

بسمه تعالی



شبیه سازی کنترل مستقیم گشتاور موتور القائی با  
استفاده از یک مبدل ولتاژ چند سطحی و روش  
کلیدزنی مدولاسیون بردار فضائی

**احسان حسن خان**

پایان نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
در رشته مهندسی برق-قدرت

استاد راهنما:

**دکتر داود عرب خابوری**

شهریور ۱۳۸۷

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه.....	۳
۲-۱- تاریخچه.....	۳
۳-۱- ساختار پایان نامه.....	۵

فصل دوم: معرفی مبدل‌های چند سطحی

۱-۲- مقدمه.....	۹
۲-۲- ساختارهای مختلف مبدل‌های چند سطحی.....	۱۰
۱-۲-۲- مبدل‌های چند سطحی با قیود دیودی (کلمپ دیودی).....	۱۰
۲-۲-۲- مبدل‌های چند سطحی با ساختار آبشاری (متوالی).....	۱۲
۳-۲-۲- مبدل‌های چند سطحی با خازن شناور.....	۱۳
۳-۲- بررسی بردارهای تولیدی توسط مبدل‌های سه سطحی NPC.....	۱۵
۴-۲- بررسی مساله انحراف ولتاژ خازن‌ها در مبدل سه سطحی.....	۲۲
۳-۲- جمع بندی.....	۲۳

فصل سوم: معرفی مدولاسیون بردار فضائی

۱-۳- مقدمه.....	۲۷
۲-۳- مفهوم کلی بردار فضائی.....	۲۸
۳-۳- تولید شکل موجها در روش مدولاسیون بردار فضائی.....	۳۱
۴-۳- روش مدولاسیون بردار فضائی چند سطحی.....	۳۵
۵-۳- روش مدولاسیون بردار فضائی برای مبدل‌های سه سطحی.....	۳۶

۴۷-۶-۳ جمع بندی.....

### فصل چهارم: مروری بر روش کنترل مستقیم گشتاور در موتورهای القائی

۵۱	۱-۴-۱ مقدمه.....
۵۲	۲-۴-۱ اصول کلی روش کنترل مستقیم گشتاور برای موتورهای القائی.....
۵۵	۳-۴-۱ اصول روش کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول کلید زنی (DTC متداول).....
۶۱	۳-۴-۱-۱ شمای کلی روش کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول کلید زنی.....
۶۲	۴-۴-۱ بررسی مزایا و معایب روش کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول کلید زنی.....
۶۵	۴-۴-۵ اصول روش DTC با استفاده از مبدل دو سطحی و روش کلیدزنی SVM (DTC-SVM).....
۶۵	۴-۴-۵-۱ روش استفاده شده جهت پیاده سازی DTC-SVM با استفاده از مبدل دو سطحی.....
۶۸	۴-۴-۶ اصول روش DTC با استفاده از مبدل سه سطحی NPC و روش کلیدزنی SVM.....
۷۱	۴-۴-۶-۱ روش استفاده شده جهت پیاده سازی DTC-SVM با استفاده از مبدل سه سطحی.....
۷۲	۴-۴-۷ جمع بندی.....

### فصل پنجم: شبیه سازی روش DTC با استفاده از یک مبدل ولتاژ چند سطحی و روش SVM

۷۵	۱-۵-۱ مقدمه.....
۷۵	۲-۵-۱ شبیه سازی روش کنترل مستقیم گشتاور متداول مبتنی بر جدول کلیدزنی.....
۷۸	۵-۲-۱ نتایج شبیه سازی.....
۸۳	۵-۳-۱ شبیه سازی روش DTC با استفاده از یک مبدل دو سطحی و روش کلیدزنی SVM.....
۸۶	۵-۳-۱ نتایج شبیه سازی.....
۹۱	۵-۴-۱ شبیه سازی روش DTC با استفاده از یک مبدل سه سطحی و روش کلیدزنی SVM.....
۹۲	۵-۴-۱ نتایج شبیه سازی.....
۹۹	۵-۵ مقایسه روشهای شبیه سازی شده.....
۱۰۰	۵-۶ جمع بندی.....

## فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۷ - نتیجه‌گیری..... ۱۰۳

۲-۷ - پیشنهادات..... ۱۰۴

مراجع

## فهرست اشکال

### صفحه

### شکل

- شکل ۱-۲ ساختار یک مبدل چند سطحی با آرایش قیود دیودی (الف) سه سطحی (ب) پنج سطحی..... ۱۰
- شکل ۲-۲ ساختار یک فاز از یک مبدل متوالی ۹ سطحی..... ۱۲
- شکل ۳-۲ ساختار یک مبدل چند سطحی با آرایش خازن معلق (شناور) (الف) سه سطحی (ب) پنج سطحی..... ۱۳
- شکل ۴-۲ ساختار یک مبدل سه سطحی با آرایش قیود (کلمپ) دیودی..... ۱۵
- شکل ۵-۲ وضعیت کلیدزنی ۱-۱-۱..... ۱۷
- شکل ۶-۲ وضعیت کلیدزنی ۱-۱۰..... ۱۸
- شکل ۷-۲ وضعیتهای کلیدزنی ۱۱۰ و ۱-۰۰ به ترتیب..... ۱۹
- شکل ۸-۲ بردارهای تولیدی توسط وضعیتهای مختلف کلیدزنی مبدل سه سطحی..... ۲۱
- شکل ۹-۲ بردارهای تولیدی توسط مبدل سه سطحی..... ۲۱
- شکل ۱-۳ ساختار یک مبدل منبع ولتاژ دو سطحی و سه فاز..... ۲۹
- شکل ۲-۳ شش بردار فضائی فعال و دو بردار فضائی صفر در SVM دوسطحی..... ۳۰
- شکل ۳-۳ زمان عملکرد بردارهای فضائی در یک دوره نمونه برداری..... ۳۲
- شکل ۴-۳ تعدادی از توالبیهای کلیدزنی ممکن (الف) و (ب) SVM متعارف (ج) و (د) SVM با کلمپ باس  $120^\circ$  (ه) و (و) SVM با کلمپ باس  $60^\circ$ ..... ۳۴
- شکل ۵-۳ ترتیب و نظم قرارگیری بردارها برای SVM سه سطحی..... ۳۸
- شکل ۶-۳ تقسیم هر بخش شش ضلعی در SVM سه سطحی به چهار مثلث..... ۴۱
- شکل ۷-۳ تعریف متغیرهای کمکی  $k_1$  و  $k_2$  برای یافتن اندیس مثلث..... ۴۳
- شکل ۸-۳ بردارهای اصلی و انتقال یافته برای SVM..... ۴۳
- شکل ۹-۳ روند نمای محاسبه سهم زمانی روشن بودن کلیدها در SVM سه سطحی..... ۴۸
- شکل ۱-۴ روشهای مختلف کنترل موتورهای القائی (جهت دهی میدان طبیعی - NFO)..... ۵۲
- شکل ۲-۴ بردارهای فضایی شار روتور و استاتور و زاویه بین آنها..... ۵۴
- شکل ۳-۴ نمایی از وضعیت بردار فضایی شار روتور و استاتور..... ۵۷
- شکل ۴-۴ نمایی از بردارهای ولتاژ و تغییرات شار استاتور مربوطه..... ۵۷
- شکل ۵-۴ حلقه هیستریزیس شار و گشتاور..... ۵۸
- شکل ۶-۴ نمایی از چگونگی عملکرد روش کنترل مستقیم گشتاور..... ۶۰
- شکل ۷-۴ شمای کلی از روش کنترل مستقیم گشتاور مبتنی بر جدول کلیدزنی..... ۶۱
- شکل ۸-۴ شمای کلی روش DTC-SVM با استفاده از یک مبدل دو سطحی..... ۶۶

شکل ۴-۹	نمای پالسهای کنترلی مبدل دو سطحی در روش SVM متقارن(الف): الگوی کلیدزنی (ب): زمان نمونه برداری.....	۶۷
شکل ۴-۱۰	نمایی از کنترل کننده هیستریزس چهار سطحی نمونه.....	۶۹
شکل ۴-۱۱	چگونگی انتخاب بردار با توجه به اهداف کنترلی در مقاله [۴۱].....	۷۰
شکل ۴-۱۲	نمایی از بلوک دیاگرام روش پیشنهادی در مقاله [۴۱].....	۷۰
شکل ۴-۱۳	شمای کلی روش DTC-SVM با استفاده از یک مبدل سه سطحی.....	۷۲
شکل ۵-۱	طرح کلی از سیستم شبیه سازی شده برای DTC متداول.....	۷۵
شکل ۵-۲	داخل بلوک شبیه سازی شده شار و گشتاور.....	۷۶
شکل ۵-۳	داخل بلوک شبیه سازی شده جدول کلیدزنی.....	۷۷
شکل ۵-۴	پاسخ سیستم به ورودی ۱۴۰۰rpm در روش DTC متداول.....	۷۹
شکل ۵-۵	گشتاور الکترومغناطیسی موتور در ورودی ۱۴۰۰rpm در روش DTC متداول.....	۷۹
شکل ۵-۶	گشتاور الکترومغناطیسی موتور از نمائی نزدیکتر.....	۸۰
شکل ۵-۷	رسم همزمان مولفه های متعامد شار بر حسب یکدیگر.....	۸۰
شکل ۵-۸	نمودار شار-زمان در ورودی ۱۴۰۰rpm.....	۸۱
شکل ۵-۹	نمودار شار-زمان از نمائی نزدیکتر.....	۸۱
شکل ۵-۱۰	جریان سه فاز استاتور در روش DTC متداول.....	۸۲
شکل ۵-۱۱	پاسخ سیستم به تغییر پله در سرعت ورودی.....	۸۲
شکل ۵-۱۲	گشتاور الکترومغناطیسی موتور در تغییر پله در سرعت ورودی.....	۸۲
شکل ۵-۱۳	طرح سیستم شبیه سازی شده برای DTC با استفاده از یک مبدل دو سطحی و روش کلیدزنی SVM.....	۸۳
شکل ۵-۱۴	داخل بلوک محاسبه اندازه و زاویه بردار ولتاژ چرخان.....	۸۴
شکل ۵-۱۵	تولید فرمان کلیدزنی با منحنی تابع دندان اره ای.....	۸۵
شکل ۵-۱۶	پاسخ سیستم به ورودی ۱۴۰۰rpm در روش DTC-SVM دو سطحی.....	۸۶
شکل ۵-۱۷	گشتاور الکترو مغناطیسی موتور در ورودی ۱۴۰۰rpm در روش DTC-SVM دو سطحی.....	۸۶
شکل ۵-۱۸	گشتاور الکترومغناطیسی موتور از نمائی نزدیکتر.....	۸۷
شکل ۵-۱۹	رسم همزمان مولفه های متعامد شار بر حسب یکدیگر.....	۸۷
شکل ۵-۲۰	نمودار شار-زمان در ورودی ۱۴۰۰rpm.....	۸۸
شکل ۵-۲۱	نمودار شار-زمان از نمائی نزدیکتر.....	۸۸
شکل ۵-۲۲	جریان سه فاز استاتور در روش DTC-SVM دو سطحی.....	۸۹
شکل ۵-۲۳	رسم همزمان مولفه های متعامد ولتاژ بر حسب یکدیگر.....	۸۹

