دانشکده فنی و مهندسی
گروه مهندسی برق‌قدرت

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته مهندسی برق گرایش قدرت

عنوان

بررسی مبدل‌های مولتی‌سل و افزایش بازده در آنها

استاد راهنما
دکتر مرتضی فرسادی

تنظیم و نگارش
فردین مظلوم زوارق

بهمن‌ماه۹۲

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر عزیزم

که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی ایستادگی را تجربه نمایم

مادر مهربانم

دریای بیکران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر

چکیده

مبدل‌های ولتاژ جزء مهم‌ترین ادوات الکترونیک قدرت می‌باشند که در بخش‌های مختلف صنعت به کار می‌روند.در این بین مبدل‌های چند سطحی به دلیل مزایایی که نسبت به نوع دو سطحی دارند بیشتر مورد توجه هستند. از اینرو در این پایان‌نامه ابتدا انواع مبدل‌های چندسطحی مورد بررسی قرار می‌گیرد و روش‌های مختلف مدولاسیون و کلیدزنی در آنها مورد بررسی قرار می‌گیرد. از جمله مهمترین مبدل‌های چندسطحی، مبدل خازن شناور می‌باشد. یک مبدل خازن شناور n سلولی قادر به تولید n+1 سطح ولتاژ در خروجی است.از ساختارهای جدیدی که برای این مبدل ارائه شد، ساختار مبدل خازن شناور دوبل DFCM بود که با اضافه کردن دو کلید فرکانس پایین تعداد سطوح ولتاژ را دو برابر کرد، همچنین تعداد منابع DC نیز از دو به یک کاهش یافت. این ساختار حجم و هزینه تمام شده ساخت مبدل مالتی سل خازن شناور به میزان ۵۰ درصد کاهش داد. ساختار بعدی که ارائه شد با تولید سطوح ولتاژ فرد مابین سطوح ولتاژ زوج، قادر بود تعداد سطوح ولتاژ خروجی را دوبرابر کند. این مبدل،با نام مبدل خازن شناور دوبل بهبود یافته IDFCM با ترکیب فقط یک منبع DC و دو کلید فرکانس بالا به مبدل خازن شناور دوبل بدست می‌آید. در این تحقیق ساختار جدیدی معرفی شده است که تعداد سطوح ولتاژ خروجی را نسبت به نوع IDFCM دوبرابر افزایش می‌دهد. همچنین روش مدولاسیون جدید برای کلیدزنی مبدل ارائه شده توضیح داده شده است. شبیه‌سازی‌های انجام شده در محیط MATLAB/SIMULINK بیانگر مزایای این مبدل در مقایسه با دیگر ساختارهای ارائه شده می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: مبدل‌های چندسلولی، مبدل خازن شناور، مبدل خازن شناور دوبل، مبدل خازن شناور دوبل بهبود یافته

فهرست مطالب

مقدمه ۱

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۲ مبدلهای منبع ولتاژ ۲

بررسی منابع ۴

۲-۱ مقدمه ۵

۲-۲ مبدلهای چندسطحی ۷

۲-۲-۱ مفهوم مبدلهای چندسطحی ۷

۲-۲-۲ مبدلهای چند سطحی ۸

۲-۲-۲-۱ مبدل منبع ولتاژ چند سطحی دیود کلمپ با نقطه خنثی ۸

۲-۲-۲-۲ مبدل منبع ولتاژ چند سلولی پل H سری ۱۳

۲-۲-۲-۳ مبدل چند سطحی چندسلولی خازن شناور ۲۰

۲-۲-۲-۴ ساختار مبدل های چند سطحی ترکیبی چند سلولی ۲۴

۲-۳ مدولاسیون مبدلهای چند سطحی ۲۵

۲-۳-۱ دسته بندی انواع مدولاسیون مبدلهای چند سطحی ۲۶

۲-۳-۲ مدولاسیون با فرکانس کلیدزنی پایین ۲۸

۲-۳-۲-۱ کنترل بردار فضایی ۲۸

۲-۳-۲-۲ حذف دلخواه هارمونیکها ۲۹

۲-۳-۳ مدولاسیون با فرکانس کلیدزنی بالا ۳۱

۲-۳-۳-۱ روش مدولاسیون شیفت فاز PWM ۳۱

۲-۳-۳-۲ مدولاسیون انتقال سطح PWM ۳۲

۲-۳-۳-۲-۱ فرکانس کلید زنی متغیر ۳۳

۲-۳-۳-۲-۲ فرکانس کلیدزنی ثابت ۳۳

۲-۳-۳-۲-۳ مدولاسیون انتقال سطح هم فاز ۳۵

۲-۳-۳-۲-۴ مدولاسیون انتقال سطح با فاز متفاوت ۳۵

۲-۳-۳-۲-۵ مدولاسیون انتقال سطح با فاز متفاوت متناوب ۳۶

۲-۴ نتیجه گیری ۳۷

بررسی روند بهبود مبدل‌های خازن شناور ۳۸

۳-۱ مقدمه ۳۹

۳-۲ ساختارهای بهبود یافته مبتنی بر ساختار مبدل چندسلولی خازن شناور ۳۹
۳-۲-۱ مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل ۳۹
۳-۲-۲ مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته ۴۲
۳-۳ ساختار جدید پیشنهادی برای مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل ۴۷
۳-۴ مقایسه‌ی مبدل جدید پیشنهادی با ساختارهای مبدل چندسلولی خازن شناور، مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل و مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته ۵۶
بررسی و نتایج ۵۸
۴-۱ مقدمه ۵۹
۴-۲ شبیه‌سازی و بررسی مبدلهای چندسلولی ۵۹
۴-۲-۱ مبدل چندسلولی خازن شناور ۶۰
۴-۲-۲ مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل ۶۲
۴-۲-۳ مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته ۶۴
۴-۳ شبیه‌سازی و بررسی مبدل جدید پیشنهادی ۶۶
۴-۳-۱ شبیه‌سازی و بررسی مبدل جدید پیشنهادی برای حالت دو سلولی ۶۶
۴-۳-۲ شبیه‌سازی و بررسی مبدل جدید پیشنهادی برای حالت سه سلولی ۶۸
نتیجه‌گیری و پیشنهادها ۷۳
۵-۱ نتیجه‌گیری ۷۴
۵-۲ پیشنهادات ۷۵
منابع و مآخذ ۷۶

