضی فرسادی

بهمن ماه ۹۳

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان‌نامه کارشناسی ارشد قدرت

عنوان پایان‌نامه:

طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت برای سیستم‌های فتوولتائیک

مصطفی برزگر کلشانی

استاد راهنما:

دکتر مرتضی فرسادی

بهمن ماه ۹۳

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

طراحی مبدل‌های الکترونیک قدرت برای سیستم‌های فتوولتائیک

دانشجو:

مصطفی برزگر کلشانی

این پایان‌نامه به عنوان بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی مقطع کارشناسی ارشد مهندسی **برق** گرایش **قدرت** در تاریخ توسط هیئت داوران ذیل مورد پذیرش قرار گرفت.

استاد راهنما: دکتر مرتضی فرسادی

داور خارجی: دکتر وحید تلاوت

داور داخلی: دکتر داریوش نظرپور

نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر مهدی چهل امیرانی

کلیه حقوق این اثر متعلق به دانشگاه ارومیه است.

دانشگاه ارومیه

دانشکده فنی و مهندسی

تعهد نامه پژوهشی

نظر به اینکه چاپ و انتشار پایاننامه های تحصیلی دانشجویان دانشگاه ارومیه مبین بخشی از فعالیتهای علمی - پژوهشی دانشجو میباشد که با استفاده از اعتبارات دانشگاه انجام می‌شود، برای آگاهی دانشجو و رعایت حقوق دانشگاه، دانش آموختگان گرامی نسبت به رعایت موارد ذیل متعهد می‌شوند:

۱. قبل از چاپ پایان نامه خود، مراتب را بطور کتبی به مدیریت تحصیلات تکمیلی دانشگاه اطلاع و کسب اجازه نمایند.

۲. در انتشار نتایج پایان نامه در قالب مقاله، همایش، اختراع، اکتشاف و سایر موارد ذکر نام دانشگاه ارومیه الزامی است.

۳. انتشار نتایج پایان نامه باید با اطلاع و کسب اجازه از استاد راهنما صورت گیرد.

اینجانب **مصطفی برزگر کلشانی** دانشجوی گرایش **قدرت** مقطع **کارشناسی ارشد** تعهدات فوق و ضمانت اجرایی آنرا قبول کرده و به آن ملتزم می‌شوم.

تاریخ و امضا دانشجو

اهدا و تقدیم

ماحصل آموخته هایم را تقدیم می کنم به آنان که مهر آسمانی شان آرام بخش آلام زمینی ام است،

به استوارترین تکیه گاهم، دستان پر مهر پدرم

به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان سبز مادرم

که هر چه آموختم در مکتب شما آموختم و هر چه بکوشم قطره ای از دریای بی کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم.

امروز هستی ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما

ره آوردی گران سنگ تر از این نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگیتان را بزداید.

بوسه بر دستان پر مهرتان

تقدیر و تشکر

در اینجا بر خود لازم می دانم از زحمات استاد بزرگوارم آقای دکتر مرتضی فرسادی که در تمام طول دوره ی تحصیلاتم از رهنمودهای ایشان بهره بردم، تقدیر و تشکر نمایم.

همچنین از محضر اساتید گرامی آقایان دکتر داریوش نظرپور و دکتر وحید تلاوت که با وجود مشغله فراوان، وقت با ارزش خود را جهت داوری پایان نامه اینجانب صرف نمودند و ضمن حضور در جلسه دفاعیه با سوالات روشنگرانه خود مرا راهنمایی نمودند، سپاسگزارم.

از سایر اعضای خانواده ام و دوستانم آقایان: مهندس رسول شالچی، مهندس کهروم مشرفی و هم چنین آقایان صالحی و بروژی که در انجام پروژه یاری ام نموده اند تقدیر و تشکر می نمایم.

چکیده

با توجه به افزایش روز افزون نگرانی های جهانی در مورد آلودگی آب و هوا و کاهش منابع انرژی های سوخت فسیلی، تحقیقات در مورد انرژی های تجدیدپذیر روز به روز افزایش می یابد. در مورد منابع انرژی های تجدیدپذیر نظیر انرژی های خورشیدی، بادی، پیل های سوختی و ... مشکلات عدیده ای نظیر ردیابی توان ماکسیمم، بازدهی کم و مشکلات اتصال به شبکه و بار وجود دارد. یکی از مشکلات اساسی دیگر مربوط به کانورترهای الکترونیک قدرتی می باشد که با هزینه بالایی همراه می باشند.

اینورتر چندسطحی یک سیستم الکترونیک قدرت است که می تواند با استفاده از چندین منبع ولتاژ dc به عنوان ورودی، یک شکل موج ولتاژ سینوسی را در خروجی تولید کند. اینورترهای چندسطحی در مقایسه با اینورترهای دوسطحی و سه سطحی دارای مزایای از جمله تولید شکل موج خروجی با کیفیت بالا، کاهش اعوجاج هارمونیکی، کاهش تلفات کلیدزنی، کاهش استرس dv/dt روی کلیدها می‌باشند. اینورترهای چندسطحی معایبی نیز دارند، از جمله اینکه برای ایجاد سطوح ولتاژ بیشتر در خروجی، تعداد ادوات الکترونیک قدرت افزایش می یابد.

