



دانشکده فنی

گروه برق

پایان نامه جهت دریافت درجه کارشناسی ارشد مهندسی برق

کاربرد اینورتر منبع امپدانسی در ادوات *FACTS*

استاد راهنما: دکتر داریوش نظرپور

استاد مشاور: دکتر سید حسین حسینی

تنظیم و نگارش: اکبر لک

مهر ۱۳۹۱

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## **تقدیم به پدر و مادر عزیزم**

خدای را بسی شاکرم که از سر لطف بیکرانش پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پربار وجودشان بیسایم 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 گرفته اند و راه رفتن را در این وادی زندگی پرفراز و نشیب آموختند.

## **آموزگارانی که برایم زندگی؛ بودن و انسان بودن را معنا کردند حال این برگ سبزی است تحفه درویشی تقدیم آنان....**

و نیز تقدیم به برادران و خواهر عزیزم که همواره مشوق و تکیه گاه من در طول زندگی و دوران تحصیل بوده اند.

از جناب آقای دکتر نظرپور که در طول دوره کارشناسی ارشد همواره راهنمای بنده بوده اند صمیمانه تشکر و قدردانی می نمایم. ایشان برایم از همه جهات علمی، شخصیتی و رفتاری الگویی بس با ارزش بوده اند. باشد که روزی بتوانم اندک ذره ای از محبت های بی دریغ ایشان را پاسخ بگویم.

همچنین از زحمات جناب آقای دکتر حسینی که استاد مشاور اینجانب در این پایان نامه بوده اند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

## چکیده

اینورترهای نسل قدیم که در دو نوع مختلف منبع ولتاژ و منبع جریان می باشند، دارای محدودیت ها و معایبی هستند. از جمله این معایب: محدودیت در دامنه ولتاژ یا جریان خروجی می باشد، خروجی اینورترهای نسل قدیم نمی تواند از اندازه منبع ورودی اینورتر فراتر رود. از طرف دیگر به دلیل اینکه در این اینورترها کلید های تایریستوری در یک ساق هم زمان نمی توانند روشن باشند، بنابراین به ناچار در این حالت خروجی اینورتر باید مدار باز باشد و این هم باعث پایین آمدن بازده اینورتر می شود. با پیشرفت روز افزون در زمینه الکترونیک قدرت در سال ۲۰۰۲ اولین بار یک اینورتر جدید توسط پرفسور *Fang Z. peng* ارائه و ساخته شد این اینورتر، اینورتر منبع امپدانس<sup>۱</sup> نام دارد. به دلیل اینکه این اینورتر جدید معایب اینورترهای نسل قدیم را ندارد، از این سال به بعد مقالات زیادی در زمینه این اینورتر و کاربرد آن در زمینه های مختلف انجام شده است.

با توجه به مزایای این اینورتر نسبت به اینورترهای قدیمی بر آن شدیم تا در این پایان نامه کاربرد این اینورتر منبع امپدانس را در سیستم های انتقال *AC* انعطاف پذیر *FACTS*<sup>۲</sup> مطرح کرده و مورد بحث و بررسی قرار دهیم. که در این پایان نامه به جبران ساز استاتیکی سنکرون سری *SSSC*<sup>۳</sup> بر مبنای اینورتر منبع امپدانس پرداخته شده است.

---

<sup>۱</sup> Z-source inverter

<sup>۲</sup> Flexible AC Transmission System

<sup>۳</sup> Static Synchronous Series Compensator

مبدل های قدرت<sup>۱</sup> در فرآیندهای الکتریکی قدرت مورد استفاده قرار می گیرند. مبدل ها بر حسب مشخصات و خصوصیتی که دارند کمیت های الکتریکی از قبیل سطح ولتاژ و فرکانس را تغییر می دهند. یکی از پرکاربردترین نوع مبدل های قدرت، اینورتر<sup>۲</sup> های  $DC/AC$  می باشد. اما این اینورترها دارای محدودیت ها و معایبی هستند. از جمله این معایب: محدودیت در دامنه ولتاژ یا جریان خروجی می باشد، خروجی اینورتر های نسل قدیم نمی تواند از اندازه منبع ورودی اینورتر فراتر رود. از طرف دیگر به دلیل اینکه در این اینورترها کلید های تایریستوری در یک ساق هم زمان نمی توانند روشن باشند، بنابراین به ناچار در این حالت خروجی اینورتر باید مدار باز باشد و این هم باعث پایین آمدن بازده اینورتر می شود. با پیشرفت روز افزون در زمینه الکترونیک قدرت در سال ۲۰۰۲ اولین بار یک اینورتر جدید توسط پرفسور *Fang Z. peng* ارائه و ساخته شد. لذا در فصل ۲ این پایان نامه در مورد اینورترهای منبع امپدانس صحبت شده است. در این فصل عملکرد این اینورتر در حالت ماندگار و روش های افزایشی کلید زنی و مقایسه آن با اینورتر های قدیمی بحث شده است. به دلیل اینکه این اینورتر جدید معایب اینورتر های نسل قدیم را ندارد، مقالات زیادی در زمینه این اینورتر و کاربرد آن در زمینه های مختلف انجام شده است. تکنولوژی سیستم های انتقال  $AC$  انعطاف پذیر ( $FACTS^3$ ) ابزاری بسیار مهم برای بارپذیری خطوط انتقال موجود می باشند که استفاده از این تکنولوژی این امکان را فراهم می آورد که حداقل در موقعیت های گذرا خطوط انتقال موجود تا حد حرارتی خود توانایی انتقال توان را داشته باشند بدون اینکه پایداری سیستم را پایین آورند. اصلی ترین ویژگی این تکنولوژی توانایی آن در کنترل مستقیم توان عبوری از خطوط انتقال و نیز سایر پارامتر های سیستم قدرت شامل ولتاژ باس ها و ... می باشد. به همین خاطر در فصل ۳ در مورد ادوات  $FACTS$  سری نسل اول و جبران ساز استاتیکی سنکرون سری  $SSSC^4$  به عنوان یکی از پرکاربردترین ادوات  $FACTS$  سری نسل دوم صحبت شده است. با توجه به مزایای اینورتر منبع امپدانس نسبت به اینورترهای قدیمی، در فصل ۳ استفاده از این اینورتر در ساختار  $SSSC$  مطرح می شود.

