

دانشگاه شاهرود

پردیس بین‌المللی ارس  
گروه مهندسی برق - قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی برق - قدرت

عنوان

تحلیل و شبیه‌سازی اینورترهای NPC مبتنی بر مبدل‌های منبع  
امپدانس

استاد راهنما

دکتر ابراهیم بابائی

استاد مشاور

دکتر سید حسین حسینی

پژوهشگر

طاہر احمدزاده

شهریور ۱۳۹۳

## تقدیم

به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خودگذشتگی،  
به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگار، بهترین پشتیبان است،  
به پاس قلب‌های بزرگ‌شان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناه‌شان به شجاعت می‌گراید،  
و به پاس محبت‌های بی‌دریغ‌شان که هرگز فروکش نمی‌کند،

و این مجموعه

برگ سبزی است تحفه درویش

که

به خانواده‌ی عزیزم تقدیم می‌نمایم.

## سپاس‌گزاری

پس از سپاس بی‌حد بر آستان صفات بی‌همتای احدیت؛ از استاد فرزانه و گران‌قدرم جناب آقای دکتر ابراهیم بابائی که همواره راهنما و راه‌گشای اینجانب در اتمام و اکمال پایان‌نامه بوده‌اند نهایت تشکر و سپاس‌گزاری را دارم. هم‌چنین از استاد فرهیخته جناب آقای دکتر سید حسین حسینی به عنوان استاد مشاور، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

از پدر و مادر بزرگوارم، آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند و خود را سپر بلای مشکلات و ناملایمات کردند تا به جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم، سپاس‌گزارم.

در پایان از تمام افرادی که مرا در انجام این پایان‌نامه یاری نموده‌اند، خصوصاً از خواهر و برادر عزیزم که همواره پشتیبانم بوده‌اند، تشکر و قدردانی می‌نمایم.

نام خانوادگی دانشجو: احمدزاده		نام: طاهر	
عنوان پایان نامه: تحلیل و شبیه سازی اینورترهای NPC مبتنی بر مبدل های منبع امپدانسی			
استاد راهنما: دکتر ابراهیم بابائی			
استاد مشاور: دکتر سید حسین حسینی			
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد	رشته: مهندسی برق	گرایش: قدرت	دانشگاه: تبریز
دانشکده: پردیس بین المللی ارس	تاریخ فارغ التحصیلی: ۱۳۹۳/۰۶/۱۶	تعداد صفحه: ۸۹	
کلید واژه ها: اینورتر منبع ولتاژ؛ اینورتر منبع امپدانسی؛ مبدل Z-H؛ مبدل افزایشنده-کاهنده؛ اینورتر NPC چند سطحی؛ اینورتر Z-NPC چند سطحی؛ اینورتر Z-H-NPC چند سطحی؛ مدولاسیون پهنای پالس سینوسی			
<p><b>چکیده:</b> اینورترهای چند سطحی به عنوان یک جایگزینی مناسب در کاربردهای توان بالا و ولتاژ متوسط ارائه شده اند. در پایان نامه حاضر ساختار گسترش یافته اینورتر Z-NPC سه سطحی ارائه می شود. به دلیل داشتن ویژگی های منحصر به فرد مبدل های منبع امپدانسی و با بهره گیری از اینورتر منبع امپدانسی و مبدل Z-H متداول، ساختار پایه یک مبدل افزایشنده-کاهنده از نوع Z-H ارائه می گردد. مبدل Z-H پیشنهادی در مقایسه با مبدل Z-H متداول، علاوه بر حذف حالت ST و دیود ماقبل شبکه LC دارای قابلیت افزایشنده و کاهنده بودن نیز می باشد. از مزایای شاخص مبدل Z-H پیشنهادی می توان به سادگی ساختار، قابلیت افزایشنده و کاهنده بودن و داشتن شکل موج های ولتاژ و جریان با ریبیل کم و در نتیجه نیاز نداشتن به فلیتر اضافی در مدار اشاره کرد. قابل ذکر است که ساختار پایه مبدل افزایشنده-کاهنده Z-H پیشنهادی می تواند به طور مستقیم و بدون هیچ تغییری در انواع تبدیل های dc-dc، dc-ac و ac-ac به کار گرفته شود. هم چنین به دلیل اهمیت موضوع اینورترهای چند سطحی جهت دستیابی به توان بالاتر با به کارگیری منابع ولتاژ dc دارای سطوح ولتاژ پایین تر، ساختار اینورتر Z-H-NPC سه سطحی و ساختار گسترش یافته آن نیز ارائه می گردد. همان طور که می دانیم مسئله حفظ تعادل شارژ خازن برای ساختار اینورترهای NPC با سطوح بیش تر از سه سطحی هنوز هم موضوع قابل بحث می باشد. بنابراین یک روش کنترلی جدید برای انواع ساختارهای اینورترهای NPC چند سطحی ارائه می شود. به منظور بررسی عمل کرد صحیح ساختارها و روش کنترلی پیشنهادی، شبیه سازی ها در محیط نرم افزار PSCAD انجام می گیرند. نتایج حاصل از شبیه سازی ها عمل کرد و کارایی بسیار خوب ساختارها و روش کنترلی پیشنهادی را تایید می کنند.</p>			

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
III.....	فهرست شکل‌ها
VI.....	فهرست جداول
۲.....	فصل اول: مقدمه

## فصل دوم: بررسی منابع

۵.....	۱-۲ مقدمه
۵.....	۲-۲ ساختار پایه اینورترهای چند سطحی مبتنی بر برشگر نقطه خنثی
۶.....	۱-۲-۲ ساختار اینورتر سه سطحی نیم پل تک فاز از نوع V-NPC
۷.....	۲-۲-۲ ساختار اینورتر برشگر دیودی سه سطحی نیم پل سه فاز
۸.....	۳-۲ ساختار پایه اینورتر منبع امپدانس سه فاز
۹.....	۱-۳-۲ اصول عمل کرد اینورتر منبع امپدانس سه فاز
۱۳.....	۲-۳-۲ روش کنترل مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) در اینورترهای منبع امپدانس سه فاز
۱۵.....	۳-۳-۲ نتایج شبیه‌سازی ساختار اینورتر منبع امپدانس سه فاز
۱۷.....	۴-۲ ساختار اینورتر سه سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-NPC
۲۱.....	۱-۴-۲ نتایج شبیه‌سازی ساختار اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز
۲۳.....	۵-۲ ساختار مبدل منبع امپدانس از نوع Z-H
۲۳.....	۱-۵-۲ ساختار پایه مبدل افزایشنده از نوع Z-H و اصول عمل کرد آن
۳۳.....	۱-۱-۵-۲ نتایج شبیه‌سازی مبدل dc-dc افزایشنده Z-H
۳۶.....	۲-۵-۲ ساختار پایه مبدل کاهشنده از نوع Z-H و اصول عمل کرد آن
۴۴.....	۱-۲-۵-۲ نتایج شبیه‌سازی مبدل dc-dc کاهشنده Z-H
۴۷.....	۶-۲ نتیجه‌گیری