در این پایان‌نامه یک اینورتر چند سطحی متقارن و نامتقارن کاربردی در سیستم‌های فتوولتائیک بر اساس یک واحد پایه جدید پیشنهاد شده است. توپولوژی پیشنهادی از اتصال سری این واحدهای پایه تشکیل می‌گردد. این واحدهای پایه بر اساس کلیدزنی بین دو کلید و یک دیود، سطوح مختلف ولتاژ را تولید می‌کنند. از آنجائیکه واحدهای پایه‌ی پیشنهادی تنها قادر به تولید سطوح ولتاژ مثبت هستند، لذا یک اینورتر پل H برای تولید سطوح ولتاژ منفی و صفر استفاده شده است. در ساختار پیشنهادی، چهار الگوریتم متفاوت برای محاسبه‌ی اندازه‌ی منابع ولتاژ dc معرفی گردیده است. توپولوژی پیشنهادی قادر به تولید سطوح ولتاژ بالا با کم‌ترین تعداد ادوات الکترونیک قدرت می‌باشد. تعدادی مقایسه بین توپولوژی پیشنهادی و توپولوژی‌های مرسوم و ساختارهای پیشنهاد شده سال‌های اخیر از حیث تعداد کلیدهای قدرت، مدارهای درایور، منابع ولتاژ dc و پیک ولتاژ معکوس کلیدها انجام گردیده است و برتری توپولوژی پیشنهادی نشان داده شده است. این ساختار در مقایسه با ساختارهای مرسوم، نیاز به تعدادکلیدها و منابع ولتاژ dc کم تری دارد که منجر به کاهش حجم، قیمت نهایی و ساده شدن روش کنترلی اینورتر می شود. نهایتا، کارایی ساختار پیشنهادی از طریق شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB/Simulink و پیاده‌سازی عملی بر روی یک ساختار ۲۷- سطحی تایید شده است.

کلمات کلیدی: اینورتر چندسطحی، توپولوژی، متقارن و نامتقارن، مبدل dc-ac

فهرست مطالب

۱ فصل اول: ساختار اینورترهای چند سطحی مرسوم..... ۱

۱-۱ مقدمه..... ۱

۱-۲ مبدل دو سطحه..... ۲

۱-۳ مفهوم مبدل چند سطحه..... ۴

۱-۴ اینورترهای چند سطحی..... ۵

۱-۴-۱ اینورتر چند سطحی برشگر دیودی با نقطه‌ی خنثی..... ۵

۱-۴-۲ اینورتر چندسطحی خازن شناور..... ۹

۱-۴-۳ اینورتر چند سطحی پل آبشاری H..... ۱۲

۱-۴-۳-۱ روش اول..... ۱۵

۱-۴-۳-۲ روش دوم ۱۶

۱-۴-۳-۳ روش سوم..... ۱۶

۱-۵ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی معکوس کننده ولتاژ..... ۱۷

۱-۶ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی ترکیبی..... ۱۹

۱-۷ مقایسه اینورترهای چند سطحی..... ۲۰

۱-۷-۱ مقایسه کیفی المان‌های تشکیل دهنده ساختارها ۲۰

۱-۷-۲ مقایسه کمی المان‌های تشکیل دهنده ساختارها ۲۰

۱-۸ نقاط قوت و ضعف اینورترها..... ۲۱

۱-۹ خلاصه فصل..... ۲۳

۲ فصل دوم: ساختار اینورترهای چند سطحی جدید..... ۲۴

۲-۱ مقدمه..... ۲۴

۲-۲ ساختار مطرح شده در سال ۲۰۰۷..... ۲۴

۲-۳ ساختارهای مطرح شده در سال ۲۰۱۰..... ۲۶

۲-۳-۱ ساختار اول..... ۲۶

۲-۳-۲ ساختار دوم..... ۲۸

۲-۴ ساختارهای مطرح شده در سالهای ۲۰۰۹ و ۲۰۱۱ در کنفرانس‌های معتبر خارجی و

داخلی..... ۳۰
۲-۵ ساختارهای مطرح شده در سال ۲۰۱۳..... ۳۱
۲-۵-۱ ساختار اول پیشنهاد شده در سال ۲۰۱۳..... ۳۱
۲-۵-۲ ساختار دوم پیشنهاد شده در سال ۲۰۱۳..... ۳۲
۲-۶ خلاصه فصل..... ۳۴
۳ فصل سوم: ساختار اینورتر چندسطحی پیشنهادی..... ۳۵
۳-۱ مقدمه..... ۳۵
۳-۲ ساختار اساسی اینورتر پیشنهادی..... ۳۵
۳-۳ ساختارهای متقارن و نامتقارن پیشنهاد شده..... ۳۷
۳-۳-۱ ساختار متقارن پیشنهاد شده..... ۳۷
۳-۳-۲ ساختارهای نامتقارن پیشنهاد شده..... ۴۰
۳-۳-۲-۱ اولین روش محاسبه مقادیر ولتاژهای ورودی برای ایجاد ساختار نامتقارن..... ۴۲
۳-۳-۲-۲ دومین روش محاسبه مقادیر ولتاژهای ورودی برای ایجاد ساختار نامتقارن..... ۴۴
۳-۳-۲-۳ سومین روش محاسبه مقادیر ولتاژهای ورودی برای ایجاد ساختار نامتقارن..... ۴۵
۳-۴ مقایسه‌ی ساختار اینورتر پیشنهادی با ساختارهای طراحی شده قبلی..... ۴۶
۳-۴-۱ مقایسه اینورتر پیشنهاد شده با ساختارهای قبلی بر اساس تعداد IGBT های مورد استفاده..... ۴۸
۳-۴-۲ مقایسه ساختار اینورتر پیشنهاد شده با ساختارهای قبلی بر اساس تعداد درایورهای مورد استفاده..... ۴۸
۳-۴-۳ مقایسه ساختار اینورتر پیشنهاد شده با ساختارهای قبلی بر اساس تعداد منابع dc مورد استفاده..... ۴۹
۳-۴-۴ مقایسه ساختار اینورتر پیشنهاد شده با ساختارهای قبلی از نظر پیک ولتاژ معکوس کلیدها..... ۵۰
۳-۵ خلاصه فصل..... ۵۱
۴ فصل چهارم: نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی..... ۵۲
۴-۱ مقدمه..... ۵۲
۴-۲ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی برای ساختار ۲۷- سطحی پیشنهاد شده..... ۵۲

