بسم الله الرحمن الرحیم

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

ارائه اینورتر سه فاز سوئیچینگ نرم PWM با لینک DC موازی شبه رزونانسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق – الکترونیک

محمدرضا امینی

استاد راهنما
دکتر حسین فرزانه فرد

۱۳۸۷

دانشگاه صنعتی اصفهان
دانشکده برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق –الکترونیک آقای محمدرضا امینی

تحت عنوان

ارائه اینورتر سه فاز سوئیچینگ نرم PWM با لینک DC موازی شبه رزونانسی

در تاریخ ۸۷/۱۲/۲۴ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان نامه	دکتر حسین فرزانه فرد
۲- استاد مشاور پایان نامه	دکتر محمد مدنی
۳- سرپرست تحصیلات تکمیلی	دکتر علی محمد دوست حسینی

تشکر و قدردانی

خداوند را سپاسگزارم که به من توفیق داد تا این دوره را به پایان برسانم. بی شک گذراندن این دوره بدون همکاری و همراهی خانواده، اساتید و دوستان ارجمندم امکان پذیر نبود. لذا از خداوند موفقیت و بهروزی این عزیزان را خواستارم.

لازم می دانم از زحمات بی دریغ پدر و مادر ارجمندم که در دوران تحصیل یار و مشوق بنده بوده‌اند و راه را در این مسیر هموار نموده‌اند تشکر و قدرانی کنم.

از استاد ارجمندم، جناب آقای دکتر فرزانه فردکه با رهنمودهای دلسوزانه نه تنها در طول انجام پایان‌نامه، بلکه در تمام دوره همراه بنده بوده‌اند قدردانی می‌نمایم. همچنین از جناب آقای دکتر مدنی که در طول این دوره از نعمت مشاوره ایشان بهره‌مند بوده‌ام و آقایان دکتر کارشناس و دکتر دهقانی که زحمت داوری این پایان نامه را پذیرفتند و جناب آقای دکتر دوست حسینی سرپرست تحصیلات تکمیلی تشکر و قدردانی می‌کنم.

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و
نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه متعلق به
دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به آنانکه به ما آموختند و در کشاکش دهر و عرصه پر تکاپوی حیات