فهرست اشکال

فصل دوم

شکل ۲-۱: اینورتر منبع ولتاژ نیم پل؛(الف)ساختار قدرت؛(ب)حالتهای کلیدها و ولتاژ خروجی ۵
شکل ۲-۲: اینورتر منبع ولتاژ تمام پل(اینورتر پل H)؛ (الف)ساختار قدرت؛ (ب)حالتهای کلیدها و ولتاژ خروجی ۶
شکل ۲-۳ : مبدل ولتاژ؛ (الف)مبدل دوسطحی؛ (ب) مبدل سه سطحی؛ (ج) مبدل n سطحی ۷
شکل ۲-۴: خروجی ولتاژ یک مبدل نه سطحی ۸
شکل ۲-۵: مبدل دیود کلمپ پنج سطحی ۹
شکل ۲-۶: شکل موج خروجی مبدل دیود کلمپ در صورت عدم اتصال نقطه میانی به زمین ۱۰
شکل ۲-۷: مسیرهای جریان برای سطوح مختلف برای مبدل پنج سطحی دیود کلمپ ۱۲
شکل ۲-۸: شارژ و دشارژ خازنهای C1 و C2 ؛ (الف) تبادل توان اکتیو؛ (ب) تبادل توان راکتیو ۱۳
شکل ۲-۹: ساختار اینورتر پل H سری به عنوان یک سلول در مبدل چند سلولی پل H سری.. ۱۴
شکل ۲-۱۰: مبدل چندسلولی پل H سری 2n+1 سطحی با استفاده از ؛ (الف) n منبع ولتاژ dc ورودی مجزا ؛ (ب) یک منبع ولتاژ ورودی dc و ترانسفورماتورهای ایزوله کننده ۱۵
شکل ۲-۱۱:مبدل چند سلولی پل H سری دوسلولی- پنج سطحی؛ (الف) ساختار قدرت؛ (ب) روش کنترلی ۱۶
شکل ۲-۱۲: ساختار مبدل چندسلولی پل H نامتقارن دو سلولی نه سطحی با استفاده از منابع ولتاژ dc با ضرایب ۳ ..... ۱۸
شکل ۲-۱۳: ساختار مبدل چندسلولی خازن شناور پنج سطحی ۲۰
شکل ۲-۱۴: ساختار مبدل چندسلولی خازن شناور n سلولی- n+1 سطحی ۲۱
شکل ۲-۱۵: مبدل چندسلولی خازن شناور چهار سلولی- پنج سطحی؛ (الف) ساختار قدرت؛ (ب) روش کنترلی ۲۳
شکل ۲-۱۶: مبدل ترکیبی؛ (الف) ساختار مبدل ترکیبی خازن شناور با پل H ؛ (ب) ساختار ترکیبی مبتنی بر سری نمودن دو مبدل دیود کلمپ سه سطحی؛ ۲۵
شکل ۲-۱۷: فلوچارت روشهای مختلف مدولاسیون در مبدلهای چندسطحی براساس فرکانس کلیدزنی ۲۷
شکل ۲-۱۸: کنترل بردار فضایی ۲۹
شکل ۲-۱۹: محل زوایای آتش در یک شکل ولتاژ ۷سطحی ۳۰
شکل ۲-۲۰: (الف)-شکل موج ولتاژ خروجی با انتخاب ضریب مدولاسیون بالا؛ (ب)-شکل موج خروجی با انتخاب ضریب مدولاسیون متوسط؛ (ج)- شکل موج ولتاژ خروجی با انتخاب ضریب مدولاسیون پایین ۳۱
شکل ۲-۲۱: مدولاسیون شیفت فاز PWM برای یک مبدل سه سطحی ۳۲