---

<sup>1</sup> Power Converter

<sup>2</sup> Inverter

<sup>3</sup> Flexible AC Transmission Systems

<sup>4</sup> Static Synchronous Series Compensator

همچنین در این فصل الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات<sup>1</sup> *PSO* به عنوان یکی از پرکاربردترین الگوریتم‌ها در سیستم قدرت برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترلی، کنترل‌کننده‌های *SSSC* نیز مطرح خواهد شد. در فصل آخر نیز نتایج شبیه‌سازی در محیط نرم افزار *Simulink/Matlab* برای اینورتر منبع امپدانس و *SSSC* مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس ارائه می‌شود.

---

<sup>1</sup> *Particle Swarm Optimization*

# فهرست مطالب

## فصل ۱: مبدل‌های قدرت

- ۱-۱ مقدمه..... ۱
- ۱-۲ ساختارهای اساسی مبدل‌های قدرت..... ۲
- ۱-۲-۱ مبدل‌های  $DC/AC$  (اینورترها)..... ۳
- ۱-۳ معایب و محدودیت‌های اینورترهای قدیمی..... ۸
- ۱-۴ جمع‌بندی..... ۹

## فصل ۲: مبدل‌های منبع‌امپدانسی

- ۲-۱ مقدمه..... ۱۰
- ۲-۲ عملکرد در حالت ماندگار..... ۱۳
- ۲-۳ مدولاسیون اینورتر منبع‌امپدانسی..... ۱۶
- ۲-۴ روش‌های افزایشی..... ۲۰
- ۲-۴-۱ روش افزایشی ساده..... ۲۰
- ۲-۴-۲ روش ماکزیمم افزایش..... ۲۲
- ۲-۴-۳ روش افزایشی ثابت..... ۲۴
- ۲-۵ مقایسه اینورترهای قدیمی و اینورتر منبع‌امپدانسی..... ۲۶
- ۲-۶ موارد کاربرد اینورترهای منبع‌امپدانسی..... ۲۹
- ۲-۷ جمع‌بندی..... ۳۰

## فصل ۳: معرفی جبران‌ساز استاتیکی سنکرون سری مبتنی بر اینورتر منبع‌امپدانسی

- ۳-۱ مقدمه..... ۳۱
- ۳-۲ جبران‌سازهای سری مبتنی بر کلیدهای تریستوری..... ۳۳
- ۳-۲-۱ خازن سری سوئیچ شده با تریستور ( $TSSC$ )..... ۳۳
- ۳-۲-۲ خازن سری کنترل شده با تریستور ( $TCSC$ )..... ۳۵
- ۳-۲-۳ خازن سری کنترل شده با تریستور  $GTO$  ( $GCSC$ )..... ۳۸



۴۱	..... مقایسه بین $GCSC$ و $TCSC$
۴۱	..... ۳-۲-۴-۱ مقایسه از نظر اندازه خازن بکار رفته و ابعاد جبران ساز
۴۲	..... ۳-۲-۴-۲ مقایسه از نظر ولتاژ و جریان عبوری از خازن
۴۲	..... ۳-۲-۴-۳ مقایسه از نظر محدوده کنترل
۴۲	..... ۳-۲-۴-۴ مقایسه کلید های بکار رفته
۴۳	..... ۳-۳ جبران ساز $Var$ استاتیک ( $SVC$ )
۴۵	..... ۳-۴ جبران سازهای سری مبتنی بر مبدلها (نسل دوم)
۴۶	..... ۳-۴-۱ جبران ساز استاتیکی سنکرون سری ( $SSSC$ )
۴۶	..... ۳-۴-۱-۱ مبنای عملکرد $SSSC$
۴۷	..... ۳-۴-۱-۲ مدهای عملکردی $SSSC$
۵۰	..... ۳-۴-۲ مقایسه $SSSC$ با $TCSC$
۵۱	..... ۳-۵ الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات
۵۸	..... ۳-۶ جمع بندی