بدون ریا و تملق در خدمت تعالی انسان بوده اند

و

تقدیم به پدر عزیز و مادر مهربانم

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: مقدمه

۱-۱- کلیات و اهداف پایان نامه ۲

۱-۲- روند ارائه مطالب ۴

فصل دوم: مروری بر انواع اینورترها و روش‌های کلیدزنی آنها

۲-۱- مقدمه ۵

۲-۲- اینورترهای منبع جریان و منبع ولتاژ ۶

۲-۳- روش های کلیدزنی اینورترها ۸

۲-۳-۱- سوئیچینگ پالس موج مربعی ۹

۲-۳-۲- سوئیچینگ با قابلیت حذف هارمونیک‌های برنامه‌ریزی شده ۱۱

۲-۳-۳- سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس سینوسی ۱۲

۲-۲-۴- سوئیچینگ با مدولاسیون بردار فضایی ۱۶

فصل سوم: اینورترهای سوئیچینگ نرم

۳-۱- مقدمه ۱۹

۳-۲- انواع اینورترهای سوئیچینگ نرم ۲۰

۳-۳- اینورترهای با لینک DC رزونانسی ۲۱

۳-۳-۱- اولین اینورتر با لینک DC رزونانسی ۲۲

۳-۳-۲- اینورتر با لینک DC رزونانسی و مدار کلمپ پسیو ۲۴

۳-۳-۳- اینورتر با لینک DC رزونانسی و مدار کلمپ اکتیو ۲۵

۳-۴- اینورترهای با لینک DC موازی شبه رزونانسی ۲۶

۳-۴-۱- اولین اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی ۲۶

۳-۴-۲- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره دو ۳۱

۳-۴-۳- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره سه ۳۵

۳-۴-۴- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره چهار ۳۶

۳-۴-۵- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره پنج ۴۰

۳-۴-۶- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره شش ۴۲

۳-۴-۷- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره هفت ۴۷

۳-۴-۸- اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی شماره هشت ۵۰

فصل چهارم: اینورتر پیشنهادی با دو سوئیچ کمکی

۴-۱- مقدمه ۵۶
۴-۲- شرح عملکرد مبدل پیشنهادی ۵۶
۴-۳- ملاحظات طراحی ۶۲
۴-۴- نتایج شبیه سازی و نتایج عملی ۶۴
۴-۵- مقایسه لینک DC اینورتر پیشنهادی با لینک DC سایر اینورترهای QPRDCL ۷۲

فصل پنجم: اینورتر پیشنهادی با یک سوئیچ کمکی

۵-۱- مقدمه ۷۳
۵-۲- شرح عملکرد مبدل پیشنهادی ۷۴
۵-۳- ملاحظات طراحی ۷۹
۵-۴- نتایج شبیه سازی و نتایج عملی ۸۲
۵-۵- گسترش ایده‌ی پیشنهادی به مبدل‌های DC-DC ۸۸

فصل ششم: اینورتر پیشنهادی اصلاح شده با دو سوئیچ کمکی

۶-۱- مقدمه ۹۴
۶-۲- شرح عملکرد مبدل پیشنهادی ۹۵
۶-۳- ملاحظات طراحی ۱۰۱
۶-۴- نتایج شبیه سازی ۱۰۳

فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات

۷-۱- نتیجه‌گیری ۱۰۷
۷-۲- پیشنهادات ۱۰۸

مراجع ۱۰۹

چکیده

امروزه اینورترها در صنعت کاربرد زیادی دارند که درایو موتورهای القائی با کنترل سرعت، منابع تغذیه بدون وقفه (UPS)، منابع تغذیه AC با ولتاژ و فرکانس قابل تنظیم، کوره‌های القائی و فیلترهای اکتیو قدرت (APF) از مهمترین کاربردهای آنها می‌باشد. به منظور کاهش حجم فیلتر خروجی اینورتر، بالا بردن کیفیت جریان یا ولتاژ خروجی و از بین بردن نویز صوتی در المان‌های مغناطیسی مدار، بالا بردن فرکانس سوئیچنگ الزامی می‌باشد. با افزایش فرکانس کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر، تلفات سوئیچنگ افزایش می‌یابد. برای خارج کردن تلفات کلیدزنی از سوئیچ‌های اینورتر و کاهش استرس ولتاژ و جریان سوئیچ‌های اینورتر، معمولا از اسنابرهای خاموش و روشن کردن برای سوئیچ‌ها استفاده می‌شود که منجر به افزایش تلفات کل مدار می‌شود.

روش متداول برای کاهش تلفات سوئیچینگ، استفاده از توپولوژی‌های سوئیچینگ نرم می‌باشد. در این توپولوژی‌ها، با افزودن تعدادی المان اضافی به مدار، همپوشانی جریان و ولتاژ سوئیچ‌ها در لحظات روشن وخاموش شدن، تقریبا از بین رفته و تلفات سوئیچینگ حذف می‌شود. این اینورترها به دو گروه اینورترهای با مدار رزونانسی در سمت بار و سمت لینک DC تقسیم بندی می‌شوند. اینورترهای سه فاز با مدار رزونانسی در سمت بار دارای تعداد سوئیچ کمکی زیادی هستند و در توان‌های بالا کاربرد دارند. در کاربردهای با توان متوسط، اینورترهای با مدار رزونانسی در سمت لینک DC کاربرد بیشتری دارند. در این اینورترها فقط یک مدار رزونانس در لینک DC اینورتر قرار دارد. تحقیقات صورت گرفته در سال‌های اخیر، در جهت بهبود راندمان و تعداد المان‌ها در این مبدل‌ها انجام شده است. این اینورترها معمولا دارای دو سوئیچ کمکی یا بیشتر در لینک DC هستند.

