دانشکده فنی و مهندسی

گروه مهندسی برق

پایان‌نامه برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته برق قدرت

عنوان:

طراحی توپولوژی جدید برای اینورتر چندسطحی با حداقل عناصر الکترونیک قدرت

استاد راهنما اول:

دکتر داریوش نظرپور

استاد راهنما دوم:

پروفسور سید حسین حسینی

استاد مشاور:

دکتر مهران صباحی

تنظیم و نگارش:

رسول شالچی علیشاه

شهریور ۱۳۹۲

بسم الله الرحمن الرحيم

تأییدیه‌ی هیئت داوران جلسه‌ی دفاع از پایان نامه

پایان نامه به تاریخ شماره مورد پذیرش هیئت

محترم داوران با رتبه و نمره قرار گرفت.

ردیف	سمت	نام و نام خانوادگی	دانشگاه یا موسسه	امضا
۱	استاد راهنما اول و رئیس هیئت داوران	دکتر داریوش نظرپور	دانشگاه ارومیه	
۲	استاد راهنما دوم	دکترسید حسین حسینی	دانشگاه تبریز	
۳	استادمشاور	دکترمهران صباحی	دانشگاه تبریز	
۴	داور داخلی	دکتر وحیدتلاوت	دانشگاه ارومیه	
۵	داور خارجی	دکترمرتضی فرسادی	دانشگاه ارومیه	
۶	نماینده تحصیلات تکمیلی		دانشگاه ارومیه	

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم، پدر و مادری فداکار نسیم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسایم و از ریشه آنها شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختند. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسان بودن را معنا کردند....

چکیده:

در سالیان اخیر، اینورترهای قدرت به مرور زمان دچار تحول شگرفی شده اند. ابتدا اینورتر دو سطحی و سه سطحی مطرح شد که در این سیستم ها شکل موج ولتاژخروجی دارای اعوجاج هارمونیکی زیادی می-باشدو ولتاژاسترس کلیدها زیاداست. برای کاهش اعوجاج هارمونیکی شکل موج ولتاژخروجی و ولتاژاسترس کلیدها،اینورترهای چندسطحی مطرح شدند. اینورترچندسطحی با ساختارهای مرسوم مانندبرشگردیودی، خازن شناور وکاسکاد مطرح شدند. درساختارهای مرسوم تعداد ادوات الکترونیک قدرت مانند کلیدها ، درایورها، دیودها، منابع ولتاژو...بسیارزیاداست. افزایش تجهیزات الکترونیک قدرت در اینورترهای چند سطحی مرسوم موجب افزایش اندازه مدار، هزینه، پیچیدگی و کنترل دشوار مدار اینورترهای چندسطحی می شود.به همین دلیل چندین مداربرای اینورتر چندسطحی طراحی شده است که درمعتبرترین ژورنال های مهندسی برق منتشرشده است.این اینورترهادرجهت کاهش عناصرالکترونیک قدرت موجود در اینورترهای چندسطحی مرسوم ارائه شده است.

در این پایان نامه، ساختارجدیدی برای اینورترهای چندسطحی ارائه می شود که از عناصر الکترونیک قدرت بسیارکمتری استفاده می شود.برای ساختار پیشنهادی، الگوریتم جدیدی برای تعیین مقادیر منابع ولتاژ اینورتر پیشنهادی ارائه می شود.همچنین ساختارهای بهینه جهت حداقل کردن عناصرالکترونیک قدرت همراه با ماکزیمم تعداد سطوح ولتاژخروجی ارائه می شود. اینورتر پیشنهادی با سه ساختارجدیدومهم مقایسه می شود.این مقایسه ها نشان دهنده ی اهمیت و ارزش اینورتر پیشنهادی خواهد بود. در پایان نتایج مربوط به شبیه سازی‌های انجام گرفته در نرم افزار MATLAB وهمچنین نتایج آزمایشگاهی بر روی اینورتر پیشنهادی ارائه خواهند شد.

واژه های کلیدی:

اینورترهای چندسطحی ، ساختارهای مرسوم ، ساختارمتقارن، ساختارنامتقارن،اعوجاج هارمونیکی

فهرست مطالب

فصل اول :ساختاراینورترهای چند سطحی مرسوم.....۱

۱-۱مقدمه.....۲

۱-۲اینورتردوسطحه.....۳

۱-۳ ساختارهای مرسوم اینورترهای چندسطحی.....۴

۱-۳-۱ اینورترچندسطحی برشگردیودی.....۴

۱-۳-۲ اینورترچندسطحی خازن های شناور ۶

۱-۳-۳ اینورترچندسطحی کاسکاد.....۹

۱-۴مقایسه اینورترهای چند سطحه.....۱۱

۱-۴-۱مقایسه کیفی المان‌های تشکیل دهنده ساختارها.....۱۱

۱-۴-۲مقایسه کمی المان‌های تشکیل دهنده ساختارها.....۱۲

۱-۵نقاط قوت و ضعف مبدل‌های چند سطحه مرسوم.....۱۲

۱-۶ خلاصه فصل.....۱۳

فصل دوم: ساختاراینورترهای چندسطحی جدید.....۱۵

۲-۱ مقدمه.....۱۶

۲-۲ ساختاراینورتر چندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۷.....۱۷

۲-۳ ساختاراینورتر چندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۸.....۱۸

۲-۴ ساختاراینورتر چندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۱۲.....۲۰