## فصل سوم: ساختارها و روش کنترلی پیشنهادی

۴۹.....	۱-۳ مقدمه
۴۹.....	۲-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر چند سطحی نیم پل تک فاز مبتنی بر Z-NPC
۴۹.....	۱-۲-۳ ساختار اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز
۵۰.....	۲-۲-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر منبع امپدانس $n$ سطحی نیم پل تک فاز مبتنی بر ساختار برشگر دیودی
۵۱.....	۳-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر چند سطحی نیم پل سه فاز مبتنی بر Z-NPC
۵۱.....	۱-۳-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر Z-NPC پنج سطحی نیم پل سه فاز
۵۳.....	۲-۳-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر منبع امپدانس $n$ سطحی نیم پل سه فاز مبتنی بر ساختار برشگر دیودی
۵۶.....	۴-۳ ساختار پیشنهادی مبدل افزایشنده-کاهنده مبتنی بر Z-H و اصول عمل کرد آن
۶۴.....	۵-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشنده-کاهنده چند سطحی مبتنی بر Z-H-NPC و اصول عمل کرد آن
۶۵.....	۱-۵-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشنده-کاهنده چند سطحی نیم پل تک فاز از نوع Z-H-NPC
۶۷.....	۲-۵-۳ ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشنده-کاهنده چند سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-H-NPC
۷۰.....	۶-۳ روش کنترلی پیشنهادی برای انواع ساختارهای اینورترهای چند سطحی مبتنی بر NPC
۷۰.....	۷-۳ نتیجه‌گیری

## فصل چهارم: نتایج شبیه‌سازی

۱-۴ مقدمه.....	۷۲
۲-۴ نتایج شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی اینورتر Z-NPC چند سطحی نیم پل تک فاز و سه فاز.....	۷۲
۳-۴ نتایج شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی مبدل dc-dc افزایشده-کاهنده Z-H.....	۷۳
۴-۴ نتایج شبیه‌سازی اینورتر V-NPC پنج سطحی نیم پل تک فاز با استفاده از روش‌های کنترلی متداول و پیشنهادی.....	۷۷
۵-۴ نتایج شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشده-کاهنده Z-H-NPC چند سطحی نیم پل تک فاز و سه فاز با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی.....	۷۹
۶-۴ نتیجه‌گیری.....	۸۴

## فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۵ دست‌آوردها و نتایج.....	۸۶
۲-۵ پیشنهادات.....	۸۶
مراجع.....	۸۸

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: نحوه‌ی ایجاد ارتباط مابین منبع و بار توسط واسط الکترونیک قدرت..... ۲
- شکل ۱-۲: ساختار پایه اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز؛ (الف) ساختار کلی؛ (ب) ساختار عملی..... ۶
- شکل ۲-۲: سیگنال‌های کنترلی و شکل‌موج‌های ولتاژ اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز..... ۷
- شکل ۳-۲: ساختار اینورتر منبع ولتاژ NPC سه سطحی نیم پل سه فاز..... ۸
- شکل ۴-۲: ساختار پایه اینورتر منبع امپدانس سه فاز..... ۹
- شکل ۵-۲: مدار معادل‌های اینورتر منبع امپدانس سه فاز؛ (الف) حالت عادی؛ (ب) حالت ST؛ (ج) حالت غیر ST..... ۱۰
- شکل ۶-۲: محدوده تغییرات قابل قبول برای ضرایب  $G$ ،  $M$  و  $D$ ؛ (الف) محدوده تغییرات قابل قبول برای ضریب  $G$ ؛ (ب) محدوده تغییرات قابل قبول برای ضرایب  $M$  و  $D$ ..... ۱۲
- شکل ۷-۲: سیگنال‌های PWM روش کنترل افزایشنده ساده..... ۱۳
- شکل ۸-۲: بهره ولتاژ ( $G$ ) بر حسب شاخص مدولاسیون ( $M$ ) در روش کنترل افزایشنده ساده؛ (الف) محدوده تغییرات قابل قبول به ازای ضریب  $D < 0.5$ ؛ (ب) محدوده تغییرات قابل قبول به ازای ضرایب  $D < 0.5$  و  $D > 0.5$ ..... ۱۴
- شکل ۹-۲: شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان اینورتر منبع امپدانس سه فاز در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$ ..... ۱۵
- شکل ۱۰-۲: نتایج شبیه‌سازی اینورتر منبع امپدانس به ازای شاخص مدولاسیون  $M = 0.64$  و ضریب افزایشنده  $B = 3.571$ ؛ (الف) ولتاژ و جریان شبکه منبع امپدانس؛ (ب) ولتاژ و جریان بار خروجی اینورتر منبع امپدانس..... ۱۷
- شکل ۱۱-۲: ساختار اینورتر NPC سه سطحی نیم پل سه فاز..... ۱۸
- شکل ۱۲-۲: زمان‌بندی نمونه از "شاخه‌های اتصال کوتاه" در یک دوره تناوب  $T$ ..... ۱۸
- شکل ۱۳-۲: مدار معادل‌های اینورتر Z-NPC سه سطحی؛ (الف) حالت عمومی؛ (ب) حالت ST در شاخه فوقانی؛ (ج) حالت ST در شاخه تحتانی؛ (د) حالت ST کامل..... ۱۹
- شکل ۱۴-۲: نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز به ازای شاخص مدولاسیون  $M = 0.64$  و ضریب افزایشنده  $B = 3.571$ ؛ (الف) شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان شبکه منبع امپدانس  $Z_1$ ؛ (ب) شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان شبکه منبع امپدانس  $Z_2$ ؛ (ج) شکل‌موج‌های ولتاژ بار خروجی اینورتر..... ۲۳
- شکل ۱۵-۲: ساختار پایه مبدل افزایشنده از نوع Z-H..... ۲۳
- شکل ۱۶-۲: دو حالت مختلف از ترتیب سیگنال‌های کنترلی در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = (0.5, 1]$  برای کلیدهای  $S_1$  تا  $S_4$  مبدل افزایشنده Z-H؛ (الف) سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  دارای فاز یکسان هستند؛ (ب) سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  در ناحیه عمل کرد  $D = (0.5, 1]$  دارای فاز یکسان هستند؛ (ج) سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  دارای اختلاف فاز 180 درجه هستند؛ (د) سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  در ناحیه عمل کرد  $D = (0.5, 1]$  دارای اختلاف فاز 180 درجه هستند..... ۲۴
- شکل ۱۷-۲: مدار معادل‌های مبدل پایه افزایشنده Z-H در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = (0.5, 1]$ ؛ (الف) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_0$  که کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  روشن هستند؛ (ب) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_1$  که کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  روشن هستند..... ۲۵
- شکل ۱۸-۲: نسبت اندازه انتقال ولتاژ و اندازه استرس ولتاژ در دو سر خازن تحت چرخه‌های کاری مختلف در حالت افزایشنده..... ۲۷
- شکل ۱۹-۲: شکل‌موج‌های ولتاژ و جریان مبدل dc-dc افزایشنده Z-H؛ (الف) در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$ ؛ (ب) در ناحیه عمل کرد  $D = (0.5, 1]$ ..... ۳۱
- شکل ۲۰-۲: نتایج شبیه‌سازی مبدل dc-dc افزایشنده Z-H در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = (0.5, 1]$ ؛ (الف) نتایج شبیه‌سازی به ازای  $B = 2$  و  $D = 0.25$ ؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی به ازای  $B = -2$  و  $D = 0.75$ ..... ۳۵
- شکل ۲۱-۲: ساختار پایه مبدل کاهشنده از نوع Z-H..... ۳۶