شکل ۲-۲۲: تقسیم بندی مدولاسیون انتقال سطح ۳۳
شکل ۲-۲۳: مدولاسیون به روش انتقال سطح با فرکانس کلید زنی متغیر ۳۳
شکل ۲-۲۴: مدولاسیون به روش انتقال سطح با فرکانس کلید زنی ثابت ۳۴
شکل ۲-۲۵: مدولاسیون به روش انتقال سطح با فرکانس کلید زنی بهینه ۳۴
شکل ۲-۲۶: مدولاسیون مبدلهای چند سطحی به روش انتقال سطح با فاز متفاوت ۳۵
شکل ۲-۲۷: مدولاسیون مبدلهای چند سطحی به روش انتقال سطح با فاز متفاوت متناوب ۳۶
شکل ۲-۲۸:نحوه تولید پالس با مدولاسیون به روش انتقال سطح با فرکانس کلید زنی ثابت همفاز ۳۶
شکل ۲-۲۹: مدولاسیون به روش انتقال سطح با استفاده از حاملهای سینوسی ۳۷
شکل ۳-۱: مبدل چندسلولی خازن شناور چهار سلولی- پنج سطحی؛ (الف) ساختار قدرت؛ (ب) روش کنترلی مبتنی بر PSPWM ۴۰
شکل ۳-۲: مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل چهار سلولی- نه سطحی؛ (الف) ساختار قدرت؛ (ب) روش کنترلی مبتنی بر PSPWM ۴۱
شکل ۳-۳ : مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته دو سلولی- یازده سطحی؛ (الف) ساختار قدرت؛ (ب) روش کنترلی مبتنی بر PSPWM..... ۴۴
شکل ۳-۴: ساختار چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته n سلولی با $4n+3$ سطح ۴۵
شکل ۳-۵: ساختار جدید پیشنهادی مبدل منبع ولتاژ چندسلولی ترکیبی ۴۷
شکل ۳-۶: حاملهای فاز جابجاشده با قدر مطلق موج سینوسی ۴۸
شکل ۳-۷: شکل موج پلکانی ولتاژ خروجی مرجع ۴۹
شکل ۳-۸ : ولتاژ مرجع مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل ۴۹
شکل ۳-۹: ساختار مبدل پیشنهادی n سلولی با $8n+7$ سطح ۵۳
شکل ۳-۱۰: انواع مبدلهای 8n+7 سطحی ۵۵
شکل ۳-۱۱: میزان انرژی ذخیره شده در مبدل جدید پیشنهادی در مقایسه با انواع دیگر مبدلهای چند سلولی برای تعداد سطوح ولتاژ خروجی برابر با 8n+7 و مقدار پیک ولتاژ یکسان ۵۷
شکل ۴-۱: یک مبدل چندسلولی خازن شناور ۳سلولی-چهار سطحی ۶۰
شکل ۴-۲: ولتاژ خازنهای شناور مبدل چندسلولی خازن شناور (FCM) سه سلولی-چهار سطحی ؛ (الف) به ازای بار اهمی بدون استفاده از فیلتر خروجی RLC ؛ (ب) به ازای بار اهمی-سلفی با استفاده از فیلتر خروجی RLC ۶۱
شکل ۴-۳: ولتاژ خروجی و جریان بار در حالت دائم مبدل چندسلولی خازن شناور (FCM) سه سلولی-چهار سطحی ۶۱
شکل ۴-۴: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی مبدل چندسلولی خازن شناور (FCM) سه سلولی-چهار سطحی ۶۲
شکل ۴-۵ : مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل سه سلولی-هفت سطحی ۶۲

شکل ۴-۶: ولتاژ خازنهای شناور مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل سه سلولی-هفت سطحی ؛ (الف) به ازای بار اهمی بدون استفاده از فیلتر خروجی RLC ؛ (ب) به ازای بار اهمی-سلفی با استفاده از فیلتر خروجی RLC ۶۳
شکل ۴-۷: ولتاژ خروجی و جریان بار در حالت دائم مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل سه سلولی-هفت سطحی ۶۳
شکل ۴-۸: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل سه سلولی-هفت سطحی ۶۴
شکل ۴-۹: مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته سه سلولی- پانزده سطحی ۶۴
شکل ۴-۱۰: ولتاژ خازنهای شناور مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته سه سلولی-پانزده سطحی ؛ (الف) به ازای بار اهمی بدون استفاده از فیلتر خروجی RLC ؛ (ب) به ازای بار اهمی-سلفی با استفاده از فیلتر خروجی RLC ۶۵
شکل ۴-۱۱: ولتاژ خروجی و جریان بار در حالت دائم مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته سه سلولی- پانزده سطحی ۶۵
شکل ۴-۱۲: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته سه سلولی- پانزده سطحی ۶۶
شکل ۴-۱۳: مبدل پیشنهادی دو سلولی-بیستوسه سطحی ۶۶
شکل ۴-۱۴: ولتاژ خازنهای شناور مبدل پیشنهادی دو سلولی-بیستوسه سطحی ؛ (الف) به ازای بار اهمی بدون استفاده از فیلتر خروجی RLC ؛ (ب) به ازای بار اهمی-سلفی با استفاده از فیلتر خروجی RLC ۶۷
شکل ۴-۱۵: ولتاژ خروجی و جریان بار در حالت دائم مبدل پیشنهادی دو سلولی-بیستوسه سطحی ۶۷
شکل ۴-۱۶: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی مبدل پیشنهادی دو سلولی-بیستوسه سطحی ۶۸
شکل ۴-۱۷: مبدل پیشنهادی سه سلولی-سیویک سطحی ۶۸
شکل ۴-۱۸: ولتاژ خازنهای شناور مبدل پیشنهادی سه سلولی-سیویک سطحی ؛ (الف) به ازای بار اهمی بدون استفاده از فیلتر خروجی RLC ؛ (ب) به ازای بار اهمی-سلفی با استفاده از فیلتر خروجی RLC ۶۹
شکل ۴-۱۹: ولتاژ خروجی و جریان بار در حالت دائم مبدل پیشنهادی سه سلولی-سیویک سطحی ۶۹
شکل ۴-۲۰: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی مبدل پیشنهادی سه سلولی-سیویک سطحی ۷۰
شکل ۴-۲۱: مقایسه تلفات کلیدزنی در مبدلهای خازن شناوردوبل، دوبل بهبود یافته و مبدل پیشنهادی ۷۰
شکل ۴-۲۲: ولتاژ و جریان خروجی در حالت ۲۳ سطحی برای هر ۴ نوع مبدل ۷۱
شکل ۴-۲۳: طیف فرکانسی ولتاژ خروجی در حالت ۲۳ سطحی برای هر ۴ مبدل ۷۱