## فصل ۴: نتایج شبیه سازی

۵۹	..... ۴-۱ مقدمه
۵۹	..... ۴-۲ شبیه سازی اینورتر منبع امپدانس
۵۹	..... ۴-۲-۱ مدار ساده انتخاب شده برای شبیه سازی اینورتر منبع امپدانس
۶۰	..... ۴-۲-۲ روش کلید زنی افزایشی ثابت $PWM$
۶۱	..... ۴-۲-۳ الگوریتم $PSO$ برای بهینه سازی اینورتر منبع امپدانس
۶۲	..... ۴-۲-۴ نتایج شبیه سازی
۶۴	..... ۴-۳ شبیه سازی جبران ساز استاتیکی سنکرون سری مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس
۶۵	..... ۴-۳-۱ معرفی سیستم شبیه سازی
۶۶	..... ۴-۳-۲ مدار کنترلی $SSSC$ مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس
۶۶	..... ۴-۳-۲-۱ روش های کنترلی $SSSC$
۶۸	..... ۴-۳-۳ الگوریتم $PSO$ برای $SSSC$ مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس
۶۹	..... ۴-۳-۴ نتایج شبیه سازی

۴-۴ جمع بندی.....۷۴

## فصل ۵: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱ جمع بندی.....۷۶

۵-۲ نتیجه گیری.....۷۷

۵-۳ پیشنهادات.....۷۸

مراجع.....۷۹

## فهرست اشکال

- شکل ۱-۱ بلوک دیاگرام نوعی از مبدل قدرت..... ۲
- شکل ۱-۲ بلوک دیاگرام مبدل  $DC/AC$ ..... ۴
- شکل ۱-۳ اینورتر تک فاز تمام پل..... ۴
- شکل ۱-۴ شکل موج خروجی ولتاژ  $AC$ ..... ۴
- شکل ۱-۵ شکل موج خروجی ولتاژ  $AC$  با استفاده از حالت صفر..... ۵
- شکل ۱-۶ شکل موج خروجی ولتاژ  $AC$  با استفاده از روش کنترل  $PWM$ ..... ۵
- شکل ۱-۷ اینورتر سه فاز تمام پل ۶ کلیدی..... ۶
- شکل ۱-۸ شکل موج خروجی فاز به فاز و کلیدهای مطابق با وضعیت شکل موج..... ۷
- شکل ۱-۹ اینورتر های سه فاز تفکیک شده بر حسب منابع شان (الف) اینورتر منبع ولتاژ (ب) اینورتر منبع جریان..... ۸
- شکل ۲-۱ مبدل منبع امپدانس در حالت اینورتر منبع امپدانس  $DC/AC$ ..... ۱۱
- شکل ۲-۲ کلید زنی  $PWM$  براساس موج حامل مثلثی برای اینورتر منبع ولتاژ..... ۱۲
- شکل ۲-۳ کلید زنی  $PWM$  براساس موج حامل مثلثی تغییر داده شده برای اینورتر منبع امپدانس..... ۱۳
- شکل ۲-۳ اینورتر منبع امپدانس ساده شده..... ۱۴
- شکل ۲-۴ حالت  $shoot-trough$  مبدل منبع امپدانس ساده شده..... ۱۴
- شکل ۲-۵ حالت اکتیو مبدل منبع امپدانس ساده شده..... ۱۵
- شکل ۲-۶ اینورتر منبع امپدانس تمام پل تک فاز..... ۱۷
- شکل ۲-۷ مدولاسیون اینورتر منبع امپدانس تمام پل..... ۱۷
- شکل ۲-۸ مدولاسیون کلیدزنی به روش افزایشی ساده  $PWM$  برای اینورتر منبع امپدانس..... ۲۱
- شکل ۲-۹ استرس ولتاژ عبوری از کلیدها بر حسب بهره ولتاژ برای روش افزایشی ساده..... ۲۲
- شکل ۲-۱۰ مدولاسیون کلیدزنی به روش ماکزیمم افزایشی  $PWM$  برای اینورتر منبع امپدانس..... ۲۳
- شکل ۲-۱۱ استرس ولتاژ عبوری از کلیدها بر حسب بهره ولتاژ برای روش ماکزیمم افزایشی..... ۲۴
- شکل ۲-۱۲ مدولاسیون کلیدزنی به روش افزایشی ثابت  $PWM$  برای اینورتر منبع امپدانس..... ۲۵
- شکل ۲-۱۳ استرس ولتاژ عبوری از کلیدها بر حسب بهره ولتاژ برای روش افزایشی ثابت..... ۲۷
- شکل ۲-۱۴ اینورتر منبع ولتاژ  $PWM$  قدیمی..... ۲۷
- شکل ۲-۱۵ اینورتر منبع ولتاژ افزایشی بوسیله مبدل  $DC/DC$  افزایشی  $PWM$ ..... ۳۳
- شکل ۳-۱ مدار خازن سری سوئیچ شده با تریستور..... ۳۴