شکل ۲-۲: مدار معادل‌های مبدل کاهنده Z-H در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = [0.5, 1]$ ؛ (الف) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_0$  که کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  روشن هستند؛ (ب) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_1$  که کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  روشن هستند..... ۳۷

شکل ۲-۳: نسبت اندازه انتقال ولتاژ و اندازه استرس ولتاژ در دو سر خازن تحت چرخه‌های کاری مختلف در حالت کاهنده..... ۳۸

شکل ۲-۴: شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل dc-dc کاهنده Z-H؛ (الف) در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$ ؛ (ب) در ناحیه عمل کرد  $D = [0.5, 1]$ ..... ۴۱

شکل ۲-۵: نتایج شبیه‌سازی مبدل dc-dc کاهنده Z-H در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = [0.5, 1]$ ؛ (الف) نتایج شبیه‌سازی به ازای  $K = 0.5$  و  $D = 0.25$ ؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی به ازای  $K = -0.5$  و  $D = 0.75$ ..... ۴۶

شکل ۳-۱: ساختار اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز..... ۴۹

شکل ۳-۲: سیگنال‌های کنترلی اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز..... ۵۰

شکل ۳-۳: ساختار پیشنهادی اینورتر  $n$  سطحی نیم پل تک فاز مبتنی بر Z-NPC..... ۵۱

شکل ۳-۴: ساختار پیشنهادی اینورتر پنج سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-NPC..... ۵۳

شکل ۳-۵: ساختار پیشنهادی اینورتر  $n$  سطحی نیم پل سه فاز مبتنی بر Z-NPC..... ۵۴

شکل ۳-۶: ساختار پیشنهادی مبدل پایه افزایشنده-کاهنده از نوع Z-H..... ۵۷

شکل ۳-۷: مدار معادل‌های ساختار پیشنهادی مبدل پایه افزایشنده-کاهنده Z-H در دو ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و  $D = [0.5, 1]$ ؛ (الف) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_0$  که کلیدهای  $S_2$  و  $S_3$  روشن هستند؛ (ب) مدار معادل مبدل در بازه زمانی  $T_1$  که کلیدهای  $S_1$  و  $S_4$  روشن هستند..... ۵۷

شکل ۳-۸: نسبت اندازه انتقال ولتاژ و اندازه استرس ولتاژ در دو سر خازن تحت چرخه‌های کاری مختلف در حالت افزایشنده-کاهنده در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و در حالت فقط افزایشنده در ناحیه عمل کرد  $D = [0.5, 1]$ ..... ۵۹

شکل ۳-۹: شکل موج‌های ولتاژ و جریان مبدل dc-dc افزایشنده-کاهنده Z-H؛ (الف) در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و در حالت کاهنده؛ (ب) در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$  و در حالت افزایشنده؛ (ج) در ناحیه عمل کرد  $D = [0.5, 1]$  و در حالت افزایشنده..... ۶۲

شکل ۳-۱۰: ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشنده-کاهنده چند سطحی نیم پل تک فاز از نوع Z-H-NPC؛ (الف) اینورتر سه سطحی نیم پل تک فاز از نوع Z-H-NPC؛ (ب) اینورتر  $n$  سطحی نیم پل تک فاز از نوع Z-H-NPC..... ۶۶

شکل ۳-۱۱: ساختار پیشنهادی اینورتر افزایشنده-کاهنده چند سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-H-NPC؛ (الف) اینورتر سه سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-H-NPC؛ (ب) اینورتر  $n$  سطحی نیم پل سه فاز از نوع Z-H-NPC..... ۶۸

شکل ۳-۱۲: سیگنال‌های کنترلی اینورتر NPC پنج سطحی نیم پل تک فاز؛ (الف) سیگنال‌های کلیدزنی با استفاده از روش کنترلی متداول؛ (ب) سیگنال‌های کلیدزنی با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی..... ۷۰

شکل ۳-۱: نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC چند سطحی نیم پل تک فاز پیشنهادی به ازای  $M = 0.75$  و  $B = 2$ ؛ (الف) نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC سه سطحی؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC پنج سطحی..... ۷۲

شکل ۳-۲: نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC پنج سطحی نیم پل سه فاز پیشنهادی به ازای شاخص مدولاسیون  $M = 0.75$  و ضریب افزایشنده  $B = 2$ ..... ۷۳

شکل ۳-۳: نتایج شبیه‌سازی مبدل dc-dc افزایشنده-کاهنده Z-H پیشنهادی در ناحیه عمل کرد  $D = [0, 0.5]$ ؛ (الف) نتایج شبیه‌سازی در حالت کاهنده و به ازای ضرایب  $BB = 0.5$  و  $D = 0.25$ ؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی در حالت افزایشنده و به ازای ضرایب  $BB = 2$  و  $D = 0.4$ ..... ۷۶

شکل ۳-۴: نتایج شبیه‌سازی اینورتر V-NPC پنج سطحی نیم پل تک فاز؛ (الف) نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش کنترلی متداول؛ (ب) نتایج شبیه‌سازی با استفاده از روش کنترلی پیشنهادی..... ۷۸