در این پایان نامه سعی بر آن شده تا با ارائه‌ی چند توپولوژی جدید، تعداد المان‌های اضافی از جمله سوئیچ کمکی، نسبت به مبدل‌های قبلی کاهش یابد. برای رسیدن به این هدف، سه اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی جدید پیشنهاد شده و روابط و شکل موج‌های تئوری آنها استخراج شده است. همچنین پارامترهایی که در طراحی هر مبدل باید مدنظر گرفته شوند، آورده شده است. برای اطمینان از صحت عملکرد اینورترهای پیشنهادی، دو نمونه از آنها ساخته شده و با مقایسه شکل موج‌های عملی و تئوری، صحت ایجاد سوئیچینگ نرم در آنها تایید شده است.

کلمات کلیدی

۱- اینورتر سه فاز، ۲- سوئیچینگ نرم، ۳- لینک DC موازی شبه رزونانسی، ۴- مدولاسیون پهنای پالس ۵- سوئیچینگ در ولتاژ صفر، ۶- سوئیچینگ در جریان صفر.

فصل اول
مقدمه

۱ ـ کلیات و اهداف پایان نامه

مبدل‌هایی که ولتاژ یا جریان DC را به ولتاژ یا جریان AC تبدیل می‌کنند، اینورتر نامیده می‌شوند. کاربرد اینورترها در صنعت زیاد می‌باشد که از آن جمله می توان به درایو موتورهای القائی با کنترل سرعت، منابع تغذیه بدون وقفه[۱]، منابع تغذیه AC با ولتاژ و فرکانس قابل تنظیم، کوره‌های القائی و فیلترهای اکتیو قدرت[۲] اشاره کرد [۱]-[۵].

اینورترهایی که منبع تغذیه ورودی آنها از نوع منبع ولتاژ DC باشد، اینورتر منبع ولتاژ[۳] و اینورترهایی که منبع تغذیه ورودی آنها از نوع منبع جریان DC باشد، اینورتر منبع جریان[۴] نامیده می‌شوند. خروجی اینورتر، بسته به کاربردآن، می تواند جریان و یا ولتاژ AC باشد. شکل موج جریان یا ولتاژ خروجی یک اینورتر ایده آل باید سینوسی باشد، ولی در عمل غیرسینوسی و دارای هارمونیک می‌باشد. کاهش هارمونیکهای جریان و یا ولتاژ خروجی اینورتر، برای مصارف توان بالا از اهمیت بیشتری برخوردار است. برای کاهش هارمونیک‌ها، در خروجی اینورتر از فیلترهای پایین گذر استفاده می شود. در صورتی که خروجی اینورتر از نوع جریان باشد، قراردادن سلف در خروجی اینورتر متداول می باشد و در صورتی که خروجی اینورتر از نوع ولتاژ باشد، از ترکیب سلف و خازن به صورت فیلتر

---

[1] Uninterruptible Power Supply (UPS)
[2] Active Power Filter (APF)
[3] Voltage Source Inverter (VSI)
[4] Current Source Inverter (CSI)

پایین‌گذر استفاده می شود. نحوه‌ی کلید زنی سوئیچ‌های اینورتر و فرکانس کلیدزنی آنها، اندازه‌ی فیلتر خروجی را مشخص می‌کند.