- شکل ۲-۳ نحوه عملکرد  $TSSC$  ..... ۳۵
- شکل ۳-۳ تاثیر  $TSSC$  در کنترل شارش توان در یک خط انتقال ..... ۳۶
- شکل ۳-۴ مدار خازن سری کنترل شده با تریستور ..... ۳۷
- شکل ۳-۵ محدوده عملکرد  $TCSC$  ..... ۳۸
- شکل ۳-۶ تاثیر  $TCSC$  در کنترل شارش توان در یک خط انتقال ..... ۳۹
- شکل ۳-۷ خازن سری کنترل شده با تریستور  $GTO$  ..... ۳۹
- شکل ۳-۸ نحوه عملکرد  $GCSC$  ..... ۴۰
- شکل ۳-۹ امپدانس موثر خازنی  $GCSC$  بر حسب  $\gamma$  ..... ۴۳
- شکل ۳-۱۰ ساختمان  $SVC$  و مشخصه  $V-I$  آن ..... ۴۵
- شکل ۳-۱۱ انواع  $SVC$  ..... ۴۶
- شکل ۳-۱۲ شمای کلی  $SSSC$  ..... ۴۷
- شکل ۳-۱۳ شبکه ساده جبران سازی شده الف) توسط خازن سری ب) توسط منبع ولتاژ سنکرون ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۴ تاثیر  $SSSC$  بر توان منتقله از یک خط الف) برای مد عملکردی ولتاژ ثابت ب) برای مد عملکردی راکتانس ثابت ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۵ محدوده کنترلی الف) برای  $SSSC$  ب) برای  $TCSC$  ..... ۶۰
- شکل ۴-۱ مدار شبیه سازی اینورتر منبع امپدانس ..... ۶۱
- شکل ۴-۲ الگوریتم کلید زنی افزایشی ثابت  $PWM$  برای اینورتر منبع امپدانس ..... ۶۲
- شکل ۴-۳ ولتاژ خروجی اینورتر منبع امپدانس برای روش کلید زنی ماکزیمم افزایشی ثابت  $PWM$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۴ تحلیل  $FFT$  ولتاژ خروجی اینورتر منبع امپدانس برای روش کلید زنی ماکزیمم افزایشی ثابت  $PWM$  ..... ۶۳
- شکل ۴-۵ ولتاژ خروجی اینورتر منبع امپدانس برای روش کلید زنی ماکزیمم افزایشی ثابت  $PWM$  بهینه شده بوسیله الگوریتم  $PSO$  ..... ۶۴
- شکل ۴-۶ تحلیل  $FFT$  ولتاژ خروجی اینورتر منبع امپدانس برای روش کلید زنی ماکزیمم افزایشی ثابت  $PWM$  بهینه شده بوسیله الگوریتم  $PSO$  ..... ۶۵
- شکل ۴-۷ اینورتر منبع امپدانس سه فاز ..... ۶۵
- شکل ۴-۸ اینورتر منبع امپدانس سه فاز با ساختار قابل استفاده در  $SSSC$  ..... ۶۶
- شکل ۴-۹ سیستم انتخاب شده برای شبیه سازی  $SSSC$  مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۰ مدار کنترلی، کنترل درونی  $SSSC$  مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس به روش غیرمستقیم ..... ۶۸
- شکل ۴-۱۱ کنترل بیرونی  $SSSC$  مبتنی بر اینورتر منبع امپدانس ..... ۷۰

- شکل ۱۲-۴ توان اکتیو عبوری از خط انتقال ۳ بدون حضور *SSSC* ..... ۷۰
- شکل ۱۳-۴ جریان عبوری از خط انتقال ۳ بدون حضور *SSSC* ..... ۷۱
- شکل ۱۴-۴ جریان عبوری قبل *SSSC* ..... ۷۲
- شکل ۱۵-۴ جریان عبوری بعد *SSSC* ..... ۷۲
- شکل ۱۶-۴ توان اکتیو عبوری از خط انتقال ۳ با حضور *SSSC* ..... ۷۹
- شکل ۱۷-۴ جریان عبوری از خط به همراه ولتاژ تزریقی اینورتر منبع امپدانس ..... ۷۳
- شکل ۱۸-۴ جریان عبوری از خط به همراه ولتاژ تزریقی اینورتر منبع امپدانس به صورت جزئی تر ..... ۷۳
- شکل ۱۹-۴ ولتاژ خازن لینک *DC* مربوط به *SSSC* ..... ۷۴