شکل ۴-۵: نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-H-NPC افزایشده-کاهنده ۹ سطحی نیم پل تک فاز پیشنهادی در ناحیه عمل کرد  $D=[0, 0.5]$ ؛ (الف) ولتاژ خازن‌های لینک dc به ازای ضریب کاهنده  $BB=0.25$ ؛ (ب) ولتاژها و جریان‌های خروجی مبدل به ازای ضریب کاهنده  $BB=0.25$ ؛ (ج) ولتاژ خازن‌های لینک dc به ازای ضریب افزایشده  $BB=2.5$ ؛ (د) ولتاژها و جریان‌های خروجی مبدل به ازای ضریب افزایشده  $BB=2.5$ ..... ۸۱

شکل ۴-۶: نتایج شبیه‌سازی اینورتر Z-H-NPC افزایشده-کاهنده ۱۷ سطحی نیم پل سه فاز پیشنهادی در ناحیه عمل کرد  $D=[0, 0.5]$ ؛ (الف) ولتاژ خازن‌های لینک dc به ازای ضریب کاهنده  $BB=0.5$ ؛ (ب) ولتاژها و جریان‌های خروجی مبدل به ازای ضریب کاهنده  $BB=0.5$ ؛ (ج) ولتاژ خازن‌های لینک dc به ازای ضریب افزایشده  $BB=2$ ؛ (د) ولتاژها و جریان‌های خروجی مبدل به ازای ضریب افزایشده  $BB=2$ ..... ۸۴

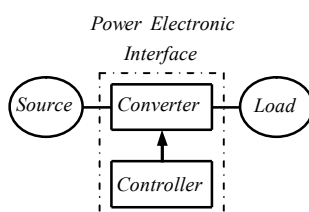
## فهرست جداول

- جدول ۱-۲: مقادیر مختلف  $v_e$  به ازای حالت‌های کلیدزنی مجاز در اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز..... ۶
- جدول ۲-۲: حالت‌های کلیدزنی مجاز برای هر یک از فازهای اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز..... ۸
- جدول ۳-۲: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی اینورتر منبع امپدانسی سه فاز..... ۱۶
- جدول ۴-۲: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز..... ۲۱
- جدول ۵-۲: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی مبدل dc-dc افزایشنده Z-H..... ۳۳
- جدول ۶-۲: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی مبدل dc-dc کاهشنده Z-H..... ۴۴
- جدول ۱-۳: ترکیب حالت‌های کلیدزنی مجاز برای اینورتر Z-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز..... ۵۰
- جدول ۲-۳: ترکیب حالت‌های کلیدزنی مجاز برای اینورتر  $n$  سطحی نیم پل تک فاز از نوع Z-NPC پیشنهادی..... ۵۲
- جدول ۳-۳: ترکیب حالت‌های کلیدزنی مجاز برای فاز  $a$  اینورتر Z-NPC پنج سطحی نیم پل سه فاز پیشنهادی..... ۵۲
- جدول ۴-۳: ترکیب حالت‌های کلیدزنی مجاز برای اینورتر  $n$  سطحی نیم پل تک فاز از نوع NPC..... ۶۵
- جدول ۵-۳: حالت‌های کلیدزنی مجاز برای فاز  $a$  کلیدهای اینورتر Z-H-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز پیشنهادی..... ۶۷
- جدول ۶-۳: مقایسه ویژگی‌های انواع مبدل‌های افزایشنده و کاهشنده..... ۶۹
- جدول ۱-۴: پارامترهای به کارگرفته شده برای اینورتر Z-NPC چند سطحی نیم پل تک فاز و سه فاز پیشنهادی..... ۷۲
- جدول ۲-۴: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی مبدل dc-dc افزایشنده-کاهنده Z-H پیشنهادی..... ۷۴
- جدول ۳-۴: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی اینورتر V-NPC پنج سطحی نیم پل تک فاز..... ۷۷
- جدول ۴-۴: پارامترهای به کارگرفته شده برای شبیه‌سازی اینورترهای ۹ و ۱۷ سطحی Z-H-NPC پیشنهادی..... ۷۹

# فصل اول

مقدمه

در سال‌های اخیر تعداد کثیری از واحدهای صنعتی به دستگامی با قدرت بالاتر نیاز پیدا کرده‌اند. تعدادی از "درایوهای موتور ولتاژ متوسط"<sup>1</sup> و هم‌چنین برخی از واحدهای صنایع نیاز به ولتاژ متوسط و توانی در سطح مگاوات پیدا کردند. برای یک شبکه ولتاژ متوسط دشوار است که بتواند به طور مستقیم به یک کلید نیمه‌هادی قدرت متصل شود. لذا به عنوان یک نتیجه، اینورترهای چند سطحی به عنوان یک جایگزینی مناسب در کاربردهای "توان بالا"<sup>2</sup> و "ولتاژ متوسط" معرفی شده‌اند. یک اینورتر چند سطحی نه تنها دستیابی به نسبت‌های توان بالاتر را فراهم می‌سازد بلکه استفاده از "منابع انرژی تجدیدپذیر"<sup>3</sup> را نیز امکان‌پذیر می‌کند. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند فتوولتائیک، بادی و سلول‌های سوختی می‌توانند جهت کاربرد توان بالا به آسانی به یک اینورتر چند سطحی متصل شوند [14-1]. شکل ۱-۱ نحوه‌ی ایجاد ارتباط مابین منبع و بار توسط واسط الکترونیک قدرت را نشان می‌دهد [15].



شکل ۱-۱: نحوه‌ی ایجاد ارتباط مابین منبع و بار توسط واسط الکترونیک قدرت [15]

ایده‌ی اینورترهای چند سطحی از سال ۱۹۷۵ ارائه شده است [1]. اگر چه اصطلاح چند سطحی با اینورتر سه سطحی آغاز شده ولی ممکن است تعاریف برای اینورترهای چند سطحی متفاوت باشد. در این جا اینورتر چند سطحی دارای سطوح سه و یا بیشتر می‌باشد [16, 18]. مفهوم اولیه و اصلی از یک اینورتر چند سطحی دستیابی به توان بالاتر با به کارگیری یک سری از کلیدهای نیمه‌هادی قدرت و تعدادی منابع ولتاژ dc دارای سطوح ولتاژ پایین‌تر می‌باشد تا بتوان تبدیل توان را با ترکیب یک شکل موج ولتاژ پلکانی انجام داد. خازن‌ها، باتری‌ها و منابع ولتاژ انرژی تجدیدپذیر می‌توانند به عنوان منابع ولتاژ dc متعددی مورد استفاده قرار گیرند. علت استفاده از این منابع dc متعدد به منظور دستیابی به ولتاژ بالاتر در خروجی می‌باشد. هم‌چنین نسبت ولتاژ کلیدهای نیمه‌هادی قدرت صرفاً به نسبت منابع ولتاژ dc که به آن‌ها متصل هستند، بستگی دارد [2].