۲-۵خلاصه فصل.....۲۲

فصل سوم : ساختار اینورترهای چندسطحی جدید پیشنهادی.....۲۳

۳-۱ مقدمه.....۲۴

۳-۲ ساختاراینورتر پایه چندسطحی پیشنهادی.....۲۵

۳-۳ ساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی.....۲۹

۳-۴ الگوریتم تعیین مقادیرمنابع ولتاژدرساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی..... ۳۱
۳-۵ بهینه سازی ساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی..... ۳۲
۳-۵-۱ بهینه سازی ساختار اینورترچند سطحی کاسکاد پیشنهادی جهت تولید ماکزیمم تعداد سطوح ولتاژ با تعداد$IGBT$ثابت..... ۳۲
۳-۵-۲ بهینه سازی ساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی جهت تولیدماکزیمم تعدادسطوح ولتاژ با تعدادخازن (یامنبع ولتاژ)ثابت..... ۳۳
۳-۵-۳ بهینه سازی ساختاراینورترچندسطحی کاسکاد پیشنهادی جهت تولید تعداد سطوح ولتاژثابت با حداقل تعداد$IGBT$ ۳۴
۳-۵-۴ بهینه سازی ساختار اینورترچند سطحی کاسکاد پیشنهادی جهت تولید سطوح ولتاژ ثابت با حداقل تعداددرایور..... ۳۵
۳-۵-۵ بهینه سازی ساختار اینورترچند سطحی کاسکاد پیشنهادی جهت تولید سطوح ولتاژ ثابت با حداقل مقدارولتاژبلوکه شده توسط کلیدها.....۳۶
۳-۶ مقایسه ساختاراینورترچندسطحی کاسکاد پیشنهادی با ساختارهای دیگر ۳۷
۳-۶-۱مقایسه کیفی المان‌های تشکیل دهنده ساختار مقایسه ساختار اینورترچند سطحی کاسکاد پیشنهادی با ساختارهای دیگر از لحاظ تعداد IGBTs.....۳۸
۳-۶-۲ مقایسه ساختار اینورتر چند سطحی کاسکاد پیشنهادی با ساختارهای جدید از لحاظ تعداد *درایور*.....۳۸
۳-۶-۳ مقایسه ساختاراینورترچندسطحی کاسکاد پیشنهادی با ساختارهای جدید از لحاظ ولتاژبلوکه شده توسط کلیدها ۳۹
۳-۶-۴ مقایسه ساختار اینورتر چند سطحی کاسکاد پیشنهادی با ساختارهای جدید از لحاظ ماکزیمم ولتاژبلوکه شده توسط کلیدهای دوجهته.....۴۰
۳-۷ خلاصه فصل ۴۰
فصل چهارم : نتایج شبیه سازی و آزمایشگاهی ۴۲
۴-۱مقدمه..... ۴۹
۴-۲ نتایج شبیه سازی وآزمایشگاهی برای ساختار اینورترپایه۱۵ سطحی پیشنهادی..... ۴۹
۴-۳ نتایج شبیه سازی وآزمایشگاهی برای ساختار اینورترپایه۱۵ سطحی پیشنهادی ۵۱
۴-۴ خلاصه فصل ۵۳

فهرست اشکال

شکل (۱-۱) الف) خروجی مبدل دو سطحه،ب) اینورتر دو سطحه.....۳

شکل(۱-۲) ساختارپنج سطحی اینورتر دیودشناور.....۵

شکل(۱-۳) ساختارپنج سطحی اینورتر خازن های شناور.....۷

شکل(۱-۴) ساختار اینورتر چند سطحی خازن های شناور.....۹

شکل(۲-۱) ساختارپایه اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۷.....۱۷

شکل(۲-۲) ساختاربسط یافته اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۷.....۱۸

شکل(۲-۳) ساختارپایه اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۸.....۱۹

شکل(۲-۴) ساختارکلی اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۰۸.....۲۰

شکل(۲-۵) ساختارپایه اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۱۲.....۲۱

شکل(۲-۶) ساختاربسط یافته اینورترچندسطحی پیشنهادی درسال۲۰۱۲.....۲۲

شکل(۳-۱) ساختارپایه اینورترچندسطحی *(BSMI)* پیشنهادی.....۲۵

شکل(۳-۲) نوع شکل موج ولتاژخروجی ساختارپایه پیشنهادی (V_o).....۲۶

شکل(۳-۳) تعداد $IGBT$ (N_{IGBT}) مورد نیاز به ازای تعداد سطوح ولتاژ (N_{level}) در ساختار پایه متقارن پیشنهادی وساختارمرسوم کاسکاد متقارن.....۲۷

شکل(۳-۴) تعداددرایورراه اندازی (N_{driver})موردنیاز به ازای تعدادسطوح ولتاژ (N_{level})در ساختارپایه متقارن پیشنهادی وساختارمرسوم کاسکاد متقارن.....۲۸

شکل(۳-۵) متعادل کردن ولتاژخازن هادرساختارپایه متقارن بااستفاده از کانورترDC/DC..... ۲۸

شکل(۳-۶) متعادل کردن ولتاژخازن هادرساختارپایه متقارن بااستفاده از ترانسفورماتورتپ چنجر.....۲۹