## فهرست جداول

- جدول ۱-۲ حالت های کلید زنی اینورتر منبع امپدانسی تمام پل ( $S_x$ ، مکمل کلید  $S_x$  است)..... ۱۷
- جدول ۲-۲ مقایسه قدرت کلید زنی..... ۲۸
- جدول ۳-۲ عناصر پسیو مورد نیاز..... ۲۹
- جدول ۱-۳ فهرست کاربردهای الگوریتم بهینه سازی ذرات..... ۵۳
- جدول ۱-۴ پارامترها مدار شبیه سازی اینورتر منبع امپدانسی..... ۶۰
- جدول ۲-۴ پارامتر های خطوط انتقال..... ۶۶
- جدول ۴-۴ محدوده و مقادیر بدست آمده پارامترها بوسیله الگوریتم  $PSO$ ..... ۶۹
- جدول ۵-۴ مشخصات  $SSSC$  مبتنی بر اینورتر منبع امپدانسی..... ۷۱

# فصل ۱

## مبدل‌های قدرت

### ۱-۱ مقدمه

مبدل‌های قدرت<sup>۱</sup> در فرآیندهای الکتریکی قدرت استفاده مورد استفاده قرار می‌گیرند. مبدل‌ها بر حسب مشخصات و خصوصیتی که دارند کمیت‌های الکتریکی از قبیل سطح ولتاژ و فرکانس را تغییر می‌دهند. شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام یک نوع از مبدل‌های قدرت را نشان می‌دهد. در اینجا میزان توان ورودی بر اساس دستورات کنترلی است که شکل مطلوب و دلخواه توان خروجی را به ما می‌دهد. قسمت کنترلی، قسمتی است که باید در مبدل‌های قدرت وجود داشته باشد و وجود آن الزامی است. به طور کلی هدف قسمت کنترلی، تنظیم ولتاژ خروجی در مقابله با تغییرات بار و خط به شکل مطلوب می‌باشد. لینک ورودی مبدل‌های قدرت می‌تواند یک منبع  $DC$  ثابت به شکل یک باتری یا پیل سوختی<sup>۲</sup> باشد یا یک منبع ولتاژ یا جریان متاوب  $AC$  که به شکل یک منبع یا خروجی یک ژنراتور هست، می‌تواند باشد. بار هم یک شبکه‌ای از عناصر پسیو یا یک منبع الکتریکی دیگر و یا یک دستگاه مبدل انرژی الکترو مکانیکی می‌تواند باشد. فیلترهایی که در ورودی و خروجی مبدل‌ها به کار می‌رود از المان‌های الکتریکی ذخیره‌کننده انرژی مانند سلف یا خازن تشکیل شده‌اند. این فیلترها به منظور حذف اغتشاشات کلید زنی یا تداخل الکترو مغناطیسی<sup>۳</sup> ( $EMI$ ) استفاده می‌شوند. اگر چه فیدبک در اکثر حالات از بار گرفته می‌شود اما بسته به الگوریتم کنترلی مبدل می‌تواند از شبکه کلید زنی و همچنین فیلترهای ورودی و خروجی نیز گرفته شود [۱].