۴-۳ خلاصه فصل..... ۶۱
نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....۶۲
مراجع.....۶۴

فهرست جداول

جدول ۱-۱: حالت‌های مختلف کلیدزنی ساختار ۵-سطحی اینورتر برشگر دیودی ۷
جدول ۱-۲: حالت‌های مختلف کلیدزنی اینورتر ۵- سطحی خازن شناور ۱۰
جدول ۱-۳: حالت‌های مختلف کلیدزنی اینورتر ۵-سطحی نوع آبشاری پل H ۱۴
جدول ۱-۴: نمونه‌ای از حالت‌های مختلف کلیدزنی در مبدل پنج سطحه معکوس کننده ولتاژ ۱۸
جدول ۱-۵: مقایسه کیفی ساختار اینورترهای N-سطحی مرسوم ۲۰
جدول ۱-۶: مقایسه کمی ساختار اینورترهای N-سطحی مرسوم ۲۱
جدول ۲-۱: تعداد المانهای استفاده شده ساختار ارائه شده سال ۲۰۰۷ ..... ۲۶
جدول ۲-۲: مقایسه بین دومین ساختار مطرح شده در سال ۲۰۱۰ و اینورتر کاسکاد پل H ۳۰
جدول ۳-۱: حالت‌های مختلف کلیدزنی اینورتر ۹ – سطحی پیشنهادی ۳۶
جدول ۳-۲: حالت‌های مختلف کلیدزنی اینورتر متقارن پیشنهادی برای تولید سطوح ولتاژ مختلف ۳۸
جدول ۳-۳: حالت‌های مختلف کلیدزنی برای ساختار نامتقارن پیشنهادی ۴۲
جدول ۴-۱: حالت‌های مختلف کلیدزنی اینورتر ۲۷ - سطحی برای تولید سطوح ولتاژ مثبت ۵۳