شکل(۳-۷) ساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی.....۳۰

شکل(۳-۸) تغییرات $n\psi\,(2n+3)^{1/(2n+4)}$.....۳۳

شکل(۳-۹) تغییرات $n\psi\,(2n+3)^{1/(n+1)}$.....۳۴

شکل(۳-۱۰) تغییرات $n\downarrow \frac{(4+2n)}{\ln(2n+3)}$.....۳۵

شکل(۳-۱۱) تغییرات $n\downarrow \frac{(4+n)}{\ln(2n+3)}$.....۳۵

شکل(۳-۱۲) تغییرات $n\downarrow \frac{P}{2(n+1)}+1$.....۳۷

شکل(۳-۱۳) تعداد IGBT (N_{IGBT})موردنیاز به ازای تعدادسطوح ولتاژ (N_{level})در ساختارکاسکاد پیشنهادی وساختارهای کاسکاد پیشنهادی جدید.....۳۸

شکل(۳-۱۴) تعداددرایور (N_{driver})موردنیاز به ازای تعدادسطوح ولتاژ (N_{level})در ساختارکاسکاد پیشنهادی وساختارهای کاسکاد دیگر.....۳۹

شکل(۳-۱۵) ولتاژبلوکه شده توسط کلیدها(V_{switch})دراینورترچندسطحی کاسکاد پیشنهادی وساختارهای کاسکاد پیشنهادی دیگر.....۳۹

شکل(۳-۱۶) ماکزیمم ولتاژ بلوکه شده توسط کلیدها (V_{switch}) در اینورتر چند سطحی کاسکاد پیشنهادی و ساختارهای کاسکاد پیشنهادی دیگر.....۴۰

شکل (۴-۱) ساختار اینورترپایه۱۵ سطحی پیشنهادی.....۴۲

شکل (۴-۲) روش‌های مختلف مدولاسیون در مبدل‌های چند سطحه بر اساس فرکانس کلید زنی.....۴۴

شکل(۴-۳) شکل موج اینورتر۱۵ سطحی.....۴۵

شکل (۴-۴) بلوک دیاگرام کنترل کلیدها.....۴۶

شکل(۴-۵) شکل موج ولتاژوجریان خروجی ساختار اینورترپایه۱۵ سطحی پیشنهادی بصورت شبیه سازی و آزمایشگاهی.....۴۸

شکل (۴-۶) ساختار اینورترکاسکاد۲۵ سطحی پیشنهادی.....۴۹

شکل (۴-۷) سخت افزار ساختار اینورترکاسکاد۲۵ سطحی پیشنهادی.....۴۹

شکل(۴-۸) شکل موج ولتاژ وجریان خروجی ساختار اینورترپایه۲۵ سطحی کاسکاد پیشنهادی بصورت شبیه سازی و آزمایشگاهی.....۵۱

شکل(۴-۹) شکل موج ولتاژ تمامی کلیدها شامل S_1، S_2 ، $(T_1\text{-}T_4)$ و $(T_5\text{-}T_8)$ ۵۲

فهرست جداول

جدول(۱-۱)حالت های کلیدزنی اینورتر پنج سطحی دیودشناور.....۶

جدول(۱-۲)حالت های کلیدزنی اینورتر خازن های شناورجهت تولید پنج سطح درولتاژخروجی.....۷

جدول (۱-۳) ولتاژ و جریان روی المان‌های ساختار های مختلف.....۱۱

جدول (۱-۴) تعداد المان‌های به کار رفته در ساختمان مبدل‌های چند سطحه مرسوم.....۱۲

جدول(۳-۱) شرایط کلیدزنی اینورترچندسطحی(SMI) پیشنهادی برای تولید سطوح مختلف.....۲۶

جدول(۳-۲) شرایط کلیدزنی برای هرسطح ولتاژ ساختاراینورترچندسطحی کاسکادپیشنهادی.....۳۱

جدول(۴-۱)حالت های کلیدزنی اینورتر پنج ۱۵ سطحی.....۴۶

جدول(۴-۲)حالت های کلیدزنی اینورتر پنج ۲۵ سطحی.....۵۰

جدول (۴-۳) ماکزیمم ولتاژبلوکه شده کلیدهای اینورتر۲۵ سطحی.....۵۳

فصل اول

ساختار اینورترهای چندسطحی

مرسوم

۱-۱ مقدمه:

در سه دهه اخیر،اینورترهای قدرت به مرورزمان دچار تحول عظیمی شده‌اند. ابتدا اینورتر دو سطحی مورد استفاده قرارمی‌گرفت که در این سیستم شکل موج خروجی دارای دو سطح خروجی مثبت و منفی می‌باشد. دراینورتر دو سطحی،شکل موج ولتاژخروجی اعوجاج هارمونیکی بالایی دارد و ولتاژ استرس کلیدها زیاد است. سپس اینورتر سه سطحی مطرح شد که در این ساختار علاوه بر دو سطح قبلی شکل موج سطح صفر نیز مابین آنها اضافه می‌گردد. این کار با انجام عمل حذف ولتاژی در اینورترها صورت می‌گیرد. در اینورتر سه سطحی، اعوجاج هارمونیکی شکل موج ولتاژخروجی بالایی نسبت به اینورتر دو سطحی کمتر است. به دلیل مشکلات ناشی از اعوجاج هارمونیکی بالا درشکل موج ولتاژخروجی و ولتاژاسترس بالای کلیدها که منجر به کاهش بازده اینورتر می شود،محققان را به فکر طراحی اینورترهای چند سطحی انداخت. اینورتر چند سطحی یک سیستم الکترونیک قدرت است که می‌تواند با استفاده از چندین منبع ولتاژDC به عنوان ورودی، یک شکل موج ولتاژ سینوسی را در خروجی تولید کند. اینورترهای چند سطحی درمقایسه با اینورترهای دوسطحی و سه سطحی دارای مزایای زیر می‌باشد:

- ✓ تولید شکل موج خروجی با کیفیت بالا
- ✓ کاهش اعوجاج هارمونیکی
- ✓ کاهش تلفات کلیدزنی
- ✓ کاهش استرس dv/dt روی کلیدها

اینورترهای چند سطحی معایبی نیز دارند، ازجمله این که برای ایجاد سطوح بیشتر درخروجی تعداد ادوات الکترونیک قدرت افزایش می یابد. هر چند که دراینورترهای چندسطحی ازکلیدهای با ولتاژ نامی کم استفاده می‌شود اما هرکلید به مدار راه‌اندازو مدارمحافظ نیاز دارد که این منجر به افزایش هزینه، پیچیدگی مدار کنترلی، کاهش قابلیت اطمینان و افزایش اندازه مدارمی‌شود.

در این فصل ساختار اینورترهای مرسوم شامل اینورتردوسطحی، اینورتر برشگردیودی، اینورتر خازن شناور و اینورترکاسکاد توضیح داده خواهد شد.

۱-۲ اینورتر دو سطحی

شمای کلی یک اینورتر دو سطحی در شکل(۱-۱) (ب) نشان داده شده است . همان طور که در شکل نشان داده شده است این اینورتر از دو کلید و دو عدد خازن با ظرفیت‌های یکسان تشکیل شده است که با توجه به نحوه کلید زنی آن‌ها دارای دو سطح ولتاژ $+\frac{V_{DC}}{2}$ و $-\frac{V_{DC}}{2}$ می‌باشد . زمانی که کلید S_1 روشن شود سطح ولتاژ خروجی $+\frac{V_{DC}}{2}$ و زمانی که کلید S_2 روشن شود ولتاژ خروجی دارای سطح ولتاژ $-\frac{V_{DC}}{2}$ خواهد بود . شکل موج خروجی این مبدل به صورت شکل(۱-۱) (الف) خواهد بود . مقدار ولتاژ موثر این مبدل از رابطه‌ی زیر حاصل می‌شود:

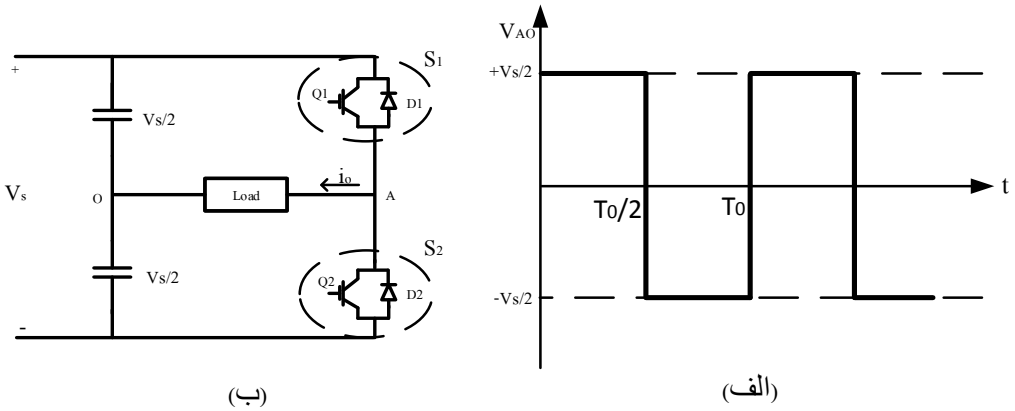
$$V_o = \sqrt{\frac{2}{T_0}\int_0^{\frac{T_0}{2}} \frac{V_s^2}{4} dt} = \frac{V_s}{2} \qquad (۱-۱)$$

ولتاژ لحظه ای خروجی توسط سری فوریه به صورت زیر بیان می‌شود :

$$V_o = \sum_{n=1,2,3,..}^{\infty} \frac{2V_s}{n\pi} Sin\, n\omega t \qquad (۱-۲)$$

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

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



شکل(۱-۱) الف) خروجی مبدل دو سطحی ب) اینورتر دو سطحه

در یک بار سلفی جریان بار نمی‌تواند با تغییر ولتاژ خروجی به صورت ناگهانی تغییر جهت پیدا کند . اگر Q_1 در زمان $t = \frac{T_o}{2}$ خاموش شود ، جریان بار تا زمانی که مقدار آن به صفر برسد، از طریق D_2، بار و نیمه‌ی پایینی منبع ادامه خواهد داشت . به همین منوال زمانی که Q_2 در زمان $t = T_o$ خاموش می‌شود ، جریان بار از طریق D_1 ، بار و نیمه بالایی منبع مستقیم هدایت می‌گردد. هنگامی که D_1 وD_2 هدایت می‌کنند انرژی دوباره به منبع باز گردانده می‌گردد . به این دو دیود ، دیود های فیدبک گفته می-

شود . برای یک بار R-L جریان لحظه ای I_o را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد:

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

که در آن $\theta_n = tan^{-1}\left(\frac{n\omega l}{R}\right)$ است . اگر I_{o1} مقدار موثر جریان اساسی بار باشد ، توان اساسی خروجی به ازای $(n=1)$ به صورت زیر خواهد بود:

$$P_{o1} = V_1 I_{o1} cos\theta_1 = {I_{o1}}^2 R = \left[\frac{2V_s}{\sqrt{2}\pi\sqrt{R^2 + (\omega l)^2}}\right]^2 R \qquad (۵-۱)$$

با توجه به بالا بودن هارمونیک در مبدل‌های دو سطحی و عدم کارایی مناسب در صنعت ؛ اینورترهای چند سطحی معرفی گردید.