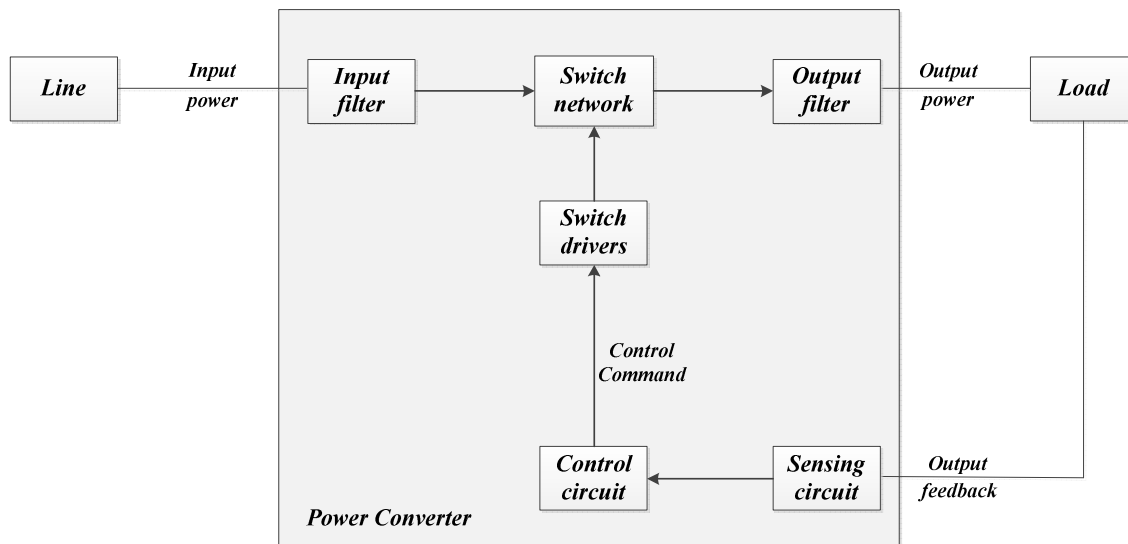
<sup>1</sup> Power Converter

<sup>2</sup> Fuel Cell

<sup>3</sup> Electromagnetic Interference

## فصل ۱: مبدل‌های قدرت

در این فصل یک مرور مختصر در رابطه با ساختارهای مختلف مبدل‌های قدرت که به شکل گسترده‌ای استفاده می‌شوند می‌پردازیم. بعد از معرفی دسته بندی اساسی مبدل‌های قدرت، اصول عملکرد آن‌ها و روابط آن‌ها در حالت ماندگار مطرح می‌شود. اطلاعاتی که در این بخش ارائه شده است در حد آشنایی و معرفی است. مقالات زیادی در زمینه الکترونیک قدرت و این زمینه منتشر شده است. بنابراین برای مطالعه بیشتر و جزئیات بیشتر می‌توان به منابع و مقالات در این زمینه مراجعه کرد.



شکل (۱-۱) بلوک دیاگرام نوعی از مبدل قدرت

### ۱-۲ ساختارهای اساسی مبدل‌های قدرت

ساختار اساسی و پایه‌ای مبدل‌های قدرت برای بیشتر انواع مبدل‌ها همان چیزی است که در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. با تغییرات در ورودی، خروجی و شبکه کلید زنی ساختارهای مختلفی به دست می‌آید [۲]-[۱]. بسته به عملکردی که ما از مبدل قدرت انتظار داریم و می‌خواهیم، عناصر الکتریکی دیگر با اهداف کمکی از قبیل جداسازی قسمتی از مبدل یا کل آن و همچنین حفاظت آن می‌تواند به ساختار مبدل اضافه شود. اما باید به این نکته هم توجه کنیم که اضافه کردن این المان‌های الکتریکی باید به عملکرد اصلی و شکل خروجی مبدل صدمه نزنند.



## فصل ۱: مبدل‌های قدرت

مبدل‌های قدرت در چهار گروه بسته به نوع ورودی و خروجی که می‌خواهیم داشته باشیم دسته بندی می‌شوند [۳].

۱. مبدل‌های  $DC/DC$

۲. کانورترهای  $DC/AC$  (اینورترها)<sup>۱</sup>

۳. مبدل‌های  $AC/DC$  (یکسو کننده‌ها)<sup>۲</sup>

۴. مبدل‌های  $AC/AC$  (سیکلو مبدل‌ها<sup>۳</sup> یا کنترل کننده‌های  $AC$ )

بیشتر ساختارهای مبدل‌های قدرت که در دسته بندی بالا آمده است در زمینه‌های مختلفی مانند عملکرد در حالت ماندگار، مدل دینامیکی، ساختار کنترلی و کاربردها به شکل گسترده و مناسبی در مقالات زیادی مطرح شده‌اند. در بخش‌های بعدی این فصل به شکل مختصر به مبدل  $DC/AC$  که در رابطه با موضوع این پایان نامه است خواهیم پرداخت.

### ۱-۲-۱ مبدل‌های $DC/AC$ (اینورترها)

یک نوع سیستم مبدل  $DC/AC$  در شکل (۱-۲) نشان داده شده است. دو نوع رایج مبدل‌های  $DC/AC$  اینورترهای تک فاز و سه فاز می‌باشد. ورودی اینورتر می‌تواند یک منبع جریان یا ولتاژ باشد و خروجی بسته به خواسته‌ای که داریم ولتاژ یا جریان سینوسی با مولفه  $DC$  صفر باشد. بار یک شبکه پسیو از المان‌های الکتریکی سلف، خازن و مقاومت، یک مصرف کننده ولتاژ  $AC$ ، و یا یک مصرف کننده جریان  $AC$  باشد. پارامتر کنترلی هم می‌تواند زاویه آتش کلیدها، پهنای پالس، سیگنال ولتاژ یا جریان باشد.

ساده‌ترین شکل مبدل  $DC/AC$  در شکل (۱-۳) نشان داده شده است که همان اینورتر تک فاز معروف است. مبدل تک فاز  $DC/AC$  با باز و بسته شدن متناوب جفت کلیدها به صورت قطری، یا به عبارت دیگر  $S_1-S_4$  یا  $S_2-S_3$  باهم، به ترتیب کار می‌کند. شکل (۱-۴) شکل موج ولتاژ خروجی را نشان می‌دهد که بسته به حالت کلید زنی ولتاژ ورودی یا منفی آن در خروجی ظاهر می‌شود. همانطور که از این شکل