- شکل ۲۴-۵ پاسخ سیستم به تغییر پله در سرعت ورودی..... ۹۰
- شکل ۲۵-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در تغییر پله در سرعت ورودی..... ۹۰
- شکل ۲۶-۵ طرح سیستم شبیه‌سازی شده برای DTC با استفاده از یک مبدل سه سطحی و روش کلیدزنی SVM..... ۹۱
- شکل ۲۷-۵ پاسخ سیستم به ورودی  $1400^{rpm}$  در روش DTC-SVM سه سطحی..... ۹۳
- شکل ۲۸-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در ورودی  $1400^{rpm}$  در روش DTC-SVM سه سطحی..... ۹۳
- شکل ۲۹-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور از نمائی نزدیکتر..... ۹۴
- شکل ۳۰-۵ رسم همزمان مولفه های متعامد شار بر حسب یکدیگر..... ۹۴
- شکل ۳۱-۵ نمودار شار-زمان در ورودی  $1400^{rpm}$ ..... ۹۵
- شکل ۳۲-۵ نمودار شار-زمان از نمائی نزدیکتر..... ۹۵
- شکل ۳۳-۵ جریان سه فاز استاتور در روش DTC-SVM سه سطحی..... ۹۶
- شکل ۳۴-۵ رسم همزمان مولفه های متعامد ولتاژ بر حسب یکدیگر..... ۹۶
- شکل ۳۵-۵ شکل موج ولتاژ خط موتور ( $V_{ab}$ )..... ۹۷
- شکل ۳۶-۵ پاسخ سیستم به تغییر پله در سرعت ورودی..... ۹۷
- شکل ۳۷-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در تغییر پله در سرعت ورودی..... ۹۸
- شکل ۳۸-۵ پاسخ سیستم به تغییر در ماهیت بار سیال..... ۹۸
- شکل ۳۹-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در تغییر ماهیت بار سیال..... ۹۹

## فهرست جداول

صفحه	جدول
۱۱	جدول ۱-۲ حالات کلیدزنی مبدل پنج سطحی با فیود دیودی
۱۴	جدول ۲-۲ حالت‌های مختلف کلید زنی مبدل پنج سطحی با خازن معلق
۱۶	جدول ۳-۲ وضعیت کلیدهای موجود در یک فاز برای رسیدن به سطوح ولتاژ مختلف
۲۰	جدول ۴-۲ بردارهای تولیدی توسط وضعیت های مختلف کلیدزنی اینورتر سه سطحی
۳۱	جدول ۱-۳ هشت بردار فضائی و ولتاژهای فاز و خط آنها
۴۴	جدول ۲-۳ ارتباط بین پارامترهای $k_1$ ، $k_2$ و $\Delta$
۴۶	جدول ۳-۳ توالی کلیدزنی برای مثلث $\Delta_3$ در بخش ۱ در مبدل سه سطحی
۴۶	جدول ۴-۳ بردارهای فضائی موجود در اولین بخش برای مدولاسیون بردار فضائی سه سطحی
۴۷	جدول ۵-۳ نگاشت حالت‌های کلیدزنی بین اولین بخش و بخشهای دیگر
۵۸	جدول ۱-۴ جدول کلیدزنی کنترل مستقیم گشتاور دو سطحی
۷۰	جدول ۲-۴ استراتژی انتخاب بردار با توجه به شماره بخش $i$ و فرمان کنترل کننده ها
۷۶	جدول ۱-۵ مشخصات موتور
۷۸	جدول ۲-۵ جدول کلیدزنی در روش DTC
۱۰۰	جدول ۳-۵ جدول مقایسه ضربان موجود برای شار و گشتاور در سه روش شبیه سازی شده



فصل اول

مقدمه

## ۱-۱- مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی به صورت پرکاربردترین گونه انرژی مورد استفاده قرار گرفته است و تا آینده ای نه چندان دور روزی فرا خواهد رسید که کمتر کسی از انرژیهای فسیلی به طور مستقیم استفاده کند. در این میان مبدلهای انرژی الکتریکی به مکانیکی که همان ماشینهای الکتریکی هستند جایگاه متمایزی یافته اند. از این میان ماشینهای القایی به دلیل قیمت مناسب، سادگی ساخت عملکرد مناسب و قابلیت انعطاف در عملکرد سهم عمده را در این میان به خود اختصاص داده اند بطوریکه بیش از ۶۰٪ موتورهای ساخته شده از این دسته هستند. در قالب ژنراتوری هم هنوز در برخی کاربردهای خاص نظیر نیروگاههای بادی جایگزین مناسبی پیدا نشده است.