اینورترها از لحاظ نحوه تغییر وضعیت سوئیچ‌ها در لحظه‌ی روشن و خاموش شدن، به دو دسته‌ی اینورترهای سوئیچینگ سخت و اینورترهای سوئیچینگ نرم تقسیم بندی می‌شوند. همپوشانی جریان و ولتاژ سوئیچ‌ها در اینورتر سوئیچینگ سخت، باعث بوجود آمدن تلفات زیاد در سوئیچ‌ها، خارج شدن سوئیچ‌ها از ناحیه‌ی کار مطمئن[1]، افزایش $\frac{dv}{dt}$ و $\frac{di}{dt}$ سوئیچ‌ها و افزایش تداخلات الکترومغناطیسی[2] می‌شود[۶]. یکی از روش‌های ساده برای کاهش این عیوب، استفاده از اسنابرهای خاموش و روشن کردن سوئیچ‌ها می‌باشد. با وجود اینکه مدارهای اسنابر، بخش اعظمی از تلفات سوئیچ را خارج کرده و در مقاومت خود تلف می‌کنند، معمولاً مجموع تلفات سوئیچ و اسنابر بیشتر از حالت بدون اسنابر است. در مورد اینورترهای سه فاز به دلیل زیاد بودن تعداد سوئیچ‌ها، مدارهای اسنابرآنها، قسمت بزرگی از حجم مدار را تشکیل می‌دهند.

روش دیگر، استفاده از توپولوژی‌های اینورتر سوئیچینگ نرم می‌باشد. در این توپولوژی‌ها با اضافه کردن تعدادی المان اضافی در مدار، همپوشانی جریان و ولتاژ سوئیچ‌ها بشدت کاهش می‌یابد. در صورتی که ابتدا ولتاژ صفر شود و بعد از آن جریان سوئیچ افزایش یابد، سوئیچینگ در ولتاژ صفر[3] و درصورتی که ابتدا جریان صفر شود و بعد از آن ولتاژ سوئیچ افزایش یابد، سوئیچینگ درجریان صفر[4] نامیده می‌شود.

در اینورترهای سوئیچینگ نرم، با افزایش فرکانس کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر، تلفات سوئیچینگ، تقریباً صفر باقی می‌ماند. بنابراین، می توان فرکانس سوئیچینگ را بیشتر از اینورترهای سوئیچینگ سخت انتخاب کرد تا نویز صوتی ایجاد شده در المان های مغناطیسی مدار، خارج از محدوده شنوایی انسان قرار بگیرد و آزاردهنده نباشد. همچنین حجم فیلتر خروجی اینورتر به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد، بدون اینکه تلفات اینورتر افزایش یابد [۷]-[۸].

هدف از انجام این پایان نامه، ارائه‌ی اینورترهای سه فاز سوئیچینگ نرم با حداقل المان اضافی و تعداد سوئیچ کمکی می‌باشد. اینورترهای با لینک DC موازی شبه رزونانسی دارای تعداد سوئیچ کمکی کمتر و همچنین استرس ولتاژ کمتری روی سوئیچ‌های اینورتر نسبت به اغلب اینورترهای سه فاز سوئیچینگ نرم هستند. به همین دلیل، این دسته از مبدل‌ها در این پایان نامه انتخاب شده‌اند و سعی بر آن شده تا با ارائه‌ی چند مبدل جدید، تعداد سوئیچ کمکی آنها، نسبت به مبدل‌های قبلی کمتر شود.

---

[1] Safe Operating Area (SOA)
[2] Electromagnetic Interference (EMI)
[3] Zero Voltage Switching (ZVS)
[4] Zero Current Switching (ZCS)

برای رسیدن به این هدف، سه اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی جدید ارائه شده و روابط و شکل موج‌های تئوری آنها استخراج گردیده است. همچنین پارامترهایی که در طراحی هر مبدل باید مدنظر گرفته شوند، آورده شده است. برای اطمینان از صحت عملکرد اینورترهای پیشنهادی، یک نمونه‌ی 250W از آنها ساخته شده و شکل موج‌های عملی با شکل موج‌های تئوری مقایسه گردیده و صحت ایجاد سوئیچینگ نرم در آنها بررسی شده است.