فهرست جداول

فصل دوم

جدول ۲-۱: انواع حالات مختلف کلیدزنی برای مبدل دیود کلمپ پنج سطحی ۱۱
جدول ۲-۲: حالتهای کلیدزنی مبدل چندسلولی پل H سری دو سلولی- پنج سطحی ۱۷
جدول ۲-۳: حالتهای کلیدزنی مبدل چندسلولی سری نامتقارن دو سلولی ۱۹
جدول ۲-۴: حالت های کلیدزنی برای تولید ولتاژ خروجی پنج سطحی را در مبدل خازن شناور ۲۱
جدول ۳-۱: حالت کلیدها برای سطوح مختلف ولتاژ خروجی مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل ۴سلول-۹سطحی ۴۲
جدول ۳-۲: حالتهای کلیدزنی مبدل چندسلولی خازن شناور دوبل بهبود یافته ۲-سلولی ۱۱-سطحی ۴۵
جدول ۳-۳: حالتهای کلیدزنی مبدل جدید پیشنهادی ۲ سلولی ۲۳ سطحی ۵۳
جدول ۳-۴: مقایسه مبدل پیشنهادی با انواع دیگر مبدلهای چند سلولی برای تعداد سطوح ولتاژ خروجی برابر با $8n+7$ و مقدار پیک ولتاژ یکسان ۵۴
جدول ۴-۱: مقادیر پارامترهای عناصر بکار رفته در شبیهسازی انواع مبدلها ۵۹

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

مبدل‌های جریان مستقیم به جریان متناوب با نام اینورتر شناخته می‌شوند که ازمهم‌ترین ادوات الکترونیک قدرت به شمار می‌روند. در مهندسی قدرت، با توجه به قدرت انتقالی و هزینه‌های مربوطه، سطوح مختلفی را برای ولتاژ کاری سیستم برمی‌گزینند. وظیفه‌ی یک اینورتر تبدیل انرژی از فرم dc به فرم متناوب با دامنه و فرکانس مشخص است:

۱-اینورترهای منبع ولتاژ[1]

۲-اینورترهای منبع جریان[2]

اگر ولتاژ ورودی اینورتر ثابت باشد، اینورتر به نام اینورتر منبع ولتاژ و در صورتی که جریان ورودی ثابت نگه داشته شود به نام اینورتر منبع جریان شناخته می‌شود. اینورترهای منبع ولتاژ در بسیاری از بخش‌های مختلف صنعت کاربرد دارند و جزء جدانشدنی صنعت محسوب می‌شود.[۱, ۲]

۱-۲ مبدل‌های منبع ولتاژ

وظیفه یک مبدل منبع ولتاژ تبدیل یک ولتاژ ورودی مستقیم (dc) به یک ولتاژ خروجی متناوب (ac) و متقارن با دامنه و فرکانس مورد نظر می‌باشد. ولتاژ خروجی می‌تواند در فرکانس ثابت یا متغیر، مقداری ثابت و یا متغیر داشته باشد. ولتاژ خروجی را می‌توان با تغییر ولتاژ ورودی مستقیم (dc) و تابت نگه داشتن بهره مبدل ولتاژ بدست آورد. از طرفی اگر ولتاژ ورودی ثابت و غیر قابل کنترل باشد، می‌توان با تغییر بهره مبدل ولتاژ یک ولتاژ متغیر را در خروجی بدست آورد. این عمل معمولا به وسیله‌ی کنترل مدولاسیون پهنای پالس در داخل اینورتر صورت میگیرد.[۳]

شکل موج‌های ولتاژ خروجی در اینورترهای ایده‌آل بایستی سینوسی باشد. ولی در اینورترهای عملی این شکل موج‌ها غیرسینوسی بوده و دارای هارمونیک‌های مشخص است. در کاربردهای توان متوسط و توان پایین، ولتاژهای مربعی و یا تقریبا مربعی ممکن است قابل قبول باشد ولی در کاربردهای توان بالا به موج‌های سینوسی با اعوجاج بسیار کم نیاز است.

از جمله کاربردهای اینورترها در صنعت می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ✓ درایو موتورهای ac با دور متغیر
- ✓ گرمکن‌های القائی
- ✓ منابع تغذیه‌ی کمکی
- ✓ منابع تغذیه بدون وقفه

ورودی اینورتر نیز می‌تواند باتری، سلول پیل سوختی، سلول خورشیدی و یا هر منبع dc دیگری باشد.[۴]

در ساختار این اینورترها از کلیدهای نیمه‌هادی استفاده می‌شود. که به دلیل افزایش گرایش به سوی تکنولوژی الکترونیک قدرت، تلاشهای گسترده‌ای برای افزایش مقدار نامی قدرت کلیدهای نیمه-

[1] Voltage Source Inverter (VSI)
[2] Current Source Inverter (CSI)

هادی صورت گرفته است. علیرغم پیشرفت‌های زیاد در زمینه فیزیک نیمه هادی هنوز هم کلیدهای موجود پاسخگوی نیازهای صنعت برق نمی‌باشد و ما را ناگزیر از استفاده از اتصال سری و موازی کلیدهای نیمه‌هادی می‌کند. بنابراین با توجه به موارد مذکور استفاده از اینورترهای چند سطحی یکی از راه‌حل‌های موجود برای مسئله ولتاژهای بالا است.[۴]

در همین راستا در این پایان‌نامه در فصل دوم ساختارهای مبدل‌های چند سطحی متداول مورد بحث و بررسی قرار خواهند گرفت و به مهمترین روش‌های مدولاسیون و نحوه‌ی کلید زنی این ساختارها پرداخته خواهند شد. در فصل سوم روند بهبود مبدل چندسلولی خازن شناور را با افزایش تعداد سطوح بیان شده و همچنین ساختاری جدیدی مبتنی بر مبدل چندسلولی خازن شناور ارائه خواهد شد. همچنین در فصل چهارم به منظور بررسی نحوه عملکرد ساختار جدید پیشنهاد شده و نیز مقایسه آن با دیگر مبدل‌های چندسلولی، شبیه‌سازی‌های لازم توسط نرم‌افزار MATLAB صورت خواهدگرفت.