موتورهای القایی به خصوص موتورهای قفس سنجایی مزایایی نسبت به موتورهای dc دارند. از مواردی نظیر نیاز به نگهداری کمتر، قابلیت اطمینان بالاتر، هزینه، وزن، حجم و اینرسی کمتر، راندمان بیشتر، قابلیت عملکرد در محیطهای با گرد و غبار و در محیطهای قابل انفجار را می توان نام برد. مشکل اصلی موتورهای dc وجود کموتاتور و جاروبک است، که نگهداری زیاد، پرهزینه و نامناسب بودن عملکرد موتور در محیطهای با گرد و غبار بالا و قابل انفجار را به دنبال دارد.

نکته مهمی که در این میان به نظر می رسد پیچیدگی در کنترل موتورهای القایی است. کنترل ماشینهای الکتریکی همواره دغدغه اصلی مهندسين ماشین می باشد. در میان ماشینهای الکتریکی ماشینهای dc به علت سادگی سیستم کنترل دور و گشتاورشان در سالهای گذشته علیرغم هزینه بالای نگهداری و مشکلات فراوان کموتاسیون، ارجحیت داشتند. با گسترش روز به روز صنعت الکترونیک و تاثیرات آن بر روی سیستمهای قدرت و پیشرفت الکترونیک قدرت و نیز به موازات این پیشرفتهای طرح روشهای نوین کنترل ماشینهای الکتریکی در دهه های گذشته کاربرد ماشینهای dc کم رنگ تر گشت. به گونه ای که امروز در اکثر مصارف روزمره و حتی صنعتی، موتورهای القایی که زمانی استفاده از آنها در کارهای با دور متغیر بسیار سخت و گاهی غیر ممکن می شد جایگزین ماشینهای dc شده اند و لذا کنترل آنها اهمیت روزافزون می یابد [۱-۳].

## ۱-۲- تاریخچه

در قرن گذشته تلاشهای زیادی برای کنترل موتورهای القایی انجام گرفت. همه تلاشهای انجام

یافته در راستای کنترل بهینه و اقتصادی موتورهای القائی با وجود تمام ابداعات و ابتکارات به کار رفته در آنها با روی کارآمدن روش کنترل برداری کم کم کنار نهاده شدند. روشهای جا افتاده ای همچون اسکالر نیز حتی در مقابل روش نوین کنترل موتورهای الکتریکی بسیار ضعیف عمل می کنند. در یک تقسیم بندی کلی روشهای قدیمی کنترل دور موتور را به نام روشهای کنترل اسکالر و روشهای نوین کنترل موتورهای الکتریکی را به نام روشهای کنترل برداری می توان تقسیم نمود. آنچه که روشهای برداری را بسیار کارآمد می کند تبدیل موتورالقائی با استفاده از این روشها به موتور dc می باشد. البته منظور از این جمله این است که موتور القائی از دید مدار کنترل در روش برداری مانند موتوری dc دیده می شود که با کنترل جریان میدان و جریان آرمیچر می توان گشتاور و سرعت مورد نیاز را ایجاد نمود [۳].

معروفترین روش که به عنوان کنترل مبتنی بر جهت میدان (FOC)<sup>۱</sup> یا کنترل برداری می باشد، به وسیله آقایان Hasse و Blaschke در سال ۱۹۷۱ پیشنهاد شده است و یک عملکرد مناسب را برای موتورهای القائی ایجاد می کند. در کنترل برداری معادلات موتور در یک سیستم مختصات که به صورت سنکرون با بردار شار روتور می چرخند، تبدیل می گردند. این مختصات جدید مختصات میدان نامیده می شوند. در مختصات میدان - تحت دامنه ثابت شار روتور- یک رابطه خطی بین متغیرهای کنترل و گشتاور موجود می باشد. علاوه بر این همانند یک موتور dc تحریک مستقل، مرجع برای دامنه شار به سبب محدودیت ولتاژ استاتور در سرعتهای زیاد کاهش می یابد. به این ترتیب با استفاده از دستگاههای تبدیل مولفه های تزویج را از هم جدا نموده و کنترل دقیق گشتاور حاصل می گردد و امکان کنترل دقیق مانند ماشینهای dc فراهم می گردد [۴].