فن‌آوری اینورترهای چند سطحی با به کارگیری قطعات الکترونیک قدرت به سرعت در حال رشد می‌باشد. مورد توجه‌ترین کاربردها از این فن‌آوری که در محدوده‌های ولتاژ متوسط تا ولتاژ بالا (2 الی 13 کیلوولت) می‌باشند شامل درایو موتورها، توزیع توان، کیفیت توان و غیره می‌باشند. بنابراین به طور کلی، اینورترهای چند سطحی می‌توانند به عنوان ترکیب‌کننده ولتاژ بیان شوند که در آن برای ایجاد یک ولتاژ خروجی سطوح بالاتر، تعدادی از منابع ولتاژ مجزای سطوح پایین‌تر با هم ترکیب می‌شوند [12, 10, 18]. از کاربردهای اینورترهای چند سطحی می‌توان برای کاربردهایی

<sup>1</sup> Medium voltage motor drives

<sup>2</sup> High-power

<sup>3</sup> Renewable energy sources

نظیر "تولید توان راکتیو استاتیکی"<sup>1</sup> کاربردهای مبتنی بر باتری، به عنوان یک یکسوساز در خودرو برقی، استفاده در "درایوهای موتور صنعتی ولتاژ متوسط"<sup>2</sup> [8-10]، رابط سودمند برای سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر [11]، "سیستم انتقال ac انعطاف‌پذیر (FACTS)"<sup>3</sup> [12] اشاره کرد [5-14].

اینورترهای چند سطحی دارای برخی معایب نیز می‌باشند. یکی از معایب اصلی آن‌ها نیاز داشتن به تعداد بسیاری از کلیدهای نیمه‌هادی قدرت می‌باشد. اگر چه در یک اینورتر چند سطحی می‌توان کلیدهایی با نسبت ولتاژ پایین‌تر را مورد استفاده قرار داد اما هر کلید به یک مدار راه انداز گیت مربوطه نیاز خواهد داشت که این امر نیز باعث می‌شود تا در حالت کلی سیستم گران قیمت‌تر و پیچیده‌تر شود [2]. هم چنین مسئله حفظ تعادل شارژ خازن هنوز هم موضوع قابل بحث برای ساختار NPC با سطوح بیش‌تر از سه سطحی می‌باشد [37-47].

انواع ساختارهای اینورتر چند سطحی در طول دو دهه گذشته ارائه شده‌اند. سه ساختار مهم و شاخص از این ساختارها که در واحدهای صنعتی نیز مورد استفاده قرار می‌گیرند مربوط به اینورترهای چند سطحی آبشاری تمام پل با منابع dc مجزا (CHB-MLI)<sup>4</sup> [24]، برشگر دیودی یا برشگر نقطه خنثی (NPC-MLI)<sup>5</sup> [16] و برشگر خازن یا خازن‌های شناور (FC-MLI)<sup>6</sup> [25] می‌باشند.

پایان‌نامه حاضر متشکل از ۵ فصل می‌باشد. در فصل اول مروری بر ساختار اینورترهای چند سطحی از نوع V-NPC و Z-NPC شده و هم چنین ساختار و اصول عمل‌کرد مبدل منبع امپدانسی از نوع Z-H نیز تحلیل و بررسی می‌شود. به دلیل اهمیت موضوع اینورترهای چند سطحی جهت دستیابی به توان بالاتر با به کارگیری منابع ولتاژ dc دارای سطوح ولتاژ پایین‌تر، در فصل سوم ساختار گسترش یافته از ساختار پایه اینورتر Z-NPC سه سطحی تک فاز و سه فاز ارائه می‌گردد. علاوه بر این، یک ساختار مبدل منبع امپدانسی افزایشنده-کاهنده جدید از نوع Z-H و ساختارهای گسترش یافته آن از نوع Z-H-NPC نیم پل تک فاز و سه فاز نیز ارائه می‌شوند. همان‌طور که می‌دانیم مسئله حفظ تعادل شارژ خازن برای ساختار اینورترهای NPC با سطوح بیش‌تر از سه سطحی هنوز هم موضوع قابل بحث می‌باشد. بنابراین در فصل سوم یک روش کنترلی جدید نیز برای انواع ساختارهای اینورترهای NPC چند سطحی نیم پل تک فاز و سه فاز ارائه می‌گردد. در فصل چهارم به منظور بررسی عمل‌کرد صحیح ساختارها و روش کنترلی پیشنهادی، شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار PSCAD انجام می‌گیرند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها عمل‌کرد و کارایی بسیار خوب ساختارها و روش کنترلی پیشنهادی را تایید می‌کنند. در نهایت در فصل پنجم دست‌آوردها، نتایج و پیشنهادات ارائه می‌گردند.

<sup>1</sup> Static var generation

<sup>2</sup> Industrial medium-voltage motor drives

<sup>3</sup> Flexible AC Transmission System (FACTS)

<sup>4</sup> Cascaded H-Bridge Multi-Level Inverter (CHB-MLI)

<sup>5</sup> Diode Clamped (Neutral Point Clamped) Multi-Level Inverter (NPC-MLI)

<sup>6</sup> Capacitor Clamped (Flying Capacitor) Multi-Level Inverter (FC-MLI)

# فصل دوم

بررسی منابع

## ۱-۲ مقدمه

در اینورترهای دو سطحی متداول اگر توان اینورتر زیاد باشد در آن صورت ولتاژ باس dc نیز زیاد بوده و در نتیجه پرش ولتاژ خروجی در مبدل بسیار زیاد خواهد بود که این حالت هم سبب بروز مشکل در خازن‌های پارازیت و هم چنین مشکلات دیگری نیز خواهد شد. یکی از راه حل‌های موجود برای پیاده‌سازی اینورترهای توان بالا استفاده از اینورترهای چند سطحی می‌باشد که در این صورت پرش ولتاژ خروجی کم‌تر شده و حداکثر ولتاژ قابل تحمل کلیدها نیز کاهش می‌یابد. لذا در این فصل مروری بر ساختار اینورترهای چند سطحی از نوع V-NPC و Z-NPC خواهد شد. هم چنین در این فصل، ساختار و اصول عمل‌کرد مبدل منبع امپدانسی از نوع Z-H نیز تحلیل و بررسی می‌شود. به منظور بررسی عمل‌کرد صحیح ساختارها، شبیه‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار PSCAD انجام می‌گیرند.

۲-۲ ساختار پایه اینورترهای چند سطحی مبتنی بر "برشگر نقطه خنثی"<sup>۱</sup>

ساختار اینورترهای چند سطحی از نوع برشگر نقطه خنثی (NPC) برای اولین بار توسط Nabae و همکاران [16] در سال ۱۹۸۰ ارائه شد. از مزایای اینورترهای چند سطحی مبتنی بر برشگر دیودی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد [2]:

- ۱- پیشرفت‌های بسیاری را در پایین آوردن تغییرات ولتاژ نسبت به زمان و هم چنین استرس کلیدها به وجود آورد.
- ۲- تمامی فازها، یک باس dc مشترک را به اشتراک می‌گذارند تا خازن مورد نیاز مبدل را به حداقل برسانند.
- ۳- این ساختار دارای تنوع خوبی برای اینورترهای تک فاز و سه فاز می‌باشد.