فصل دوم

بررسی منابع

۲-۱ مقدمه

طبق مطالب بیان شده اینورترهای چند سطحی یکی از راه‌حل‌های موجود برای مسئله ولتاژهای بالا است.اولین و ساده‌ترین نوع اینورتر ولتاژ عبارت است از اینورتر منبع ولتاژ نیم‌پل[1] و ولتاژ تمام-پل[2](اینورتر پل H) در شکل ۲-۱، ولتاژ خروجی و حالت کلیدها برای مبدل نیم‌پل نشان داده شده است. در مبدل نیم‌پل شکل ۲-۱الف از دو کلید و یک منبع ولتاژ dc دارای سر وسط[3] استفاده شده است و خروجی ولتاژ دارای دو سطح $\frac{E}{2}$ و $-\frac{E}{2}$ می‌باشد. مطابق این شکل در این مبدل عملکرد کلیدهای S_1 و S_2 مکمل هم است. اگر روشن بودن کلید با حالت ۱ وخاموش بودن آن با حالت صفر نشان داده شود، ولتاژ خروجی مبدل از رابطه زیر بدست می‌آید:

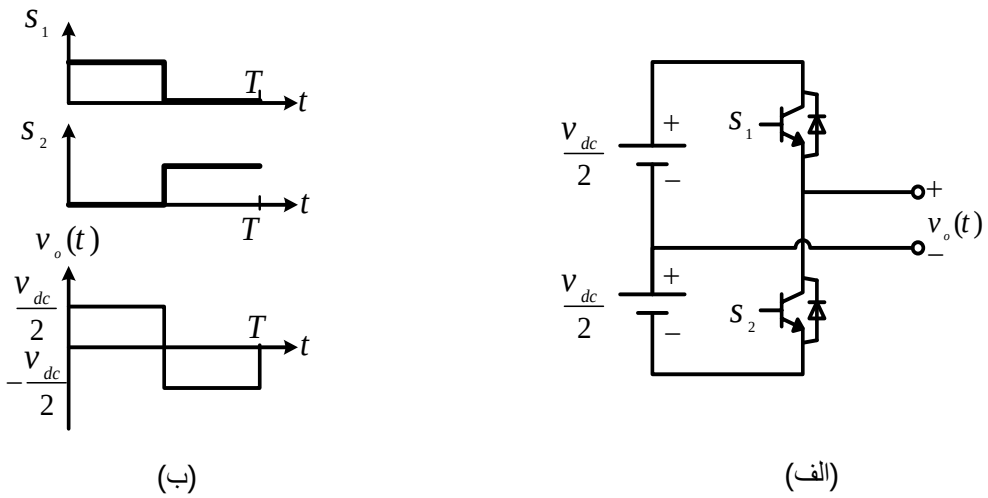
$$v_o(t)=\frac{E}{2}\left[S_1(t)-S_2(t)\right] \qquad (۲-۱)$$

در رابطه فوق $S_1(t)$ و $S_2(t)$ حالت‌های مربوط به کلیدهای S_1 و S_2 و E مقدار ولتاژ منبع dc است.

مقدار موثر ولتاژ خروجی مبدل نیز از رابطه‌ی زیر تعیین می‌گردد:

$$v_{o_{rms}}=\sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2}\frac{E^2}{4}dt}=\frac{E}{2} \qquad (۲-۲)$$

در رابطه فوق $v_{o_{rms}}$ حداکثر مقدار موثر ولتاژ خروجی و T دوره تناوب ولتاژ مبدل است.

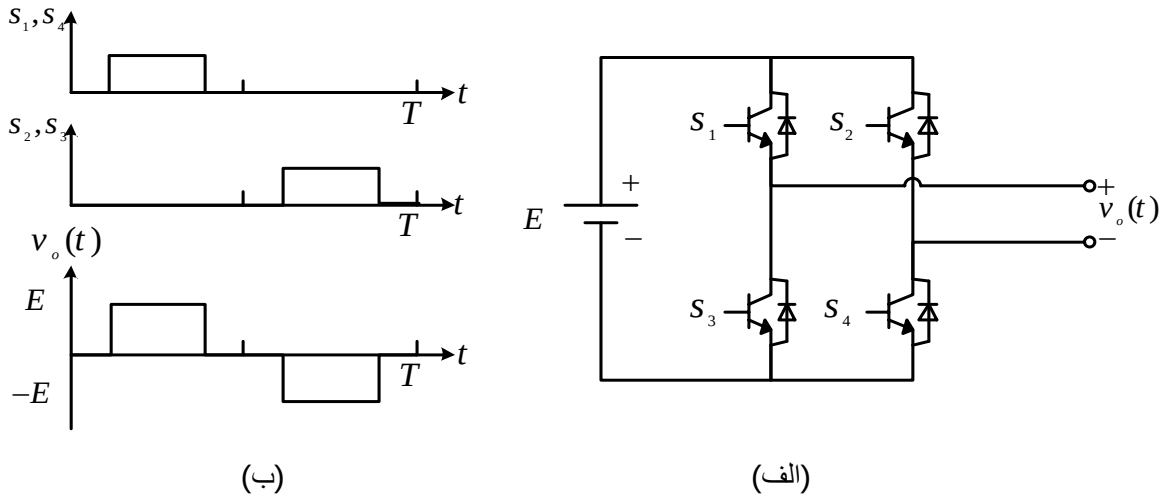


شکل ۲-۱: اینورتر منبع ولتاژ نیم پل؛(الف)ساختار قدرت؛(ب)حالت‌های کلیدها و ولتاژ خروجی

ساختار اینورتر تمام‌پل نیز در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. این مبدل از ۴ کلید و یک منبع

[1]Half Bridge Voltage Source Inverter
[2]Full Bridge Voltage Source Inverter
[3]Mid Point

ولتاژ dc تشکیل شده است. ولتاژ خروجی این مبدل دارای سه سطح $+E$، ۰ و $-E$ است.