۱ ۴ روند ارائه مطالب

این پایان نامه شامل هفت فصل می‌باشد. پس از مقدمه‌ای بر این پایان نامه در فصل اول، مرور کوتاهی بر انواع اینورترها و روش‌های کلیدزنی آنها در فصل دوم انجام می‌شود و چند روش پر کاربرد شامل سوئیچینگ پالس موج مربعی، سوئیچینگ با قابلیت حذف هارمونیک‌های برنامه‌ریزی شده، سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و سوئیچینگ با مدولاسیون بردار فضایی بررسی شده و با هم مقایسه می‌شوند. در فصل سوم، نمونه‌هایی از اینورترهای سوئیچینگ نرم مانند اینورترهای با رزونانس در سمت بار و اینورترهای با لینک DC رزونانسی معرفی می‌شوند و نحوه‌ی عملکرد چند نمونه اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی بررسی می‌شود. در فصل‌های چهارم، پنجم و ششم پایان نامه سه نمونه جدید اینورتر با لینک DC موازی شبه رزونانسی ارائه شده است. نحوه عملکرد مدار، ملاحظات طراحی، نتایج شبیه‌سازی و عملی مدارهای جدید در این فصل‌ها ارائه گردیده است.

فصل دوم
مروری بر انواع اینورترها و روش‌های کلیدزنی آنها

۲ ـ مقدمه

بسیاری از پارامترهای مهم در یک اینورتر، به نحوه کلیدزنی سوئیچ‌های آن مربوط می‌شود. بنابراین انتخاب نحوه کلیدزنی مناسب، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. یکی از این پارامترهای مهم در اینورترها، قابلیت تنظیم اندازه‌ی ولتاژ یا جریان خروجی اینورتر می‌باشد. به عنوان مثال، در اینورترهای کنترل کننده‌ی سرعت موتور القائی، تغییر دادن ولتاژ خروجی اینورتر متناسب با فرکانس خروجی آن، به منظور ثابت نگه داشتن شار مغناطیسی در آهن موتور، اهمیت زیادی دارد. همچنین اندازه‌ی فیلتر خروجی اینورتر که در حجم و وزن و قیمت اینورتر تاثیر زیادی دارد، به نحوه کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر مربوط می‌شود.

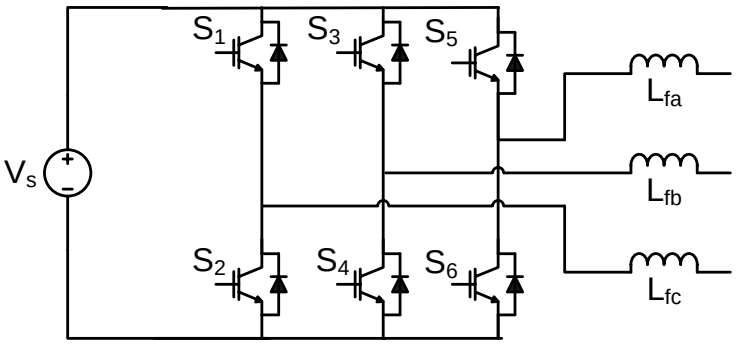
در این فصل ابتدا انواع اینورترها از لحاظ توپولوژی بررسی می‌شوند. پس از آن به بررسی انواع روش‌های کلیدزنی (سوئیچینگ) در اینورترها پرداخته می‌شود و روش‌های سوئیچینگ پالس موج مربعی، سوئیچینگ با قابلیت حذف هارمونیک‌های برنامه‌ریزی شده، سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس سینوسی و مدولاسیون بردار فضایی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۲ ـ اینورترهای منبع جریان و منبع ولتاژ