با این حال نتایج تجربی برای این ساختار چندین مشکل فنی را نیز ارائه می‌دهد که آن هم به نوبه خود باعث می‌شود تا کاربرد آن برای مبدل‌های توان بالا مشکل‌تر و پیچیده‌تر شود. تعدادی از این مشکلات به شرح زیر می‌باشند [18]:

۱- این ساختار به "دیودهای برشگر سرعت بالا"<sup>۲</sup> نیاز دارد که بایستی قادر به حمل جریان کل بار باشد و هم چنین عواملی هستند که "استرس بازیابی معکوس"<sup>۳</sup> را تشدید می‌کنند. اگرچه اقداماتی برای کاهش این مشکل می‌توان انجام داد ولی با این حال این موضوع به عنوان یک مشکل مطرح می‌باشد.

۲- مسئله حفظ تعادل شارژ خازن هنوز هم موضوع قابل بحث برای ساختار NPC با سطوح بیش‌تر از سه سطحی می‌باشد [37-47]. هم چنین ساختارهای NPC با سطوح بیش‌تر از سه سطحی موضوعی هستند که استرس ولتاژ را به

صورت رابطه  $\frac{V_i(n-1)}{n}$  افزایش می‌دهند. بنابراین ممکن است که اتصال سری دیودها مورد نیاز باشد.

۳- تعداد دیودهای برشگر به تعداد سطوح اینورتر بستگی دارند لذا این پیچیدگی‌ها در طراحی، نگرانی‌ها را در هزینه و قابلیت اطمینان افزایش می‌دهد.

ساختار اینورتر NPC سه سطحی با بارهای ضریب توان بالا به خوبی کار می‌کند و ساختار اینورترهای NPC با بیش از سه سطحی اغلب برای مدارهای جبران‌سازی توان راکتیو استاتیکی استفاده می‌شود. این امر ممکن است مربوط به مسائل تعادل خازن باشد. در ساختار اینورتر NPC استفاده از مدولاسیون NTV<sup>۴</sup> به دلیل این که دارای طرح

<sup>1</sup> Neutral Point Clamped (NPC)

<sup>2</sup> High speed clamping diodes

<sup>3</sup> Reverse recovery stress

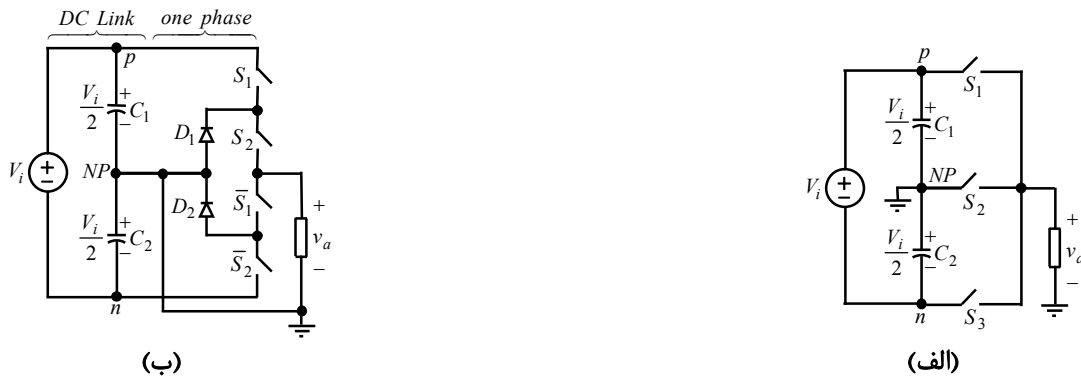
<sup>4</sup> Nearest Three Vector (NTV)



طرح مدولاسیون با حداقل مقدار استرس و عمل کرد طیفی عالی می باشد نسبت به سایر روش های دیگر بیشتر ترجیح داده می شود [18].

### ۱-۲-۲ ساختار اینورتر سه سطحی نیم پل تک فاز از نوع V-NPC

شکل ۱-۲ ساختار پایه اینورتر سه سطحی نیم پل تک فاز مبتنی بر برشگر دیودی را نشان می دهد [16]. در ساختار اینورتر برشگر دیودی، تعدادی خازن برای تقسیم ولتاژ در دو سر لینک dc مورد استفاده قرار می گیرند [17].



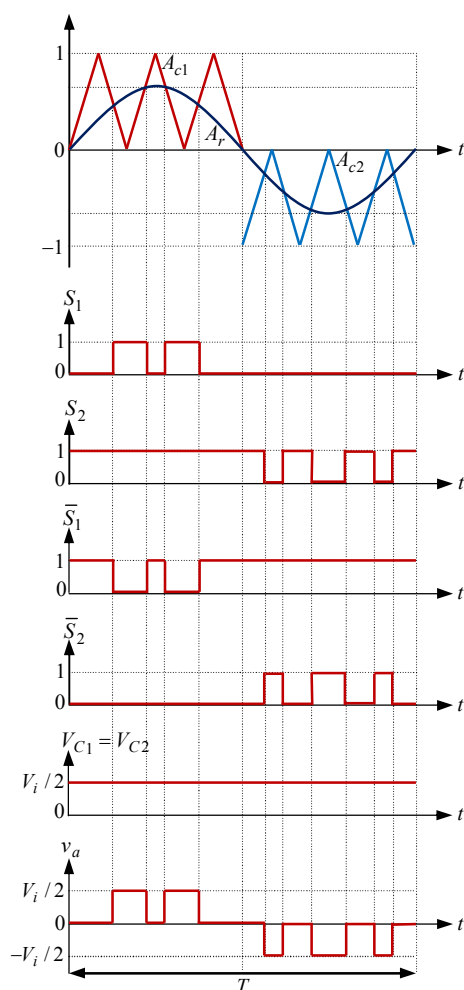
شکل ۱-۲: ساختار پایه اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز؛ (الف) ساختار کلی؛ (ب) ساختار عملی [16]

با توجه به شکل ۱-۲-الف، برای تولید ولتاژ  $+\frac{V_i}{2}$  بایستی کلید  $S_1$  روشن شده و برای تولید ولتاژ  $-\frac{V_i}{2}$  بایستی کلید  $S_3$  روشن شود. با روشن شدن کلید  $S_2$  ولتاژ خروجی برابر صفر می شود. ساختار عملی این حالت در شکل ۱-۲-ب نشان داده شده است. اینورتر برشگر دیودی سه سطحی نشان داده شده در شکل ۱-۲-ب شامل چهار کلید IGBT دو طرفه جریان-یک طرفه ولتاژ می باشد. به دلیل این که روشن و خاموش شدن دو کلید بالایی  $S_1$  و  $S_2$  به ترتیب با دو کلید پایینی  $\bar{S}_1$  و  $\bar{S}_2$  مکمل می باشند لذا عمل کرد دو کلید بالایی  $S_1$  و  $S_2$  دقیقاً برعکس با عمل کرد دو کلید پایینی  $\bar{S}_1$  و  $\bar{S}_2$  خواهد بود. جدول ۱-۲ مقادیر مختلف  $v_a$  را به ازای سه حالت کلیدزنی مجاز در اینورتر منبع ولتاژ NPC سه سطحی نیم پل تک فاز نشان می دهد.