شکل ۲-۲: اینورتر منبع ولتاژ تمام پل(اینورتر پل H)؛ (الف)ساختار قدرت؛ (ب)حالت‌های کلیدها و ولتاژ خروجی

در اینورتر تمام‌پل عملکرد کلیدهای S_1 و S_2 مکمل یکدیگر است. ولتاژ خروجی اینورتر در این حالت از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$v_o(t) = E\left[S_1(t) - S_3(t)\right] \qquad (۳-۲)$$

در رابطه فوق $S_1(t)$ و $S_3(t)$ حالت‌های مربوط به کلیدهای S_1 و S_3 و E مقدار ولتاژ منبع dc است.

مقدار موثر ولتاژ خروجی نیز از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$v_{o_{rms}} = \sqrt{\frac{2}{T}\int_0^{T/2} E^2 dt} = E \qquad (۴-۲)$$

در رابطه‌ی فوق $v_{o_{rms}}$ حداکثر مقدار موثر ولتاژ خروجی و T دوره تناوب ولتاژ خروجی مبدل است.امروزه با افزایش سطح ولتاژ و توان در صنعت نیاز فراوانی به مبدل‌های توان بالا-ولتاژ متوسط وجود دارد که به دلیل محدودیت‌های عملی در ساخت کلیدها با ولتاژ نامی بالا، ساخت این مبدل‌ها به شکل دو سطحه امکان‌پذیر نمی‌باشد. بنابراین مبدل‌های چندسطحی به عنوان جایگزینی در کاربردهای ولتاژ متوسط و توان بالا معرفی شده‌اند. همچنین مبدل‌های چندسطحی علاوه بر کاربردهای توان بالا استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر را ممکن می‌سازند.[۵-۹]

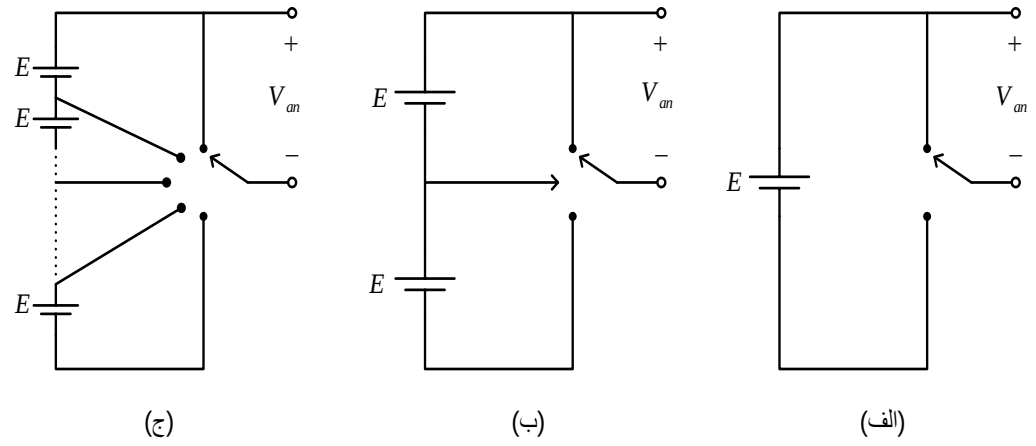
نظریه مبدل‌های چندسطحی برای اولین بار در سال ۱۹۷۵ توسط Bannister وBakerمعرفی شده است و عبارت چندسطحی برای اولین بار برای یک مبدل سه‌سطحی پیشنهاد شده است[۱۰]. این ساختار از اتصال اینورترهای تکفاز مجزا به همراه دیودهای کلمپ بدست آمده و قادر به تولید

ولتاژ چندسطحی از منابع متعدد ولتاژ dc است.در اوایل سال ۱۹۸۰ ساختار مبدل چند سطحی بهبود یافته‌ای بر مبنای مدل Bannister وBaker توسط Baker ارائه شده است[۱۱]. در این ساختار ولتاژ منبع dc بر روی دیودهای سری تقسیم می‌شود.برخلاف مبدل چندسطحی اولیه، این مبدل ولتاژ چندسطحی را با استفاده از تنها یک منبع ولتاژ dcو چندین دیود سری تولید می‌کند. امروزه این ساختار به نام اینورتر نقطه‌خنثی کلمپ و یا اینورتر دیود کلمپ شناخته می‌شود. در همین راستا نیز ساختارهای گوناگونی از مبدل‌های چندسطحی ارائه شده است.ایده اصلی استفاده از مبدل‌های چند سطحی برای دست‌یابی به توان‌های بالاتر مبنی بر سری نمودن کلیدهای نیمه‌هادی با منابع متعدد ولتاژ dc است تا منابع ولتاژ پایین dc را به شکل موج پلکانی تبدیل کند. خازن‌ها، باتری‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر می‌تواند بعنوان منابع متعدد ولتاژ dc مورد استفاده قرار گیرد. قطع و وصل کلیدهای قدرت باعث جمع شدن منابع متعدد ولتاژ dc و دستیابی به ولتاژ با تعداد سطوح بالاتر در خروجی می‌گردد.[۱۲]