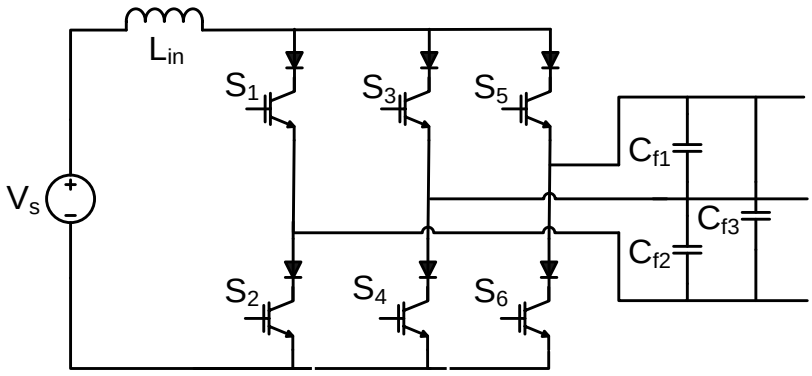
اینورترهای سه فاز منبع ولتاژ از شش سوئیچ مطابق شکل ۲-۱ تشکیل شده‌اند. به دو سوئیچی که به یک سر

خروجی اینورتر متصل می شوند، یک ساق اینورتر گفته می‌شود. همچنین به محل اتصال ساق‌های اینورتر به یکدیگر لینک DC اینورتر گفته می‌شود. در این اینورترها، سوئیچ‌های یک ساق، نباید همزمان روشن شوند. زیرا در صورت روش شدن آنها، جریان شدید ناشی از اتصال کوتاه کردن منبع تغذیه ورودی اینورتر، سوئیچ‌های آن ساق را از بین می‌برد و به منبع V_s نیز ممکن است آسیب برساند. برای جلوگیری از اتصال کوتاه شدن لینک DC درهنگام تغییر وضعیت سوئیچ‌ها، در فاصله زمانی تغییر وضعیت آنها، مدت زمان کوتاهی هر دو سوئیچ یک ساق اینورتر خاموش می‌مانند. به این زمان، زمان مرده[1] گفته می‌شود.

با توجه به اینکه فرکانس جریان خروجی اینورتر بسیار کمتر از فرکانس سوئیچینگ اینورتر است، در نیم سیکل مثبت جریان خروجی، در لحظاتی که سوئیچ بالایی خاموش است، جریان فقط می تواند از دیود موازی با سوئیچ پایینی ساق بگذرد. در نیم سیکل منفی جریان خروجی، به صورت مشابه، سوئیچ پایینی و دیود موازی با سوئیچ بالایی باید هدایت کنند. به همین دلیل قراردادن یک دیود به صورت موازی معکوس با هر سوئیچ اینورتر لازم می‌باشد. در سوئیچ‌های نیمه هادی قدرت، این دیودها توسط سازندگان آنها، در یک بسته ارائه می شوند و نیازی به استفاده از دیود قدرت جداگانه ندارند. در خروجی اینورترهای منبع ولتاژ، استفاده از سلف به عنوان فیلتر لازم است.



شکل ۲ ـ ۱ نمای کلی مدار قدرت اینورترهای سه فاز منبع ولتاژ



شکل ۲ ـ ۲ نمای کلی مدار قدرت اینورترهای سه فاز منبع جریان

[1] Dead time

اینورترهای منبع جریان دارای یک سلف DC در ورودی اینورتر مطابق شکل ۲-۲ هستند. سوئیچ‌های اینورتر باید طوری تغییر وضعیت دهند که مقدار جریان این سلف به صورت DC با ریپل جریان کم باشد. به دلیل اینکه فرکانس تغییرات ولتاژ خروجی اینورترهای منبع جریان بسیار کمتر از فرکانس کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر است، سوئیچ‌های اینورتر باید قابلیت تحمل ولتاژ معکوس را نیز داشته باشند. بنابراین از سوئیچ های دارای دیود موازی معکوس نمی‌توان استفاده کرد و لزوما باید از سوئیچ‌های یکطرفه[1] استفاده شود. معمولاً برای تحمل ولتاژهای منفی توسط سوئیچ، یک دیود قدرت با هر سوئیچ به صورت سری قرار می‌گیرد. قرار گرفتن این دیود در مسیر انتقال توان، باعث افزایش تلفات هدایتی اینورتر و کاهش راندمان آن می‌شود. در خروجی اینورترهای منبع جریان، استفاده از خازن به عنوان فیلتر لازم است.