فهرست اشکال

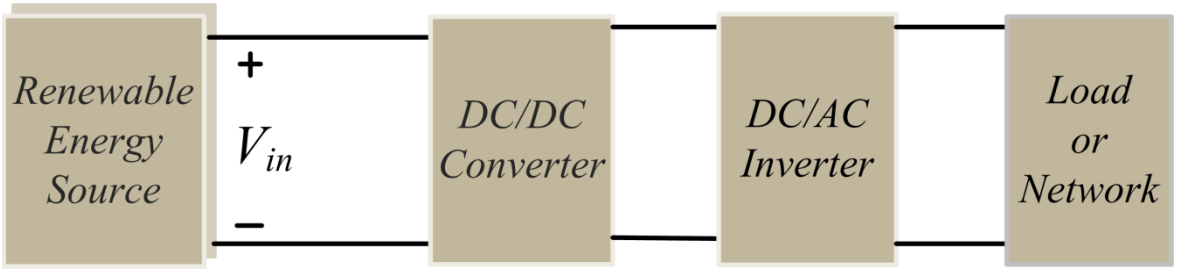
شکل ۱-۱: ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک ۱
شکل ۱-۲: مبدل دو سطحه و خروجی آن ۲
شکل ۱-۳: مبدل ولتاژ ۴
شکل ۱-۴: خروجی یک مبدل ۹- سطحه ۴
شکل ۱-۵: ساختار ۵- سطحی اینورتر برشگر دیودی با شکل موج خروجی مربوطه ۵
شکل ۱-۶: شارژ و دشارژ خازن‌های C_1 و C_2 ..... ۸
شکل ۱-۷: ساختار ۵- سطحی اینور خازن شناور با شکل موج خروجی مربوطه ۹
شکل ۱-۸: مسیر تولید سطح ۰ در اینورتر ۵-سطحی خازن شناور (خطوط پررنگ سیاه) ۱۱
شکل ۱-۹: ساختار ۵-سطحی اینورتر آبشاری پل H و خروجی آن ۱۳
شکل ۱-۱۰: اینورتر N سطحی آبشاری پل H ۱۵
شکل ۱-۱۱: ساختار اینورتر چند سطحی معکوس کننده ولتاژ ۱۷
شکل ۱-۱۲: ساختار اینورتر چند سطحی ترکیبی برشگر دیودی با پل H ۱۹
شکل ۲-۱: ساختار پایه‌ی پیشنهاد شده در سال ۲۰۰۷ ..... ۲۵
شکل ۲-۲: انواع روش‌های ایجاد کلیدهای دو جهته ۲۵
شکل ۲-۳: ساختار اول اینورتر چند سطحی مطرح شده در سال ۲۰۱۰ ..... ۲۷
شکل ۲-۴: مسیر جریان اینورتر ۹-سطحی با تبدیل سری/موازی ۲۸
شکل ۲-۵: دومین ساختار اینورتر چند سطحی پیشنهاد شده در سال ۲۰۱۰ ..... ۲۹
شکل ۲-۶: پایه اینورتر و اتصال سری آنها ۲۹
شکل ۲-۷: ساختارهای مطرح شده در سالهای ۲۰۰۹ و ۲۰۱۰ در کنفرانس‌های معتبر خارجی و داخلی ۳۰
شکل ۲-۸: ساختار اول پیشنهاد شده در سال ۲۰۱۳ ..... ۳۱
شکل ۲-۹: واحد پایه اینورتر پیشنهادی دیود بای-پس با ترانزیستور ۳۲
شکل ۲-۱۰: ساختار های چندسطحی به روش دیود بای-پس با ترانزیستور ۳۳
شکل ۳-۱: ساختار اینورتر ۹- سطحی پیشنهاد شده ۳۵
شکل ۳-۲: ساختار اینورتر چند سطحی متقارن پیشنهاد شده ۳۷
شکل ۳-۳: ساختار اینورتر چند سطحی نامتقارن پیشنهاد شده ۴۱
شکل ۳-۴: ساختار اینورترهای چند سطحی پیشنهاد شده در مراجع مختلف ۴۷
شکل ۳-۵: مقایسه ساختارهای مختلف از نظر تعداد IGBT با تغییرات سطوح ولتاژ ۴۸
شکل ۳-۶: مقایسه ساختارهای مختلف از نظر تعداد مدارهای درایور با تغییرات سطوح ولتاژ ۴۹
شکل ۳-۷: مقایسه ساختارهای مختلف از نظر تعداد منابع dc استفاده شده با تغییرات سطوح ولتاژ ... ۵۰
شکل ۳-۸: مقایسه ساختارهای مختلف از نظر پیک ولتاژ معکوس روی کلیدها با تغییرات سطوح ولتاژ ۵۱

شکل ۴-۱: ساختار اینورتر ۲۷- سطحی پیشنهادی ۵۲
شکل ۴-۲: نمونه آزمایشگاهی اینورتر ۲۷-سطحی پیشنهاد شده..... ۵۴
شکل ۴-۳: (الف) بلوک دیاگرام کنترلی، (ب) مدار درایور کلیدهای IGBT..... ۵۴
شکل ۴-۴: فلوچارت روشهای مختلف مدولاسیون در اینورترهای چند سطحی بر اساس فرکانس کلیدزنی ۵۶
شکل ۴-۵: شکل موج اینورتر ۲۷- سطحی با استفاده از روش کلیدزنی فرکانس پایه ۵۷
شکل ۴-۶: شکل موج ولتاژ بار اینورتر۲۷- سطحی پیشنهادی..... ۵۸
شکل ۴-۷: شکل موج جریان بار اینورتر ۲۷- سطحی پیشنهادی ۵۹
شکل ۴-۸: شکل موج پیک ولتاژ معکوس افتاده شده بر روی کلیدها..... ۶۰

۱ فصل اول: ساختار اینورترهای چند سطحی مرسوم

۱-۱ مقدمه

به طور کلی یک سیستم فتوولتائیک از چهار قسمت اساسی تشکیل شده که شامل، پنل خورشیدی، مبدل dc-dc، اینورتر برای تبدیل ولتاژ dc به ac و بار یا شبکه می‌باشد. از آنجائیکه هزینه سخت افزاری مبدل‌های الکترونیک قدرت در این سیستم‌ها زیاد می‌باشد لذا در این پایان نامه بر روی مبدل اینورتری تمرکز نموده و ساختار چند سطحی جدیدی با عناصر الکترونیک قدرت کم‌تر ارائه می-شود.



شکل ۱-۱: ساختار کلی یک سیستم فتوولتائیک

مبدل‌های جریان مستقیم به متناوب با نام اینورتر شناخته می شوند. وظیفه یک اینورتر تبدیل یک ولتاژ ورودی مستقیم به یک ولتاژ متناوب و متقارن با دامنه و فرکانس مورد نظر است. ولتاژ خروجی می تواند در فرکانس ثابت و یا متغیر مقداری ثابت و یا متغیر داشته باشد. ولتاژ خروجی را می‌توان با تغییر ولتاژ ورودی مستقیم و ثابت نگه داشتن بهره اینورتر به دست آورد.