۲-۲ مبدل‌های چندسطحی

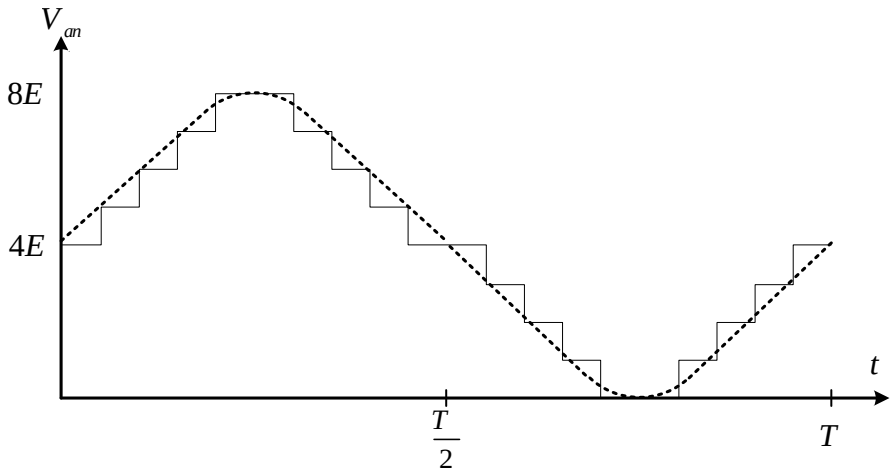
۲-۲-۱ مفهوم مبدل‌های چندسطحی

مبدل‌های چندسطحی ولتاژ، مبدل‌هایی هستند که با استفاده از سطوح مختلف ولتاژ را از حالت مستقیم به متناوب تبدیل می‌کند. شکل ۲-۳ را در نظر بگیرید. همانطور که در شکل ۲-۳-الف ملاحظه می‌شود ولتاژ v_{an} با در نظر گرفتن ایده‌آل بودن کلید فقط می‌تواند مقادیر 0 و E را اختیار کند.(مبدل دو سطحی). در شکل ۲-۳-ب نیز ولتاژ v_{an} با در نظر گرفتن ایده‌آل بودن کلیدها می‌تواند مقادیر0 ، E و $2E$ را داشته باشد.(مبدل سه سطحی). با تعمیم دادن این مدار می‌توان تعداد سطوح بیشتری داشت.(شکل ۲-۳ -ج)



شکل ۲-۳ : مبدل ولتاژ؛ (الف)مبدل دوسطحی؛ (ب) مبدل سه سطحی؛ (ج) مبدل n سطحی

شکل ولتاژ خروجی برای یک مبدل نه‌سطحی با این ساختار و با کلیدزنی مناسب به صورت شکل ۲-۴ خواهد بود.



شکل ۲-۴: خروجی ولتاژ یک مبدل نه سطحی

همانطورکه ملاحظه می‌گردد ولتاژ شکل موج خروجی یک مبدل نه‌سطحی در مقایسه با ساختار مبدل دو سطحی، سینوسی‌تر است و دارای هارمونیک کمتری می‌باشد. برای دست‌یابی به این شکل موج‌ها ساختارهای مختلفی ارائه شده است که در ادامه به معرفی چند نمونه از آنها می‌پردازیم.

۲-۲-۲ مبدل‌های چند سطحی

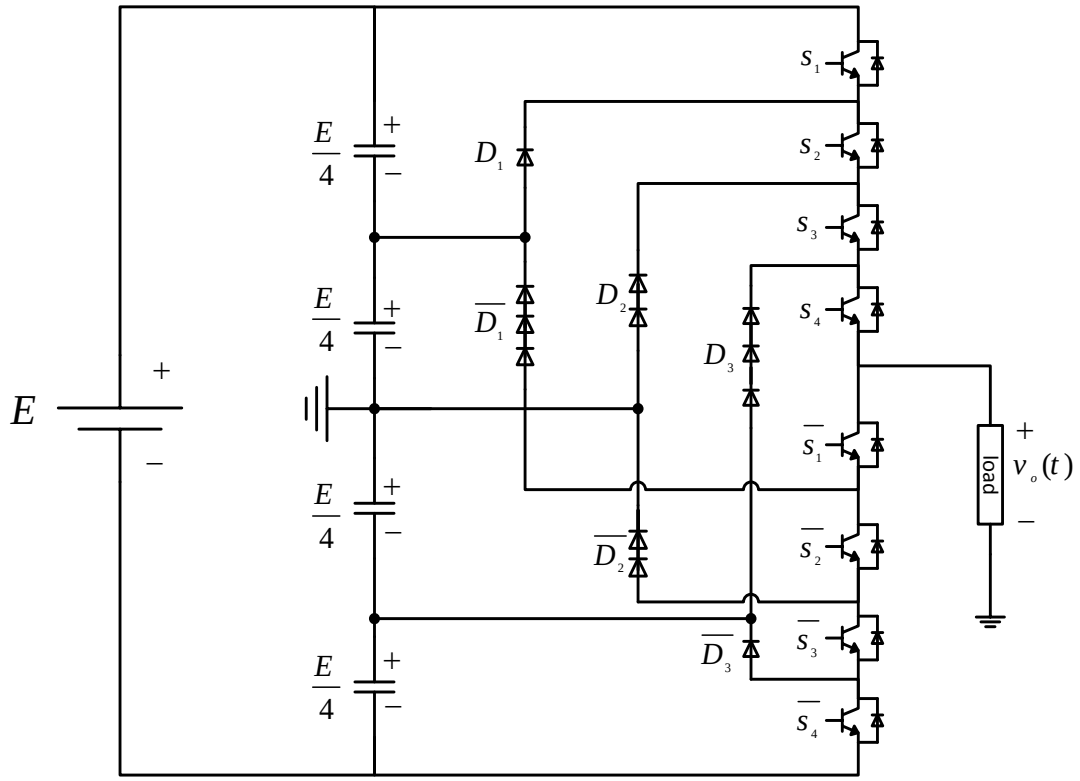
ساختارهای مختلفی برای مبدل‌های چندسطحی به منظور دستیابی به هارمونیک کمتر، تلفات کلیدزنی کمتر، دامنه ولتاژ بالاتر و همچنین استفاده از المان‌های کمتر ارائه گردیده است. مهمترین انواع ساختارهای اینورترهای چندسطحی به صورت زیر می‌باشد:

- ✓ مبدل منبع ولتاژ چند سطحی دیود کلمپ با نقطه خنثی[۱]
- ✓ مبدل منبع ولتاژ چند سطحی خازن شناور[۲]
- ✓ مبدل منبع ولتاژ چند سطحی آبشاری پل H سری[۳]
- ✓ مبدل منبع ولتاژ چندسطحی ترکیبی[۴]

۲-۲-۲-۱ مبدل منبع ولتاژ چند سطحی دیود کلمپ با نقطه خنثی

یکی از ساختارهای معمول مبدل‌های چندسطحی، مبدل چندسطحی دیودکلمپ و یا مبدل چندسطحی نقطه خنثی کلمپ است. مبدل چندسطحی دیود کلمپ به شکل شناخته شده امروزی آن برای اولین بار توسط Nabae معرفی شده است[۱۳]. در این مبدل با استفاده از ترکیب سری خازن-ها، ولتاژ لینک dc به سطوح یکسان تقسیم میشود. در شکل ۲-۵ یک مبدل پنج سطحی دیود کلمپ با نقطه خنثی میانی نشان داده شده است.