۱–۳ ساختارهای مرسوم اینورترهای چندسطحی

به طورکلی ساختارهای مرسوم اینورترهای چندسطحی به سه دسته " اینورترچندسطحی برشگردیودی"،" اینورترچندسطحی خازن شناور"و"اینورچندسطحی کاسکاد"تقسیم بندی می‌شود.

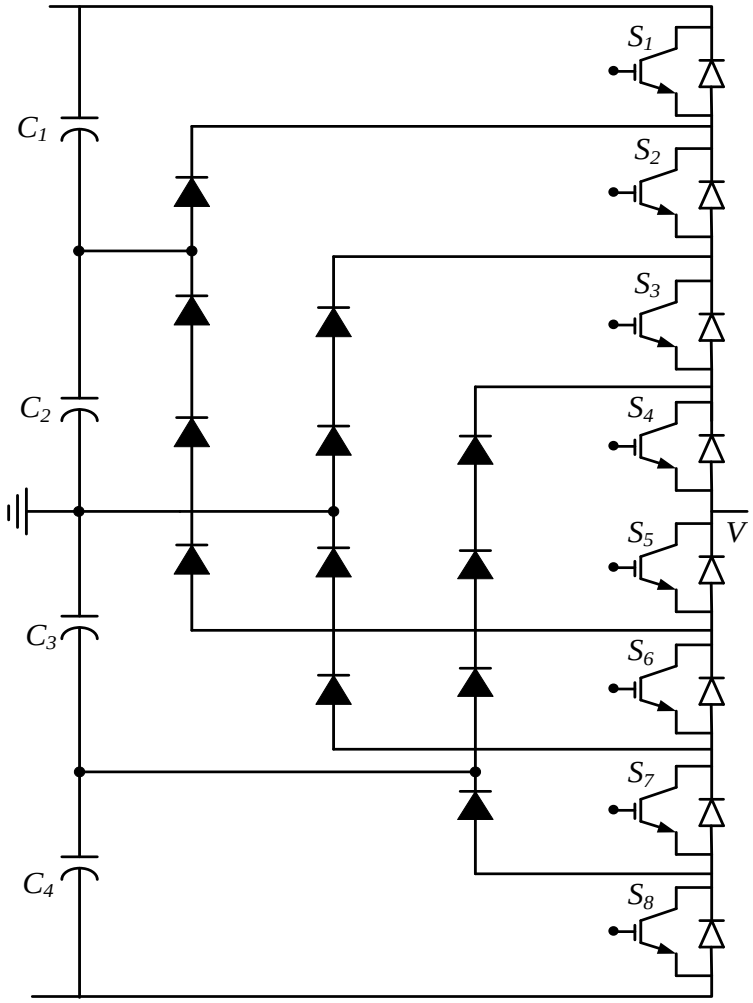
۱–۳–۱ اینورترچند سطحی برشگردیودی

اینورتر چند سطحی برشگر دیودی[1] برای اولین بار درسال ۱۹۸۰ توسط *Nabae* مطرح شد[1]. اینورتر چند سطحی برشگر دیودی به کمک خازن های سری ولتاژ باس DC راتقسیم کرده وبدین ترتیب سطوح مختلف ولتاژراتولید می‌کند. یک اینورتر برشگر دیودی جهت ایجاد سطح ولتاژ به خازن باس DC احتیاج دارد.یک متناوب ساز m سطحی برشگردیودی به $(m-1)$ خازن روی گذرگاهDC، $2(m-1)$ کلید و $(m-1)(m-2)$ دیود نیاز دارد[2]. شکل (۱-۲) ساختار اینورتر پنج سطحی برشگر دیودی رانشان می‌دهد. همان طور که از شکل برمی آید المان‌های مورد استفاده قرار گرفته در این مبدل عبارتند از بانک خازن مقسّم ولتاژ ، دیود های نگه دارنده ، دیود های بلوکه کننده و کلیدها. در این مدار خازن‌ها نقش تقسیم کردن ولتاژ DC ورودی را به سطوح مورد نظر را دارند . در حالت متقارن ظرفیت این خازن‌ها با هم برابر است.[1] برای یک مبدل m سطحه از نوع دیود شناور مقدار ولتاژ معکوس که روی هر دیود می‌افتد از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V_r = \frac{V_{dc}}{m-1} \qquad (۶-۱)$$

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

[1] Diode-clamped multilevel inverter
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~



شکل(۱-۲) ساختار پنج سطحی اینورتر برشگر دیودی

دلیل استفاده از دیود های نگه‌دارنده (سری) در ساختار این مبدل این است که بتوانند تغییرات ولتاژ را تحمل کنند[3]. چون دیودها سری بسته شده‌اند نسبت ولتاژی که هر دیود می‌تواند تحمل کند از رابطه (۱-۶) بدست می‌آید. البته این نحوه بستن دیودها به هم فقط برای کاربردهای ولتاژ بالا انجام می‌شود در حالی که برای کاربردهای ولتاژ پایین نیازی به استفاده از مجموعه سری دیودها نیست و معمولاً از یک دیود استفاده می‌کنند[4].