اینورتر ها را می توان به دو نوع کلی تقسیم کرد: اینورتر های تکفاز و اینورتر های سه فاز. هر دسته می تواند بسته به نوع کاربرد از عناصر روشن کننده و خاموش کننده کنترل شده (مثل BJT[1]ها، MOSFET[2]ها، IGBT[3]ها و ...) استفاده کند. این اینورتر ها معمولا از سیگنال های کنترل مدولاسیون پهنای پالس[4] برای تولید ولتاژ خروجی متناوب استفاده می کنند. اینورتر های چند سطحی می توانند منافع اساسی زیادی در کاربرد قدرت داشته باشند که در مقایسه با اینورتر های دو سطحی شامل کم شدن هار مونیک‌ها و زیاد شدن نرخ توان می‌باشد.

به هر حال اینورتر های چند سطحی ولتاژی ساختار اصلی اینورتر های چند سطحی هستند و تحقیقات گسترده در مورد اینورتر های چند سطحی در حوزه الکترونیک قدرت حاکی از مزایای زیاد این وسایل اعم از تنش های کم ولتاژ در مولفه ها، هارمونیک های خروجی کم و صدور EMI[5] که آن را برای

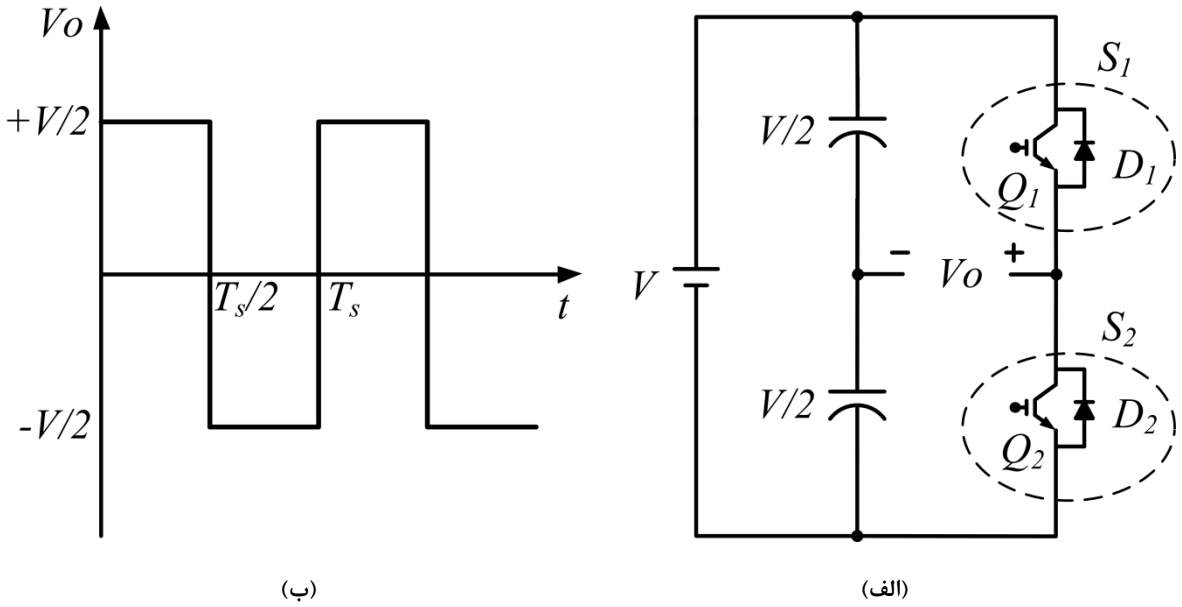
[1] Bipolar Junction Transistor
[2] Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
[3] Insulated Gate Bipolar Transistor
[4] Pulse Width Modulation
[5] Electromagnetic Interference

کاربرد های ولتاژ و توان بالا مناسب می کند، است.

۱-۲ مبدل دو سطحه

شمای کلی یک مبدل[1] دو سطحه در شکل ۱-۲(الف) نشان داده شده است . همان‌طور که در شکل نشان داده شده است این مبدل از دو کلید و دو عدد خازن با ظرفیت‌های یکسان تشکیل شده که با توجه به نحوه‌ی کلید زنی آن‌ها دارای دو سطح ولتاژ $V/2$ و $-V/2$ می‌باشد. زمانی‌که کلید S_1 روشن شود سطح ولتاژ خروجی $+V/2$ و زمانی که کلید S_2 روشن شود ولتاژ خروجی دارای سطح ولتاژ $-V/2$ خواهد بود. شکل موج خروجی این مبدل به صورت شکل ۱-۲(ب) خواهد بود. مقدار ولتاژ موثر[2] این مبدل از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

$$V_O = \sqrt{\frac{2}{T_s}\int_0^{\frac{T_s}{2}} \left(\frac{V}{2}\right)^2 dt} = \frac{V}{2} \qquad (۱-۱)$$



شکل ۱-۲: مبدل دو سطحه و خروجی آن
الف) توپولوژی مبدل دو سطحه، ب) شکل موج ولتاژ خروجی مبدل دو سطحه