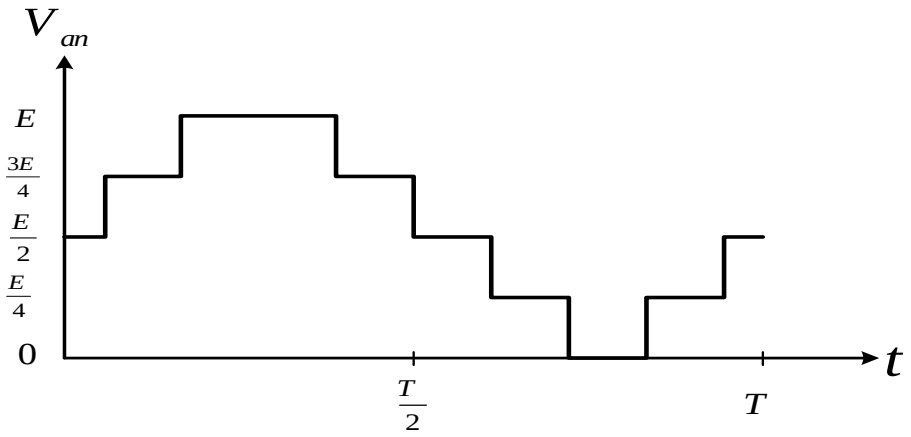
[1] Multilevel Diode Clamped / Neutral Point Inverter , NPCMLI
[2] Multilevel Flying Capacitor
[3] Multilevel Cascaded H-Bridge Converter
[4] Multilevel Hybrid Converter



شکل ۲-۵: مبدل دیود کلمپ پنج سطحی

همان‌طور که از شکل ۲-۵ برمی‌آید المان‌های مورد استفاده قرار گرفته در این مبدل عبارتند از بانک خازن مقسم ولتاژ، دیودهای نگه‌دارنده، دیودهای بلوکه‌کننده و کلید.

نقش خازن‌ها در این مدار تقسیم‌کردن ولتاژ dc ورودی به سطوح موردنظر است. در حالت متقارن ظرفیت این خازن‌ها با هم برابر است. تعداد سطوح در این مبدل معمولا عددی فرد است. بنابراین تعداد خازن‌های مورد نیاز برای یک مبدل دیود کلمپ n سطحی که از رابطه‌ی $n-1$ حاصل می‌گردد عددی زوج خواهد بود.به عنوان مثال در یک مبدل دیود کلمپ پنج سطحی، چهار خازن مورد نیاز است. در این ساختار نقطه‌ی میانی بین خازن‌ها اتصال به زمین می‌گردد. خروجی مبدل در این حالت دارای پنج سطح $-\frac{E}{2}$، $-\frac{E}{4}$، 0، $\frac{E}{4}$ و $\frac{E}{2}$ است.در صورتی که نقطه میانی اتصال به زمین نگردد در خروجی فقط سطوح مثبت را خواهیم داشت.در این حالت شکل موج خروجی همانند شکل ۲-۶ دارای سطوح 0، $\frac{E}{4}$، $\frac{E}{2}$، $\frac{3E}{4}$ و E خواهد بود.



شکل ۲-۶: شکل موج خروجی مبدل دیود کلمپ در صورت عدم اتصال نقطه میانی به زمین

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 با S_1'، S_2 با S_2'، S_3 با S_3' و S_4 با S_4' جفت می‌باشند و در صورت هدایت یکی دیگری در حالت خاموش قرار می‌گیرد و هدایت نمی‌کند. بنابراین در این اینورتر تعداد جفت کلید مورد نیاز به ازای n سطح ولتاژ $n-1$ 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 تحت عنوان دیودهای نگه‌دارنده و نیمی دیگر تحت عنوان دیودهای بازدارنده می‌باشد. تعداد دیودهای نگه‌دارنده ولتاژ در ساختار تک‌فاز نشان داده شده در شکل ۲-۵ به صورت نقطه به نقطه تغییر می‌کند[۱۴]. برای مثال دیود D_1 از یک دیود تشکیل شده است در حالیکه دیود D_1' از سه دیود سری با هم تشکیل شده است. به عبارت دیگر معنی این ساختار این است که افت ولتاژ معکوس ایجاد شده بر 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 مبدل n سطحی از نوع دیود کلمپ مقدار ولتاژ معکوس که روی هر دیود می‌افتد از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$V_r = \frac{E}{n-1} \qquad (۵-۲)$$

دلیل استفاده از دیودهای نگه دارنده (سری) در ساختار این مبدل این است که بتوانند تغییرات ولتاژ را تحمل کنند.چون دیودها سری بسته شده‌اند نسبت ولتاژی که هر دیود می‌تواند تحمل کند از رابطه‌ی فوق بدست می‌آید[۱۵]. به عنوان مثال در ساختار فوق D_1 قادر به هدایت $\frac{E}{4}$ ولتاژ خواهد بود درحالیکه D_1' می‌تواند $\frac{3E}{4}$ ولتاژ معکوس را تحمل کند. البته این نحوه بستن دیودها به هم فقط برای کاربردهای ولتاژ بالا انجام می‌شود. در حالیکه برای کاربردهای ولتاژ پایین نیازی به استفاده از