گشتاور و شار فاصله هوائی تابعی از ولتاژ و فرکانس هستند و این اثر تزویج باعث کندی پاسخ موتور القائی در روشهای کنترل اسکالر می گردد. بعد از طرح روشهای کنترل برداری، در سال ۱۹۸۶ میلادی روش نوین کنترل موتورهای القائی به نام روش کنترل مستقیم گشتاور (DTC)<sup>۲</sup> توسط آقایان Depenbrock، Takahashi و Noguchi ابداع گردید. روش جدید توسط آقای Takahashi تحت عنوان کنترل مستقیم گشتاور (DTC) و توسط آقای Depenbrock تحت عنوان کنترل خودکار

---

1. Field Oriented Control  
2. Direct Torque Control

مستقیم (DSC)<sup>۱</sup> معرفی شد. نام کنترل مستقیم از این جا ناشی شده است که بر اساس خطای بین مقدار تخمینی شار و گشتاور و مقدار مرجع، امکان کنترل مستقیم حالت‌های مختلف مبدل وجود دارد. مهمترین ویژگی این روشها سادگی پیاده سازی آن می باشد. سایر مزایای این روشها پاسخ گشتاور بسیار سریعتر و دقت سرعت بسیار بالاتر نسبت به روشهای دیگر کنترل ماشینهای القائی می باشد. در روش پیشنهادی این محققان سعی بر آن شده بود تا به جای کنترل جداسازی شده از کنترل Bang-Bang که به راحتی با روشن و خاموش شدن کلیدهای قدرت به دست می آمد استفاده شود. این روش کنترل به عنوان کنترل مستقیم گشتاور شناخته شده می باشد و از سال ۱۹۸۶ به بعد متناوبا در حال گسترش و بهبود توسط محققان دیگر می باشد [۴].

در مقابل فواید روش کنترل مستقیم گشتاور عیوبی نیز در این روش کنترلی موجود می باشد. از مهمترین عیوب این روش می توان به فرکانس کلیدزنی متفاوت و متغیر، به علت استفاده از کنترل کننده های هیستریزیس و ضربان بالای شار استاتور و گشتاور اصلی اشاره کرد [۴].

به طور کلی در این پایان نامه به دنبال کاهش معایب روش DTC متداول با استفاده از آرایش سه سطحی برای مبدلها و استفاده از روش مدولاسیون بردار فضائی (SVM) جهت کلیدزنی این مبدلها می باشیم. در این راه سه روش DTC متداول، DTC-SVM با مبدل دو سطحی و DTC-SVM با مبدل سه سطحی با یکدیگر مقایسه می گردند. کار جدید در این پروژه که قبلا در هیچیک از تحقیقات انجام نگرفته است، استفاده از کلیدزنی SVM برای مبدلهای سه سطحی و استفاده آن در روش کنترل مستقیم گشتاور می باشد. در پایان نیز نتایج به دست آمده از شبیه سازی روشهای بررسی شده با یکدیگر مقایسه می شوند و چگونگی کاهش معایب ذکر شده به خصوص کاهش ضربان شار و گشتاور با استفاده از روش تعریف شده در این پروژه نشان داده خواهد شد.

### ۳-۱- ساختار پایان نامه

ساختار کلی پایان نامه از موضوعات مختلف زیر تشکیل شده است:

فصل اول به مقدمه ای در باره روش کنترل مستقیم گشتاور اختصاص داده شده است. در فصل دوم انواع آرایشهای موجود برای مبدلهای چند سطحی به طور خلاصه معرفی شده و مبدل سه سطحی با

1. Direct Self Control

کلمپ دیودی به طور دقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در فصل سوم مفهوم کلی بردار فضائی و حالت‌های مختلف مبدل بیان می‌گردد، که برای درک مفهوم عملکرد مدولاسیون بردار فضائی به آن نیاز می‌باشد. فصل چهارم به معرفی اصول اولیه درایوهای مبتنی بر روش کنترل مستقیم گشتاور بر مبنای جدول کلید زنی برای مبدل دو سطحی و همچنین اصول اولیه روش کنترل مستقیم گشتاور با یک مبدل دو سطحی و سه سطحی با کلیدزنی SVM می‌پردازد. در این فصل لزوم استفاده از مبدل‌های چند سطحی بیان می‌گردد. در فصل پنجم سه روش DTC متداول، DTC-SVM با یک مبدل دو سطحی و DTC-SVM با یک مبدل سه سطحی شبیه سازی و تحلیل شده و نتایج به دست آمده با یکدیگر مقایسه شده‌اند. در فصل ششم نتیجه‌گیری و پیشنهادات بدست آمده از مطالب فوق بیان شده است.

## فصل دوم

### معرفی مبدل‌های چند سطحی

## ۲-۱- مقدمه

در سالهای اخیر مبدل‌های چند سطحی در صنعت بسیار مورد توجه قرار گرفته اند و در مواردی از قبیل منابع تغذیه AC، جبران سازه‌های استاتیکی توان راکتیو و سیستم‌های درایوهای الکتریکی بکار گرفته شده اند. در این نوع مبدلها ولتاژ خروجی می تواند چندین سطح ولتاژ گسسته را داشته باشد. مبدل چند سطحی برای اولین بار به منظور کاهش هارمونیک‌های شکل موج ولتاژ (محتویات هارمونیک) و جریان خروجی مبدلها بکار گرفته شد. محتوی هارمونیک مبدل‌های چند سطحی به مراتب کمتر از مبدل‌های دو سطحی در تلفات کلیدزنی یکسان بوده و در حالت ایده آل با افزایش تعداد سطوح تصاعدی ادوات مبدل به سمت بی‌پایان، اعوجاج هارمونیک کل شکل موج خروجی به سمت صفر میل می کند. با وجود این حداکثر تعداد سطوح ولتاژ به خاطر عواملی مانند پیچیدگی برقراری تعادل ولتاژ خازنها، افزایش نیمه هادی و خازنها برای ایجاد سطوح ولتاژ بیشتر، محدودیت های بسته بندی و حجم مدار محدود می شود [۶].