جدول(۱-۱)حالت های کلیدزنی اینورتر پنج سطحی دیودشناورشکل فوق راارائه می‌کند. در این جدول عدد ۱ نشانگر روشن بودن کلید و عدد 0 نشانگر خاموش بودن و عدم هدایت کلید می‌باشد.

با افزایش تعداد سطوح ولتاژ در این مبدل شکل موج خروجی سینوسی‌تر می‌گردد. ولی از مبدل دیود کلمپ معمولاً به دلیل اینکه تعداد دیودهای مورد استفاده با توان دوم تعداد سطوح رابطه دارد و با افزایش تعداد سطوح ولتاژ تعداد دیودهای مورد نیاز به شدت افزایش می‌یابد ، در سطح ولتاژ خیلی بالا مورد استفاده قرار نمی‌گیرد[5] . از مزیت‌های این اینورتر سادگی در ساختار و کلید زنی می‌باشد .

جدول(۱-۱)حالت‌های کلیدزنی اینورتر پنج سطحی برشگردیودی.

وضعیت کلیدها								ولتاژخروجی
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
0	1	1	1	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
0	0	1	1	1	1	0	0	0
0	0	0	1	1	1	1	0	$-V_{dc}/2$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/4$

یکی از راه‌های حل نامتعادلی ولتاژ در اینورترهای چند سطحی تعویض خازن‌ها با یک منبع ولتاژ DC ثابت کنترل شده از قبیل رگولاتورهای ولتاژ مدولاسیون پهنای پالس یا باتری‌ها است. راه دیگر برای رفع مشکل نامتعادلی ولتاژ در این نوع مبدل استفاده از کنترل کننده‌های کمکی است. به همین دلیل است که با افزایش سطح در این نوع مبدل مسئله نامتعادلی ولتاژ در خازن‌ها بیشتر نمایان شده و کنترلر اضافی که باید استفاده شود پیچیده‌تر شده و نهایتاً استفاده از سطوح بالا در این مبدل‌ها رایج و متداول نخواهد بود. بعضی از کلیدها که عموماً کلیدهای میانی در ساختار اینورتر برشگر دیودی هستند، چون مدت زمان بیشتری هدایت می‌کنند بنابراین چگالی جریانی عبوری در آن‌ها نسبت به کلیدهای خارجی ساختار این نوع مبدل بیشتر خواهد بود. همچنین محل قرار گرفتن دیودهای نگه‌دارنده در این نوع مبدل‌ها به دلیل اینکه باید سطوح مختلفی از ولتاژهای معکوس را تحمل کنند حائز اهمیت است[6].

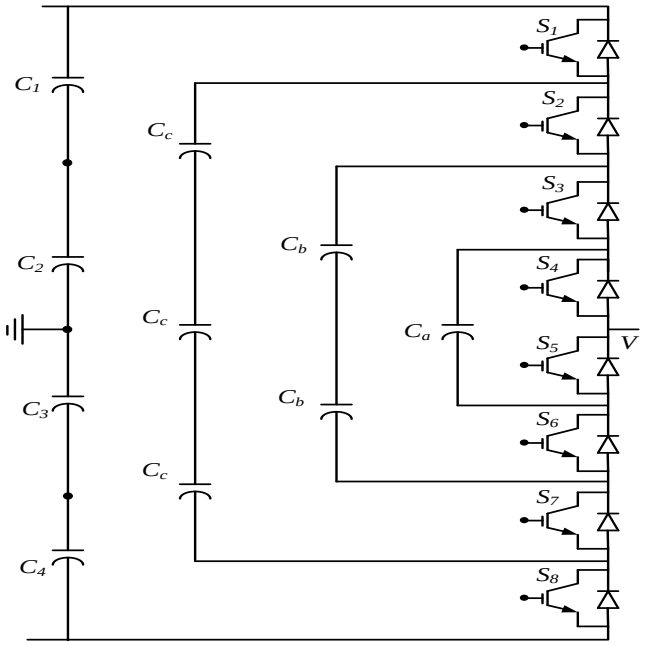
این مبدل عموماً به صورت تک فاز می‌باشد و برای استفاده در حالت سه فاز ، برای هر یک از فازها یک مبدل قرار داده و با توجه به کلید زنی‌ها ، می‌توان شکل موج‌هایی با اختلاف فاز مناسب را تولید نمود.

۱-۳-۲ اینورترچندسطحی خازن های شناور

اینورتر چند سطحی خازن‌های شناور[1]به صورت یک مدار نردبانی ازخازن های شناوربا ولتاژهای متفاوت است.اندازه افزایش ولتاژ بین دوخازن،اندازه سطوح ولتاژرا درخروجی تعیین می کند. یک اینورتر خازن شناورجهت ایجاد سطح ولتاژ به خازن باسDC احتیاج دارد. ساختار مبدل ولتاژ چند سطحه خازن شناور به جهت تشابه ، شبیه‌ترین مبدل به مبدل دیود کلمپ می‌باشد . تفاوت این مبدل با مبدل دیود کلمپ در استفاده از خازن به جای دیود های نگه دارنده می‌باشد . در این مبدل از خازن‌های شناور به منظور تولید ولتاژ مورد نظر در خروجی استفاده می‌کنند[7] .