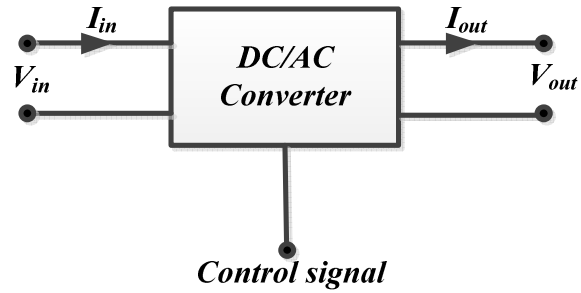
<sup>1</sup> Inverters

<sup>2</sup> Rectifiers

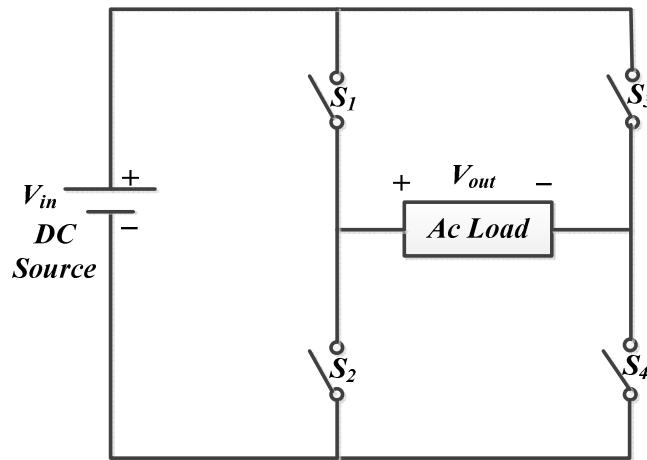
<sup>3</sup> Cycloconverters

## فصل ۱: مبدل‌های قدرت

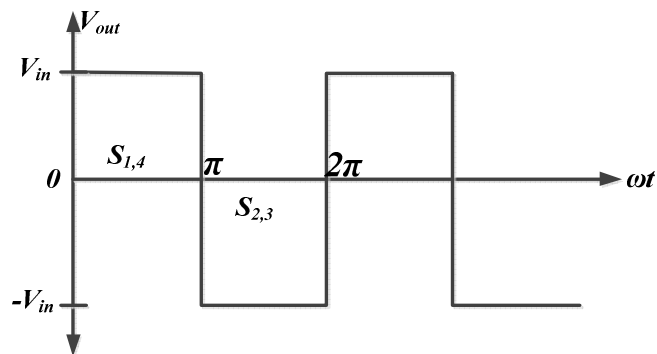
مشاهده می شود در این حالت، پارامترهای ولتاژ  $AC$  خروجی ( مقدار موثر ولتاژ یا دامنه مولفه اصلی ولتاژ خروجی) ثابت هستند [۱].