از آنجا که مبدل‌های چند سطحی به عنوان راه حلی برای رفع نیاز به نرخ های بالاتر توان می باشند و در ضمن باعث کاهش اغتشاش هارمونیک در خروجی، فشار ولتاژ<sup>۱</sup>  $\left(\frac{dv}{dt}\right)$  و پدیده تداخل الکترومغناطیسی می شوند، در ۲۰ سال اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند و آرایش های مختلفی برای آنها ارائه شده است [۸].

به طور کلی سه آرایش عمده که برای مبدل‌های چند سطحی استفاده می شود عبارتند از:

- ۱) مبدل‌های چند سطحی با قیود دیودی (کلمپ دیودی)<sup>۲</sup> (۲) مبدل‌های چند سطحی با ساختار آبشاری (متوالی)<sup>۳</sup> (۳) مبدل‌های چند سطحی با خازن شناور (معلق)<sup>۴</sup> [۵-۸].
- در ادامه سه ساختار فوق به طور خلاصه معرفی شده و سپس ساختار مبدل سه سطحی با کلمپ دیودی به علت استفاده در این پروژه به طور کامل مورد بررسی قرار می گیرد.

---

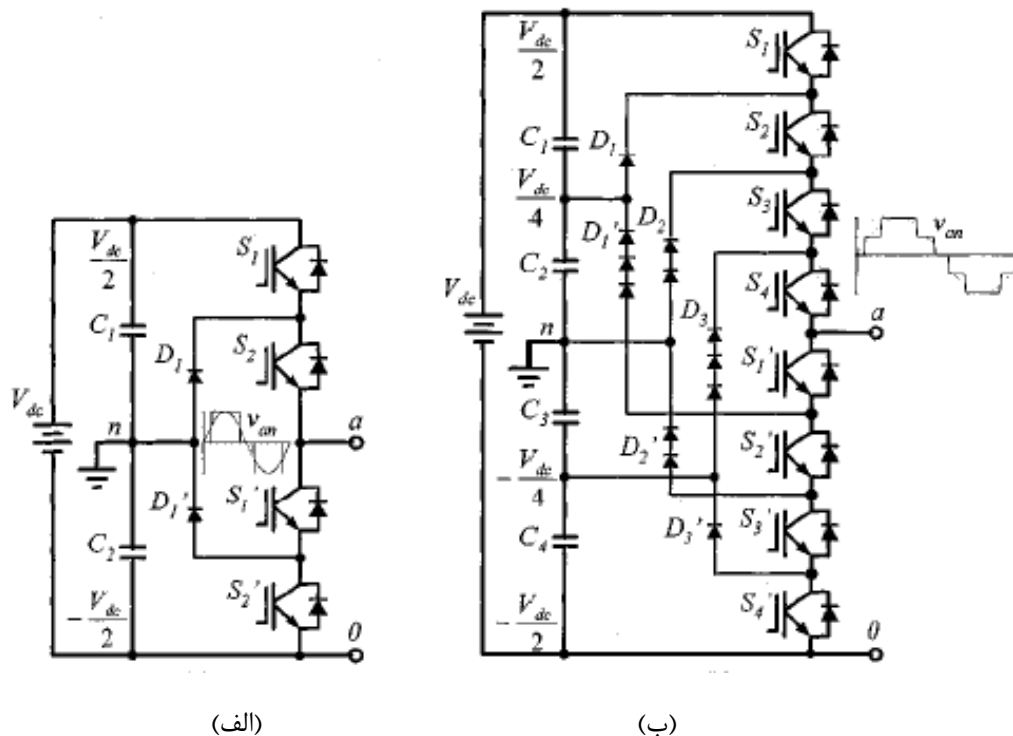
1. Voltage Stress
2. Diode Clamped Multi-level Inverter
3. Cascading Multi-level Inverter
4. Flying Capacitor Multi-level Inverter

۲-۲- ساختارهای مختلف مبدل‌های چند سطحی

۲-۲-۱ مبدل‌های چند سطحی با قیود دیودی (کلمپ دیودی)

در سالهای اخیر تحقیقات زیادی روی مبدل‌های چندسطحی با قیود دیودی به خصوص برای کاربردهای ولتاژ متوسط انجام شده است، زیرا اگر سطوح ولتاژ از دو سطح بیشتر شود منجر به مزایایی می‌گردد که عبارتند از: (۱) کیفیت توان بهتر (۲) تداخل الکترومغناطیسی کمتر (۳) تلفات کلیدزنی پایین تر (۴) توانایی ولتاژ بالاتر [۸].

در این آرایش، سطوح ولتاژی را که در حقیقت کسرهایی از ولتاژ یک منبع انرژی مستقیم هستند به وسیله خازنهای موسوم به لینک تهیه کرده و به کمک کلیدها و دیودهای کلمپ در خروجی مبدل قرار می‌دهد. شکل (۱-۲) ساختار دو اینوتر چند سطحی (۳ و ۵ سطحی) با آرایش قیود دیودی را نشان می‌دهد [۸].