جدول ۱-۲: مقادیر مختلف  $v_a$  به ازای حالت های کلیدزنی مجاز در اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز

$v_a$	حالت های کلیدزنی مجاز					
	$S_1$	$S_2$	$D_1$	$\bar{S}_1$	$\bar{S}_2$	$D_2$
$+\frac{V_i}{2}$	1	1	OFF	0	0	ON
0	0	1	ON	1	0	ON
$-\frac{V_i}{2}$	0	0	ON	1	1	OFF

مطابق شکل ۱-۲-ب و جدول ۱-۲ مشاهده می شود که در اینورتر V-NPC سه سطحی، حداکثر ولتاژی که در دو سر هر کلید می افتد برابر با  $\frac{V_i}{2}$  می باشد. شکل ۲-۲ سیگنال های کنترلی کلید های  $S_1$  تا  $S_4$  و شکل موج های ولتاژ اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز نشان داده شده در شکل ۱-۲-ب را نشان می دهد.



شکل ۲-۲: سیگنال‌های کنترلی و شکل موج‌های ولتاژ اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل تک فاز

ساختار اینورتر NPC سه سطحی نسبت به ساختار دو سطحی متداول دارای چندین مزیت به شرح زیر می‌باشد [18]:

- ۱- ولتاژ موجود در دو سر کلیدها فقط نصف ولتاژ "اتصال" <sup>1</sup>dc می‌باشد.
- ۲- این ساختار می‌تواند تعمیم یافته و اصول مورد استفاده در ساختار پایه سه سطحی را می‌توان برای استفاده در ساختارهایی با هر تعداد از سطوح گسترش داد.
- ۳- در مقایسه با اینورترهای آبشاری برخی از صرفه‌جویی‌ها مانند کاهش تعداد منابع ولتاژ dc می‌تواند به دست آید.

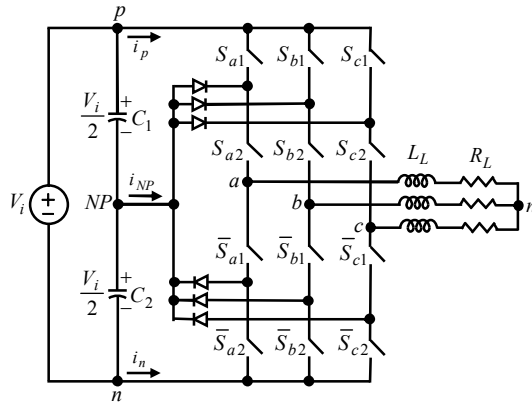
قابل ذکر است که اینورتر NPC سه سطحی نیم پل تک فاز دارای معایبی هم چون دارا بودن دو دیود اضافی  $D_1$  و  $D_2$  و نیاز داشتن به دو سطح ولتاژ (به علت وجود دو عدد خازن) می‌باشد.

در یک اینورتر  $n$  سطحی برشگر دیودی نیم پل تک فاز، تعداد  $2(n-1)$  کلید تمام کنترل شونده و تعداد  $2(n-2)$  دیود برشگر مورد نیاز است. لازم به ذکر است که این دیودها به غیر از دیودهای موازی- معکوس کلیدهای اینورتر می‌باشند.

#### ۲-۲-۲ ساختار اینورتر برشگر دیودی سه سطحی نیم پل سه فاز

شکل ۲-۳ ساختار اینورتر منبع ولتاژ NPC سه سطحی نیم پل سه فاز را نشان می‌دهد [16, 17]. جدول ۲-۲ ترکیب حالت‌های کلیدزنی مجاز را برای کلیدهای هر فاز از اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز نشان می‌دهد.

<sup>1</sup> Dc link



شکل ۲-۳: ساختار اینورتر منبع ولتاژ NPC سه سطحی نیم پل سه فاز [16, 17]

جدول ۲-۲: حالت‌های کلیدزنی مجاز برای هر یک از فازهای اینورتر V-NPC سه سطحی نیم پل سه فاز

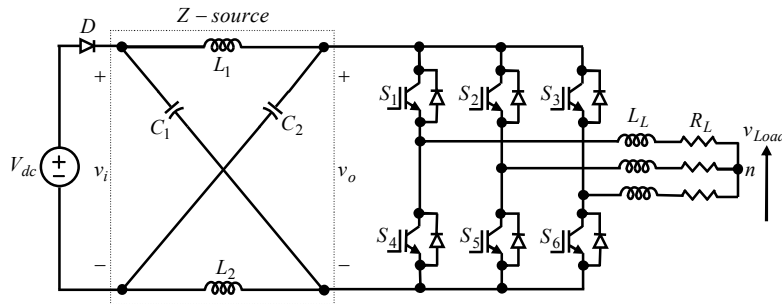
$v_x$	حالت‌های کلیدزنی مجاز			
	$S_{1x}$	$S_{2x}$	$\bar{S}_{1x}$	$\bar{S}_{2x}$
$+\frac{V_i}{2}$	1	1	0	0
0	0	1	1	0
$-\frac{V_i}{2}$	0	0	1	1