ولتاژ لحظه‌ای[3] خروجی توسط سری فوریه به صورت زیر بیان می‌شود:

$$V_O = \sum_{n=1,2,..}^{\infty} \frac{2V}{n\pi}\sin(n\omega t) \qquad (۲-۱)$$

[1] Converter
[2] Root Mean Square Voltage
[3] Instant Voltage

که در آن $\omega = 2\pi f_o$ فرکانس ولتاژ خروجی بوده و بر حسب rad/s می‌باشد. بـه ازای n=1 رابطـه (۱-۳) مقدار موثر مؤلفه‌ی اصلی[1] را به صورت زیر بدست می‌دهد:

$$V_1 = \frac{2V}{\sqrt{2}\pi} = 0.45V \qquad (۱-۳)$$

در یک بار سلفی، جریان بار نمی‌تواند با تغییر ولتاژ خروجی به صورت ناگهانی تغییـر جهـت پیـدا کند. اگر Q_1 در زمان $t = T_s/2$ خاموش شود، جریان بار تا زمانی‌که مقدار آن بـه صـفر برسـد از طریـق D_2، بار و نیمه‌ی پایینی منبع ادامه خواهد داشت. به همین منوال زمانی که Q_2 در زمان $t = T_s$ خاموش می‌شود، جریان بار از طریق D_1، بار و نیمه بالایی منبع مستقیم هدایت می‌گردد. هنگـامی کـه D_1 و D_2 هدایت می‌کنند انرژی دوباره به منبع بازگردانده می‌شود. به این دو دیود، دیود های فیدبک[2] گفتـه مـی-شود.

برای یک بار اهمی سلفی (RL) جریان لحظه‌ای I_O را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

$$I_O = \sum_{n=1,3,5,.}^{\infty} \frac{2V}{n\pi\sqrt{R^2 + (n\omega l)^2}} Sin(n\omega t - \theta_n) \qquad (۱-۴)$$

که در آن $\theta_n = \tan^{-1}\left(\frac{n\omega l}{R}\right)$ است. اگر $I_{O,1}$ مقدار موثر جریان اساسی بار باشد، توان اساسی خروجی به ازای (n=1) به صورت زیر خواهد بود:

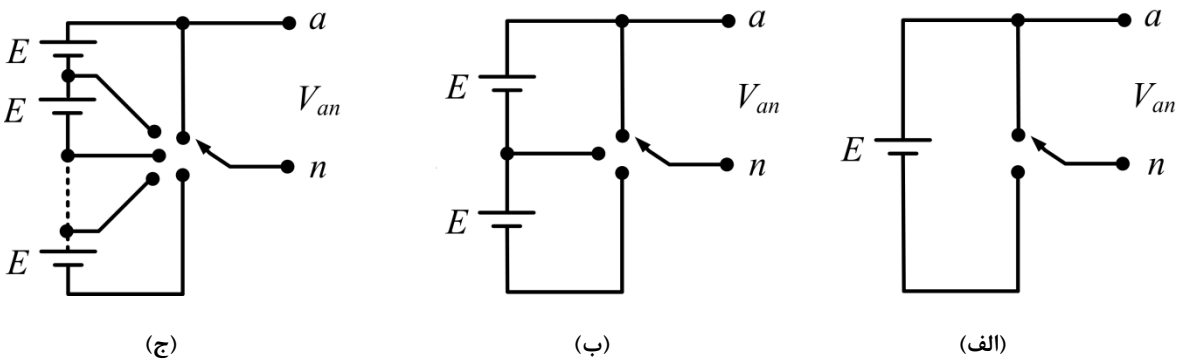
$$P_{O1} = V_1 I_{O1} \cos\theta_1 = R{I_{O1}}^2 = R\left[\frac{2V}{\sqrt{2}\pi\sqrt{R^2} + (\omega L)^2}\right]^2 \qquad (۱-۵)$$

با توجه به بالا بودن هارمونیک در اینورترهای دو سطحه و عدم کارایی مناسب در صنعت، در سال ۱۹۷۵ اینورترهای چند سطحه[3] توسط R. H. Baker و L. H. Bannister معرفی گردید[۱]. اولین اینورتر اینورتر چند سطحه، اینورتر چند سطحه پل H سری[4] بود. ساختار بعـدی اینـورترهـای برشـگر دیـودی[5] بودند که دارای خازن‌هایی برای تقسیم بندی منبع ولتاژ ورودی به مقادیر یکسان بود. ساختارهای بعـدی معرفی شده ساختارهای خازن شناور[6]، ساختار معکوس کننده ولتاژ و ساختارهای ترکیبی می‌باشد. هدف از ارائه این ساختارها دست یافتن به هارمونیک پایین‌تر و دست‌یابی به دامنه ولتاژ بالا می‌باشد. در ادامـه این فصل به بررسی کلی در مورد ساختارهای ذکر شده خواهیم پرداخت.

[1] Main Component
[2] Feedback Diodes
[3] Multilevel Inverters
[4] Cascaded H-bridge Inverter
[5] Diode-clamped Inverter
[6] Flying Capacitor