شکل ۲-۱ ساختار یک مبدل چند سطحی با آرایش قیود دیودی (الف) سه سطحی (ب) پنج سطحی

در این ساختار برای ایجاد  $M$  سطح ولتاژ به  $2 \times (M - 1)$  کلید الکترونیک قدرت،  $(M - 1) \times (M - 2)$  دیود کلمپ در هر فاز و همچنین  $(M - 1)$  خازن نیاز خواهد بود. این خازن‌ها با



تقسیم سطح ولتاژ لینک DC بین خود  $(M - 1)$  سطح ولتاژ پدید می‌آورند که با اضافه کردن سطح ولتاژ صفر در کل  $M$  سطح را در اختیار قرار می‌دهند. در این آرایش برای سوئیچ کردن یکی از این  $M$  سطح ولتاژ باید  $(M - 1)$  کلید که در مجاورت هم قرار دارند با هم روشن شوند. برای به دست آوردن سطح ولتاژ  $n$  ام (که در آن  $n$  می‌تواند از ۱ تا  $M$  مقدار داشته باشد) باید کلید شماره  $n$  تا  $(n + (M - 2))$  روشن گردد. به این ترتیب مشخص می‌گردد که برای اعمال یک سطح ولتاژ مشخص، تنها یک ترکیب معین از کلیدها وجود خواهد داشت.

به منظور بیان اصول عملکرد، در شکل (۲-۱-ب) یک پایه مبدل پنج سطحی نشان داده شده است. در این مبدل چهار خازن جهت ایجاد پنج سطح ولتاژ به کار گرفته شده است. برای باس DC با ولتاژ  $V_{dc}$ ، ولتاژ قرار گرفته روی هر خازن  $\frac{V_{dc}}{4}$  بوده و در نتیجه تنش ولتاژ اعمال شده به هر کلید به اندازه سطح ولتاژ  $\frac{V_{dc}}{4}$  یک خازن از طریق قیود دیودی محدود می‌گردد.

به منظور بررسی نحوه شکل‌گیری سطوح ولتاژ، نقطه خنثی  $n$  به عنوان نقطه مرجع ولتاژ فاز خروجی در نظر گرفته می‌شود. برای ایجاد پنج سطح ولتاژ بین نقاط  $a$  و  $n$  پنج حالت کلیدزنی وجود دارد که در جدول (۲-۱) آورده شده است.

جدول (۲-۱): حالات کلیدزنی مبدل پنج سطحی با قیود دیودی

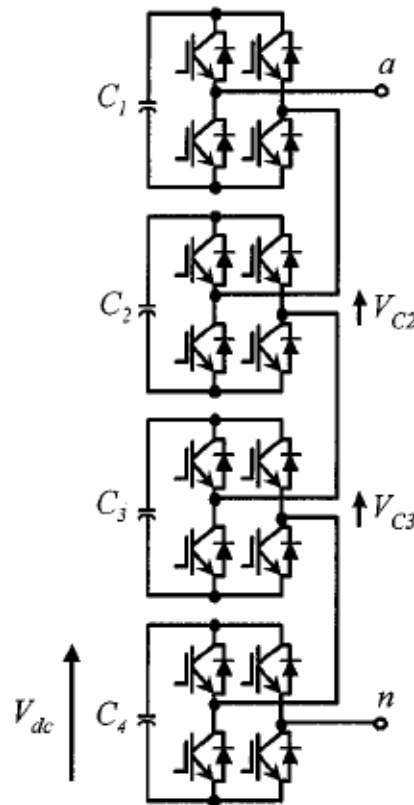
ولتاژ خروجی	$S_4$	$S_3$	$S_2$	$S_1$	حالت
$\frac{V_{dc}}{2}$	1	1	1	1	1
$\frac{V_{dc}}{4}$	1	1	1	0	2
0	1	1	0	0	3
$-\frac{V_{dc}}{4}$	1	0	0	0	4
$\frac{V_{dc}}{2}$	0	0	0	0	5

لازم به ذکر است که کلیدهای بالا و پایین (به عنوان مثال سوئیچ  $S_1$  و سوئیچ  $S_1'$ )، نشان داده شده در شکل (۲-۱) به ترتیب جفت مکمل یکدیگر می‌باشند، به این معنی که در صورت روشن شدن یک کلید جفت متناظر آن حتماً باید خاموش باشد.

تعداد زیاد دیودهای مورد نیاز در این آرایش، سبب افزایش حجم و قیمت مدار و نیز ایجاد سلف‌های پارازیتی گشته و در نتیجه این آرایش با حداکثر تعداد سطوح ۷ و یا ۹ ساخته می‌شود. از مشکلات دیگر این ساختار می‌توان به مسئله عدم تعادل ولتاژ خازن‌ها اشاره کرد. قدیمیترین نوع این مبدل‌ها که به صورت سه سطحی مورد استفاده قرار گرفت به نام NPC<sup>۱</sup> معروف می‌باشند که در قسمتهای بعدی به صورت کامل تشریح خواهند شد [۸].

### ۲-۲-۲- مبدل‌های چند سطحی با ساختار آبشاری (متوالی)

این نوع مبدل از سری کردن مدول‌های مبدل پل H تکفاز با منابع DC مجزا با یکدیگر حاصل می‌گردد. در شکل (۲-۲) ساختار یک فاز از یک مبدل متوالی ۹ سطحی آورده شده است.