$$x \in \{a, b, c\}$$

### ۳-۲ ساختار پایه اینورتر منبع امپدانسی سه فاز

ساختار پایه اینورتر منبع امپدانسی یا اینورتر نوع Z سه فاز توسط Peng [26] در سال ۲۰۰۳ ارائه شد. اینورتر منبع امپدانسی، یک ساختار توسعه یافته جدید در مقایسه با مبدل‌های منبع ولتاژ و منبع جریان متداول می‌باشد. اینورتر منبع امپدانسی شامل یک شبکه امپدانسی منحصر به فردی بوده که با ایجاد یک ساختار مبدل "تک مرحله‌ای"<sup>۱</sup> می‌تواند اندازه ولتاژ خروجی را افزایش و کاهش دهد [27]. شکل ۲-۴ ساختار پایه اینورتر منبع امپدانسی سه فاز را نشان می‌دهد [26]. اینورتر منبع امپدانسی، از یک شبکه منبع امپدانسی منحصر به فرد شامل دیود  $D$ ، دو سلف  $L_1$  و  $L_2$  و دو خازن  $C_1$  و  $C_2$  با آرایش  $X$  تشکیل می‌شود. با توجه به شکل ۲-۴، اگر سلف‌های  $L_1$  و  $L_2$  دارای اندوکتانس بسیار کم (تقریباً برابر صفر) باشند شبکه منبع امپدانسی (یا منبع  $Z$ ) تنها شامل دو خازن موازی  $C_1$  و  $C_2$  خواهد بود لذا اینورتر منبع امپدانسی به سادگی تبدیل به یک اینورتر منبع ولتاژ می‌شود و خازن‌ها در مدار dc علاوه بر ذخیره‌سازی انرژی، هم زمان به عنوان یک عنصر برای فیلتر کردن نوسانات ولتاژ نیز می‌باشند. به همین ترتیب زمانی که خازن‌های  $C_1$  و  $C_2$  دارای ظرفیت کم (تقریباً برابر صفر) باشند شبکه منبع امپدانسی تنها شامل دو سلف سری  $L_1$  و  $L_2$  خواهد بود لذا اینورتر منبع امپدانسی به سادگی تبدیل به یک اینورتر منبع جریان می‌شود. سلف‌های موجود در ورودی اینورترهای از نوع منبع جریان دارای اندوکتانس بزرگ‌تر و خازن‌های موجود در ورودی اینورترهای از نوع منبع ولتاژ دارای ظرفیت بزرگ‌تری نسبت به اینورتر از نوع منبع امپدانسی می‌باشند. شبکه منبع امپدانسی به عنوان یک ذخیره‌ساز انرژی، میراکننده ریپل‌های جریان و نوسانات ولتاژ در مدار dc می‌باشد. بنابراین ملزومات مورد نیاز برای سلف‌ها و خازن‌ها در منبع امپدانسی کم‌تر از ملزومات مربوط به اینورترهای منبع ولتاژ و یا جریان متداول خواهند بود [28].

<sup>1</sup> Single-stage



شکل ۲-۴: ساختار پایه اینورتر منبع امپدانس سه فاز [26]

تمامی کلیدهای موجود در شکل ۲-۴ به صورت کلیدهای دو طرفه جریان-یک طرفه ولتاژ می‌باشند. قابل ذکر است که سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_1$ ،  $S_2$  و  $S_3$  به ترتیب مکمل با سیگنال‌های کنترلی کلیدهای  $S_4$ ،  $S_5$  و  $S_6$  می‌باشند. با توجه به شکل ۲-۴ در اینورتر منبع امپدانس، یک دیود (یا کلید) ماقبل شبکه LC مورد نیاز است. قابل ذکر است که به دلیل ناپیوسته بودن جریان، وجود این دیود یک حالت عمل‌کرد نامطلوب را در طول بازه "حالت کلیدزنی غیر ST"<sup>۱</sup> به وجود خواهد آورد [27]. هم‌چنین در اینورترهای منبع امپدانس، دیود  $D$  مانع عبور جریان معکوس می‌شود به همین دلیل استفاده از این نوع اینورترها ممکن است تنها در جاهایی که هیچ نیازی به بازگشت انرژی به منبع  $V_{dc}$  نباشد به کار برده شود [28].

### ۲-۳-۱ اصول عمل‌کرد اینورتر منبع امپدانس سه فاز

اینورتر منبع ولتاژ سه فاز متداول دارای هشت حالت کلیدزنی مجاز می‌باشد. در این اینورتر هنگامی که ولتاژ dc (به صورت ولتاژ مثبت یا منفی) در دو سر بار قرار گیرد دارای شش بردار فعال بوده و هنگامی که ترمینال‌های بار توسط هر سه کلید بالایی یا پایینی اتصال کوتاه شوند دارای دو بردار صفر می‌باشد. به عبارت دیگر در طول دو بردار صفر، سه کلید بالایی یا پایینی به صورت هم‌زمان روشن می‌شوند که موجب اتصال کوتاه شدن ترمینال‌های خروجی اینورتر شده و ولتاژ بار برابر با صفر می‌شود [26]. در مقایسه با اینورتر سه فاز متداول، اینورتر منبع امپدانس سه فاز می‌تواند در ۹ حالت مجاز کار کند که نسبت به اینورتر منبع ولتاژ متداول دارای یک حالت کلیدزنی مجاز بیشتر می‌باشد. حالت "نهم" در این نوع اینورتر زمانی اتفاق می‌افتد که بار به صورت هم‌زمان توسط گروه پایینی و بالایی از کلیدها اتصال کوتاه شود. در این حالت ترمینال‌های ورودی اینورتر اتصال کوتاه شده و ولتاژ اعمالی به بار برابر با صفر می‌شود. این حالت صفر، "حالت صفر ST"<sup>۲</sup> نام‌گذاری شده است که در اینورتر منبع ولتاژ متداول ممنوع می‌باشد. بنابراین حالت‌های صفر ST همانند حالت‌های صفر متداول تاثیر مشابهی بر روی بار می‌گذرانند (یعنی تولید ولتاژ صفر) ولی با این وجود، این حالت‌های صفر ST می‌توانند ولتاژ dc را افزایش دهند در عین حالی که حالت‌های فعال جهت حفظ شکل‌موج ولتاژ خروجی بدون تغییر باقی می‌مانند. بسته به افزایش ولتاژ dc مورد نیاز، تعدادی از حالت‌های صفر متداول و یا حتی تمامی حالت‌های صفر متداول می‌توانند با حالت‌های صفر ST جایگزین شوند [29]. وجود حالت صفر ST در اینورتر منبع امپدانس مزایایی به شرح زیر را به همراه خواهد داشت:

- ۱- یکی از ویژگی‌های اصلی و منحصر به فرد اینورتر منبع امپدانس این است که حالت ST اجازه می‌دهد تا اندازه ولتاژ خروجی از اندازه ولتاژ منبع ورودی  $V_{dc}$  بیش‌تر شود.
- ۲- اینورتر منبع امپدانس می‌تواند ولتاژ ورودی dc را بدون هیچ نیازی داشتن به مبدل dc-dc افزایش دهد یا ترانسفورماتور افزایش دهد [26].
- ۳- این اینورتر با غلبه بر محدودیت در ولتاژ خروجی اینورتر منبع ولتاژ متداول موجب کاهش هزینه‌ها می‌شود [26].

<sup>۱</sup> Nonshoot-through switching state

<sup>۲</sup> Shoot-Through (ST) zero state