[1] Flying capacitor multilevel inverter

در ساختار مبدل چند سطحی خازن شناور، همانند ساختار برشگردیودی تعداد کلیدهای به کار رفته برابر است با $2(m-1)$ می‌باشد که در آن m تعداد سطح ولتاژ مورد نظر می‌باشد. تعداد خازن‌های مقسم ولتاژ باس DC هم برابر با $(m-1)$ خواهدبود که محل قرار گیری این خازن‌ها همانند اینورتر برشگر دیودی در ورودی مبدل می‌باشد . المان دیگری که در این ساختار مورد استفاده قرار گرفته خازن‌های شناور می‌باشد. تعداد خازن‌های شناور مورد نیاز در این مبدل برابر با $\frac{(n-1)(n-2)}{2}$ می‌باشد. شکل (۱-3)زیر ساختار اینورترپنج سطحی برشگر خازنی رانشان می دهد[8].



شکل(۱-3) ساختار پنج سطحی اینورتر خازن های شناور

جدول(۱-۲)حالت های کلیدزنی اینورتر پنج سطحی خازن شناور راارائه می کند.

جدول(۱-۲)حالت‌های کلیدزنی اینورتر خازن های شناورجهت تولید پنج سطح درولتاژخروجی

وضعیت کلیدها								ولتاژ خروجی
S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	
1	1	1	1	0	0	0	0	$V_{dc}/2$
1	1	1	0	1	0	0	0	$V_{dc}/4$
1	1	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	1	0	$-V_{dc}/2$
0	0	0	0	1	1	1	1	$-V_{dc}/4$

همان طور که در ساختار اینورتر برشگر دیودی افت ولتاژ جذب شده توسط دیودها متفاوت بود در این ساختار هم خازن‌ها این‌گونه رفتار می‌کنند. در حالت پایدار مقدار ولتاژ در خازن‌های نزدیک به کلیدها کمتر از مقدار ولتاژ در خازن‌های نزدیک به منابع ولتاژ خواهد بود. مقدار ولتاژی که هر یک از خازن‌ها می‌توانند داشته باشند از رابطه زیر حاصل می‌گردد:

$$\mathrm{V}_c = \frac{V_{dc}}{m-1} \qquad (۷-۱)$$

در رابطه فوق m تعداد سطوح ولتاژ می‌باشد. در این مبدل با توجه به اینکه هر جفت کلید نمی‌تواند همزمان روشن و یا خاموش باشند،این ساختار در مقایسه با اینورتر دیود کلمپ دارای چندین ویژگی جالب و منحصر به فرد است . یکی از ویژگی‌های این مبدل این است که دیود های نگهدارنده اضافی در این ساختار وجود ندارد. نبود دیود های نگه دارنده سبب می‌شود که جریان معکوس نیز بتواند در مدار شارش پیدا کند. در نتیجه این عمل تعداد حالات کلید زنی افزایش می‌یابد و برای دست یافتن به یک سطح ولتاژ مطلوب حالت‌های گوناگونی را می‌توان در نظر گرفت [9].

همانند مبدل چند سطحه نوع دیود شناور مبدل‌های چند سطحه با خازن معلق هم دارای دو شرط برای عملکرد هر زوج کلید می‌باشد:

- ✓ برای هر زوج کلید در هر لحظه یکی از آن‌ها روشن و دیگری باید در موقعیت خاموش باشد
- ✓ در طی یک دوره تناوب هر کلید یک بار تغییر حالت خواهد داد.

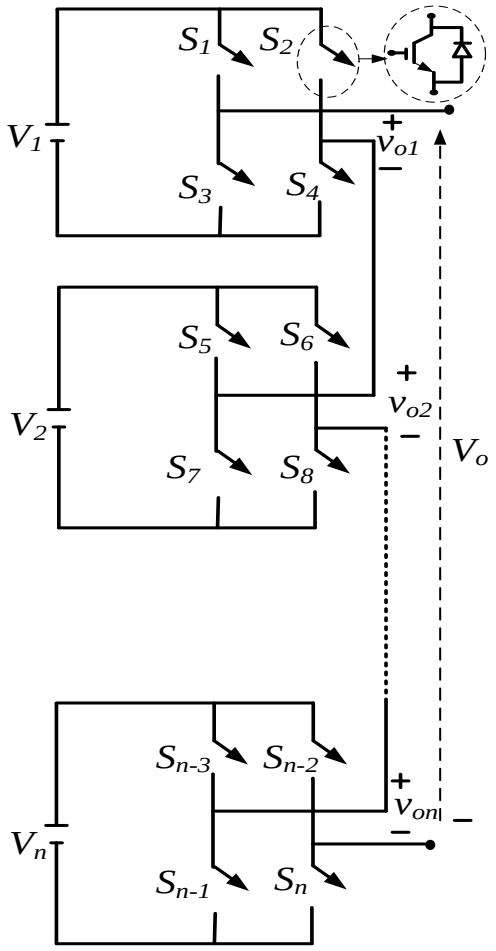
ایجاد تعادل در شارژ خازن‌ها هم توسط روش‌های کنترلی امکان‌پذیر خواهد بود. جریان از طریق خازن‌هایی که در موقعیت فعال قرار دارند، می‌توانند با انتقال انرژی از خازن‌هایی که کاملاً شارژ شده‌اند به خازن‌هایی که کمتر شارژ شده‌اند تعادل را در ولتاژ خازن‌های مسیر بسته هدایت برقرار سازند. اگر در روش ارائه شده برای متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها در حین انتقال توان اکتیو از حالات کلید زنی اضافی استفاده شده باشد در این صورت این روش در عمل قابل اعمال نخواهد بود. اما اگر در روش کنترلی ارائه شده از فرکانس‌های کلید زنی استفاده شده باشد ممکن است این روش به عنوان یک روش درست و صحیح برای متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها می‌تواند بکار رود. در این نوع مبدل هم همانند نوع برشگر دیودی ، وجود نامتعادلی در ولتاژ خازن‌ها در موقع انتقال توان اکتیو به دلیل تفاوت در مدت زمان شارژ و تخلیه خازن‌ها است. اما نکته مهم که باید مورد توجه قرار بگیرد این است که در اینورتر نوع برشگر دیودی این نامتعادلی با استفاده از کنترلر خارجی قابل رفع شدن بود اما در اینورتر نوع خازن شناور با حذف روش‌های غیرضروری کلید زنی می‌توان به متعادل‌سازی ولتاژ خازن‌ها دست پیدا کرد. اما در موقع انتقال توان راکتیو این نوع از مبدل‌ها همانند نوع برشگر دیودی مشکلی در زمینه تعادل ولتاژ خازن‌ها نخواهند داشت[10].