شکل ۲-۲ ساختار یک فاز از یک مبدل متوالی ۹ سطحی

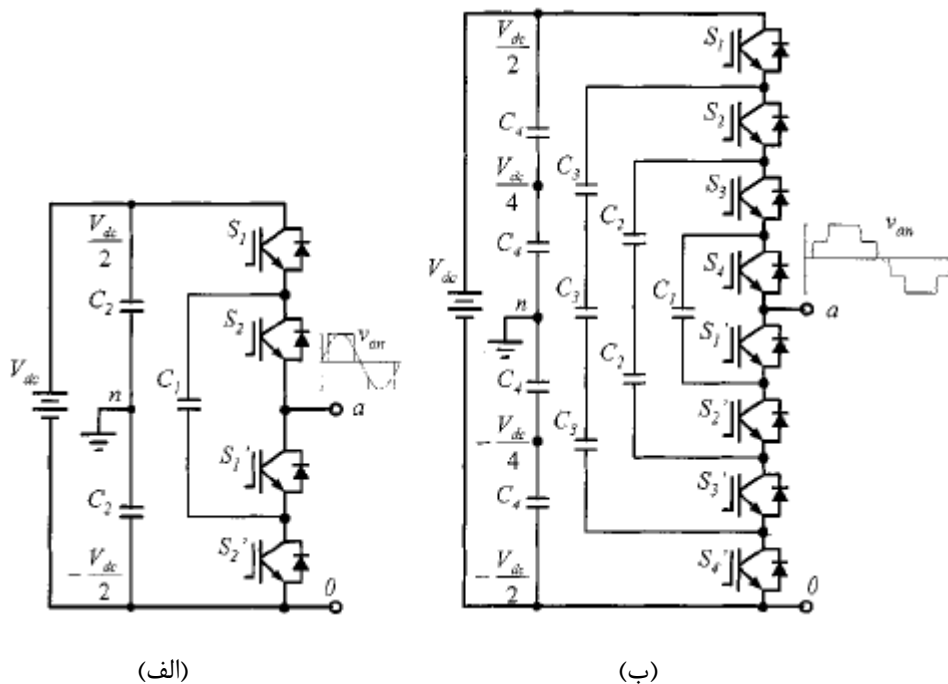
در این نوع مبدل ولتاژ خروجی فاز از جمع ولتاژهای ایجاد شده توسط مدول‌های مختلف به دست می‌آید. هر اینوتر پل H تکفاز سه سطح ولتاژ  $V_{dc}$ ،  $0$  و  $-V_{dc}$  را ایجاد می‌کند. در حالت کلی از

1. Neutral Point Clamped

سری کردن  $m$  مبدل پل  $H$  تکفاز با منابع DC یکسان یک مبدل  $N = 2m + 1$  سطحی با آرایش متوالی حاصل می‌گردد [۸].

### ۳-۲-۲- مبدل‌های چند سطحی با خازن شناور (معلق)

تولید ولتاژ در این نوع مبدل بر این امر استوار می‌باشد که روشن و یا خاموش کردن دسته‌ای از کلیدها باعث سری شدن خازن‌ها و در نتیجه اضافه و یا کم شدن ولتاژ آنها در خروجی می‌گردد. در این ساختار نیز مشابه ساختار قیود دیودی برای ایجاد  $M$  سطح ولتاژ،  $(M - 1)$  خازن مورد نیاز بوده اما نحوه قرار گیری آنها متفاوت می‌باشد. در شکل (۳-۲) دو نمونه مبدل چند سطحی (۳ و ۵ سطحی) با این ساختار آورده شده است.



شکل ۳-۲-۲ ساختار یک مبدل چند سطحی با آرایش خازن معلق (شناور) الف) سه سطحی ب) پنج سطحی

حالت‌های مختلف کلید زنی مبدل پنج سطحی با خازن معلق برای حصول سطح ولتاژهای مختلف در خروجی در جدول (۲-۲) آورده شده است. در این آرایش نیز دو کلید مکمل نباید با هم روشن شوند چرا که سبب موازی شدن خازن‌های متفاوت با هم و در نتیجه ایجاد یک جریان چرخشی بین آنها می‌شود.

جدول (۲-۲): حالت‌های مختلف کلید زنی مبدل پنج سطحی با خازن معلق

حالت	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	ولتاژ خروجی یک فاز
1	0	0	0	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$
2	0	0	0	1	$-\frac{V_{dc}}{4}$
3	0	0	1	0	$-\frac{V_{dc}}{4}$
4	0	0	1	1	0
5	0	1	0	0	$-\frac{V_{dc}}{2}$
6	0	1	0	1	0
7	0	1	1	0	0
8	0	1	1	1	$\frac{V_{dc}}{4}$
9	1	0	0	0	$-\frac{V_{dc}}{4}$
10	1	0	0	1	0
11	1	0	1	0	0
12	1	0	1	1	$\frac{V_{dc}}{4}$
13	1	1	0	0	0
14	1	1	0	1	$-\frac{V_{dc}}{4}$
15	1	1	1	0	$\frac{V_{dc}}{4}$
16	1	1	1	1	$\frac{V_{dc}}{2}$