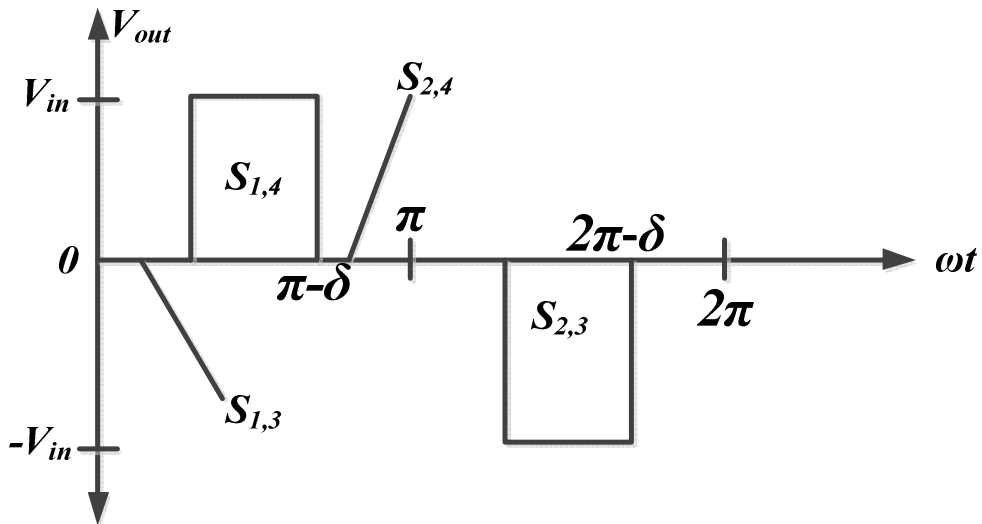
شکل (۱-۲) بلوک دیاگرام مبدل  $DC/AC$



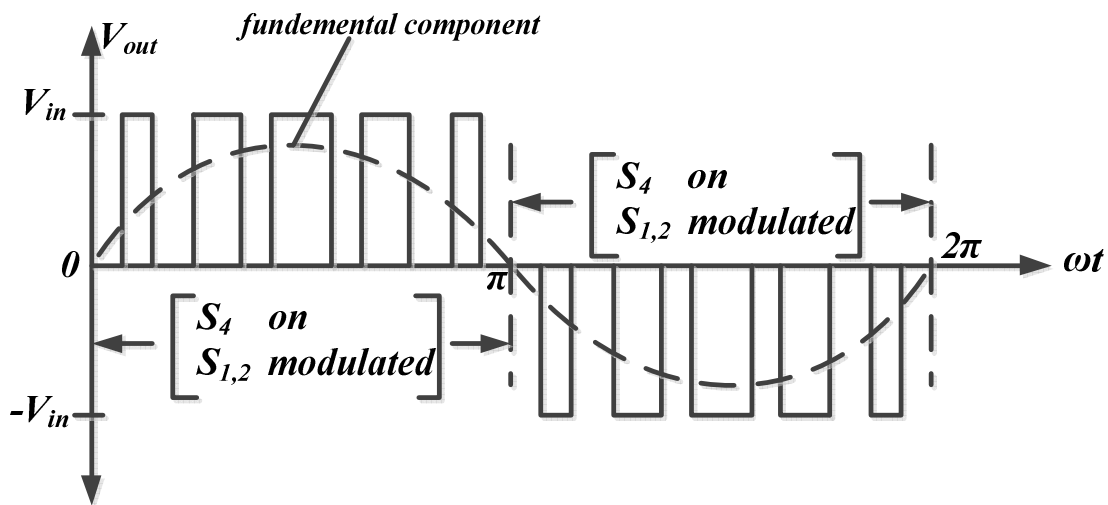
شکل (۱-۳) اینورتر تک فاز تمام پل



شکل (۱-۴) شکل موج خروجی ولتاژ  $AC$



شکل (۱-۵) شکل موج خروجی ولتاژ AC با استفاده از حالت صفر

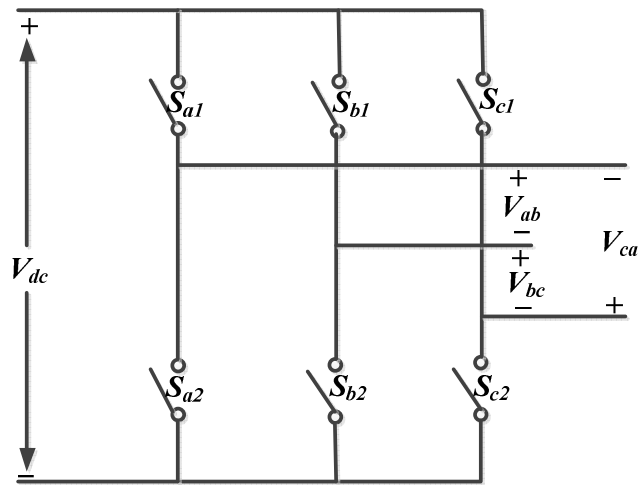


شکل (۱-۶) شکل موج خروجی ولتاژ AC با استفاده از روش کنترلی PWM

یک روش رایج تغییر پارامترهای ولتاژ AC خروجی، معرفی یک حالت سوم در شکل موج ولتاژ خروجی است که حالت صفر است. حالت صفر را می‌توان با بستن هم زمان کلیدهای بالایی ساق ( $S_1-S_3$ ) یا کلیدهای پایینی ساق ( $S_2-S_4$ ) تولید کرد. شکل (۱-۵) ولتاژ AC خروجی اینورتر تک فاز را زمانی که از حالت صفر برای تغییر پارامترهای ولتاژ AC استفاده شده است نشان می‌دهد. روش‌های مختلف حذف هارمونیک‌های خروجی با استفاده از حالت صفر در مرجع [۱] شرح داده شده است.

## فصل ۱: مبدل‌های قدرت

روش مدولاسیون پهنای پالس<sup>۱</sup> ( $PWM$ ) در مبدل‌های  $DC/AC$  خیلی رایج است. استفاده از روش کلید زنی با فرکانس بالا، حذف هارمونیک‌های فرکانس پایین و فرکانس بالای کلید زنی را که نامطلوب می‌باشد در پی خواهد داشت. شکل موج خروجی اینورتر تک فاز زمانی که از روش  $PWM$  استفاده شده است در شکل (۱-۶) نشان داده شده است. در این روش از دو موج سینوسی مرجع با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه و با دامنه‌ی ضریب مدولاسیون  $M$  با یک موج مثلثی با فرکانس کلید زنی مشخص، باهم مقایسه می‌شوند. روش کنترلی نیز این‌طور است که در هر ساق موج سینوسی با موج مثلثی مقایسه می‌شود؛ در ساق اول با مرجع سینوسی معمولی و در ساق دوم با مرجع سینوسی با اختلاف فاز  $180^\circ$  درجه مقایسه می‌شود اگر موج مرجع مربوط به هر ساق بزرگتر از موج مثلثی باشد کلید بالا در هر ساق روشن می‌شود در غیر این صورت کلید پایینی ساق روشن می‌شود در این الگوریتم دو کلید به صورت هم‌زمان در یک ساق نمی‌توانند روشن نمی‌شود. مولفه اصلی که در شکل (۱-۶) نشان داده شده است بعد از یک فیلتر کردن مناسب می‌تواند ظاهر شود [۱].



شکل (۱-۷) اینورتر سه فاز تمام پل ۶ کلیدی

<sup>۱</sup> Pulse Width Modulation