این متناوب سازبه تعدادزیادی خازن ذخیره نیازداردوساخت اینورتربا خازن های حجیم، مشکل وگران است. برای انتقال توان حقیقی، فرکانس وتلفات کلیدزنی زیاداست وکنترل متناوب ساز مشکل می-باشد. .تعدادزیادخازن های ذخیره ساز امکانات بالقوه راهنگام قطع تغذیه فراهم می کند.میزان هماهنگ ها،مانند اینورترچندسطحی برشگردیودی،ضمن داشتن سطوح بیشتر، به قدری پایین است که میتوان

ازفیلتر چشم پوشی کرد.هم توان حقیقی وهم توان واکنشی رامیتوان کنترل کرد.

۱-۳-۳ اینورترچند سطحی کاسکاد

اینورترچندسطحی کاسکاد[1]شامل یک سری واحدهای متناوب سازپل H است.وظیفه ی کلی متناوب سازپل H،ساخت ولتاژ مورد نظر از چند منبعDC ی مجزاست که می تواند باتری،سلول خورشیدی یا سوختی باشد[11]. ساختار اینورتر پنج سطحی کاسکاد در شکل (۱-۴)نشان داده شده است.



شکل(۱-۴) ساختار اینورتر چند سطحی کاسکاد

ولتاژخروجی اینورتر کاسکاد برابر است با مجموع ولتاژهای خروجی همه ی پل های Hمی باشدکه بارابطه زیرنشان داده می شود:

$$V_o = v_{o1} + v_{o2} + ... + v_{on} \qquad (۱-۸)$$

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

[1]Cascade multilevel inverter
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

مقادیر ولتاژمنابع DC در اینورترکاسکاد در تعداد سطوح ولتاژ خروجی تاثیر دارد.به طورکلی سه روش برای تعیین منابع DC پیشنهاد شده است:

روش اول-دراین روش مقادیر منابعDC یکسان درنظرگرفته می‌شود:

$$V_1=V_2=....=V_n \qquad (۹-۱)$$

به دلیل اینکه دراین روش مقادیر منابعDC یکسان می‌باشد به این نوع پیکربندی، پیکربندی متقارن[۱] گفته می‌شود. با استفاده از این روش تعداد سطوح ولتاژ خروجی(N_{level}) با استفاده از رابطه زیربه دست می آید:

$$N_{level}=2n+1 \qquad (۱۰-۱)$$

روش دوم-برای این روش دومعادله زیرجهت تعیین مقادیر منابعDC استفاده می شود:

$$V_1=V \qquad (۱۱-۱)$$

$$V_n=2^n\times V \qquad n>1 \qquad (۱۲-۱)$$

با استفاده از روابط فوق، تعداد سطوح ولتاژ خروجی برابر است با:

$$N_{level}=2^{n+1}-1 \qquad (۱۳-۱)$$

روش سوم-در این روش زیرجهت تعیین مقادیر منابع DC روابط زیراستفاده می شود:

$$V_1=V \qquad (۱۴-۱)$$

$$V_n=3^n\times V \qquad (۱۵-۱)$$

دراین روش تعدادسطوح ولتاژتولیدی درشکل موج خروجی بااستفاده ازرابطه زیربه دست می آید:

$$N_{level}=3^n \qquad (۱۶-۱)$$

مقادیر ولتاژ منابع DC درروش‌های دوم و سوم یکسان نمی باشد.به همین دلیل به این نوع پیکربندی، پیکربندی غیرمتقارن[۲] اطلاق می شود.

بامقایسه سه روش اشاره شده، روش اول تعیین منابع ولتاژتعدادسطوح کمتری رادرشکل موج ولتاژ خروجی تولید می کندوروش سوم بیشترین تعدادسطوح ولتاژراتولیدمی کند. همچنین تعداد کلید مورد نیاز اینورترکاسکاد$4n$ می باشد.nدرتمامی روابط فوق نمایانگر تعداد منابع DCمورداستفاده در ساختار اینورتر کاسکادمی باشد.

~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~

[۱] Symmetric configuration

[۲] Asymmetric configuration
~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~~