۱-۳ مفهوم مبدل چند سطحه

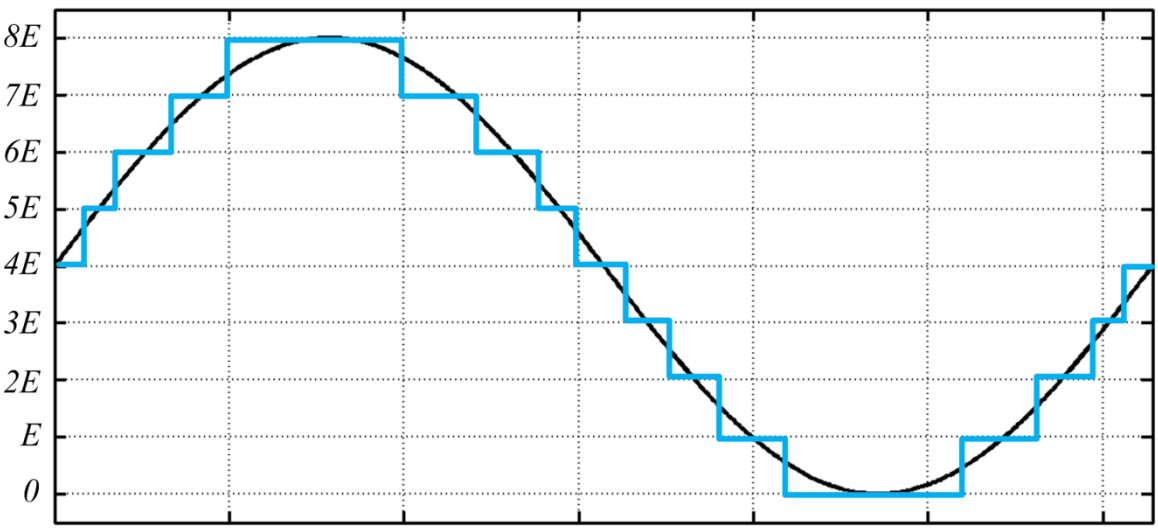
مبدل‌های چند سطحه ولتاژ، مبدل‌هایی هستند که با استفاده از سطوح مختلف، ولتاژ را از حالت مستقیم به متناوب تبدیل می‌کنند [۲, ۳]. شکل ۱-۳(الف) را در نظر بگیرید. همان‌طور که در شکل ۱-۳(الف) ملاحظه می‌شود ولتاژ V_{an} با در نظر گرفتن ایده آل بودن کلید فقط می‌تواند مقادیر 0 و E را اختیار کند (مبدل دو سطحه). در شکل ۱-۳(ب) نیز ولتاژ V_{an} با در نظر گرفتن ایده آل بودن کلیدها می‌تواند مقادیر 0، E و ۲E را داشته باشد (مبدل سه سطحه). با تعمیم دادن این مدار می‌توان تعداد سطوح بیشتری داشت (شکل ۱-۳(ج)).



شکل ۱-۳: مبدل ولتاژ

الف) مبدل دو سطحه، ب) مبدل سه سطحه، ج) مبدل m سطحه

شکل ولتاژ خروجی برای یک مبدل نه سطحه با این ساختار و با کلیدزنی مناسب به صورت زیر خواهد بود.



شکل ۱-۴: خروجی یک مبدل ۹- سطحه

همان‌طور که ملاحظه می‌گردد ولتاژ شکل موج خروجی یک مبدل ۹ - سطحه در مقایسه با

ساختار مبدل دو سطحه، سینوسی‌تر است و دارای هارمونیک کمتری می‌باشد. برای دست یابی به این شکل موج‌ها ساختارهای مختلفی ارائه شده است که در ادامه به معرفی چند نمونه از آن‌ها می‌پردازیم.

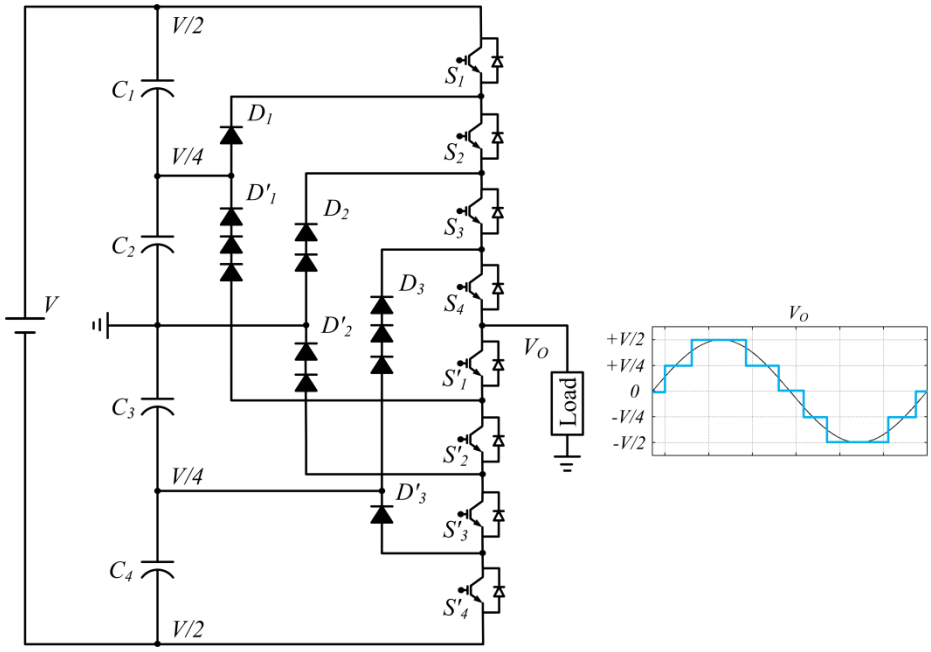
۱-۴ اینورترهای چند سطحی

ساختارهای مختلفی برای اینورترهای چند سطحی به منظور دستیابی به هارمونیک کمتر، تلفات کلیدزنی کمتر، دامنه ولتاژ بالاتر و همچنین استفاده از المان‌های کمتر ارائه گردیده است [۳-۱۱]. در این فصل در مورد اینورترهای چند سطحی مرسوم به صورت کلی بحث‌هایی ارائه خواهد گردید. انواع ساختارهای اینورتر های چند سطحی به صورت زیر می‌باشد:

- ❖ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی برشگر دیودی با نقطه‌ی خنثی
- ❖ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی خازن شناور
- ❖ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی آبشاری پل H سری
- ❖ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی معکوس کننده ولتاژ[۱]
- ❖ اینورتر منبع ولتاژ چند سطحی ترکیبی[۲]

۱-۴-۱ اینورتر چند سطحی برشگر دیودی با نقطه‌ی خنثی[۳]

شکل ۱-۵ شمای کلی یک اینورتر برشگر دیودی تک فاز با نقطه خنثی میانی می‌باشد.



شکل ۱-۵: ساختار ۵- سطحی اینورتر برشگر دیودی با شکل موج خروجی مربوطه

[1] Reverse Voltage
[2] Hybrid
[3] Diode-clamped Multilevel Inverter/Neutral-point Clamped Multilevel Inverter

این مبدل برای اولین بار در سال ۱۹۸۰ توسط Nabae مطرح گردید [۱۲]. همان طور که از شکل برمی‌آید این کانورتر از بانک خازن این مقسّم ولتاژ، دیود های نگه دارنده[1]، دیـود هـای بلوکـه کننـده[2] و کلید تشکیل یافته است. در این مدار، خازن‌ها نقش تقسیم کردن ولتاژ dc ورودی را به سطوح مورد نظـر را دارند. در حالت متقارن ظرفیت این خازن‌ها با هم برابر است. تعداد سطوح در این مبدل معمولاً عددی فرد است، بنابراین تعداد خازن‌های مورد نیاز برای یک اینـورتر برشـگر دیـودی N سـطحه کـه از رابطـه $(N-1)$ حاصل می‌گردد، عددی زوج خواهد بود. به عنوان مثـال در یـک اینـورتر برشـگر دیـودی پـنج سطحی، چهار خازن مورد نیاز است. در این ساختار نقطه میانی بین خازن‌ها اتصال بـه زمـین مـی‌گـردد. خروجی مبدل در این حالت دارای پنج سطح: $-V/4$، $-V/2$، 0، $+V/2$ و $+V/4$ می‌باشد. در صورتی‌که نقطه میانی اتصال به زمین نگردد در خروجی فقط سطوح مثبت را خواهیم داشت. در این حالت شکل موج خروجی دارای سطوح 0، $+V/4$، $+V/2$، $+3V/4$ و $+V$ خواهد بود.

تعداد کلیدهای مورد استفاده قرار گرفته در این مبدل به ازای N سطح برابر با $2(N-1)$ خواهد بود. کلیدهای مورد استفاده در این مبدل با یکدیگر جفت می‌باشند. به طوری‌که کلید S_1 بـا S'_1 ، S_2 بـا S'_2 ، S_3 با S'_3 و S_4 با S'_4 جفت می‌باشد و در صـورت هـدایت یکـی، دیگـری در حالـت خـاموش قـرار می‌گیرد و هدایت نمی‌کند. بنابراین در این اینورتر تعداد جفت کلید مورد نیاز به ازای N سطح ولتاژ برابر $(N-1)$ خواهد بود.

المان دیگری که در این مبدل به کار رفته، دیود می‌باشد. در صورتی‌که تعداد سطوح ولتاژ را N در نظر بگیریم مجموع دیودهای لازم برای این مبدل $(N-1)(N-2)$ خواهد بود. نیمی از دیودها تحـت عنوان دیود های نگه دارنده و نیمی دیگر تحت عنوان دیود هـای بازدارنـده مـی‌باشـند. تعـداد دیودهـای نگه‌دارنده ولتاژ در ساختار تک فاز نشان داده شده در شکل ۱-۵ به صورت نقطه به نقطه تغییر مـی‌کنـد [۱۲]. برای مثال دیود D_1 از یک دیود تشکیل شده است در حالیکه دیود D'_1 از سـه دیـود سـری بـاهم تشکیل شده است. به عبارت دیگر معنی این ساختار این است که افت ولتاژ معکوس ایجاد شـده بـر روی D'_1 سه بار بیشتر از افت ولتاژ دیود D_1 است. البته در عمل به جای اینکه از سه دیود سری استفاده کنیم می‌توان از یک دیود استفاده کرد که تحمل ولتاژ معکوس آن سه برابر بیشتر از دیودهای قبلی باشد. برای یک اینورتر N سطحی از نوع برشگر دیودی مقدار پیک ولتاژ معکوس[3] که روی هر دیود می‌افتد از رابطـه زیر بدست می‌آید.

$$PIV = \frac{V}{N-1} \qquad (۶-۱)$$

دلیل استفاده از دیود های نگه‌دارنده (سری) در ساختار این مبدل این است کـه بتواننـد تغییـرات ولتاژ را تحمل کنند، چون دیودها سری بسته شده‌اند نسبت ولتاژی که هر دیود می‌تواند تحمـل کنـد از

[1] Holding Diodes
[2] Blocking Diodes
[3] Peak Inverse Voltage