منابع تغذیه ای که باتری‌ها و یا سیستم‌های انتقال قدرت در اختیار استفاده کنندگان قرار می‌دهند، از نوع منبع ولتاژ هستند. بنابراین ساختن یک منبع ولتاژ DC از ساختن یک منبع جریان DC بسیار ساده‌تر می‌باشد. در حالت کلی، به دلیل وجود سلف بزرگ DC در ورودی و لزوم استفاده از سوئیچ های یکطرفه در اینورترهای منبع جریان، همچنین ساده تر بودن ساخت منبع ولتاژ DC نسبت به منبع جریان DC ، اینورترهای منبع ولتاژ بسیار متداول‌تر از اینورترهای منبع جریان هستند. یکی از مزیت‌های اینورترهای منبع جریان نسبت به اینورترهای منبع ولتاژ، محدود شدن جریان ماکزیمم سوئیچ‌ها است که در صورت بروز اشتباه در خاموش و روشن کردن سوئیچ‌ها، باعث سوختن آنها نخواهد شد. این نوع از اینورترها به دلیل نداشتن سلف در خروجی، در مصارفی که ولتاژ بالا در خروجی اینورتر لازم داشته باشند، کاربرد دارند.

۲ ۳ روش های کلیدزنی اینورترها

در برخی کاربردهای اینورترها، مانند منابع تغذیه بدون وقفه، ایجاد یک ولتاژ و فرکانس ثابت در خروجی اینورتر مدنظر می‌باشد. ولی در اکثر کاربردهای اینورترها، ولتاژ و فرکانس خروجی اینورتر، باید قابل تغییر در حین کار اینورتر باشند. تغییر فرکانس خروجی اینورتر، با تغییر فرکانس کلید زنی سوئیچ‌های اینورتر امکان پذیر می‌باشد. بنابراین انجام این تغییر، بسیار ساده می‌باشد. برای تغییر دادن سطح ولتاژ خروجی اینورتر، می‌توان از دو روش استفاده کرد. روش اول، تغییر دادن ولتاژ منبع تغذیه DC ورودی و ثابت نگه داشتن نحوه‌ی کلید زنی سوئیچ‌های اینورتر است. روش دوم تغییر دادن نحوه ی کلید زنی سوئیچ‌های اینورتر می‌باشد.

در مبدل های DC به AC که انرژی توسط باتری تأمین می شود، معمولاً یک مبدل DC به DC وجود دارد که

[1] Unidirectional switches

سطح ولتاژ V_s مورد نظر برای اینورتر را می سازد. در صورتی که مبدل DC به DC ، دارای فیدبک ولتاژ باشد، می توان با تغییر مقدار ولتاژ مرجع در مدار کنترل آن، ولتاژ DC خروجی را به میزان لازم تنظیم کرد.

در اکثر مبدل‌های DC به AC، انرژی باید توسط شبکه برق شهر تأمین شود. به عنوان مثال، در کنترل‌کننده‌های سرعت موتور القائی، معمولاً ولتاژ AC برق شهر به ولتاژ DC تبدیل شده و پس از آن توسط یک اینورتر، ولتاژ DC به ولتاژAC مطلوب تبدیل می‌شود. دراین مبدل‌ها برای تبدیل ولتاژ AC به DC ، معمولاً از یکسوکننده‌ی دیودی استفاده می‌شود. ولتاژ خروجی یکسوکننده‌ی دیودی قابل کنترل نمی‌باشد. برای اینکه بتوان ولتاژ خروجی یکسوکننده را کنترل کرد، می توان از چاپرهای DC به DC که مبدل باک، ساده‌ترین نوع آن می‌باشد، استفاده کرد. این روش، به دلیل اضافه شدن یک مبدل بیشتر در مسیر توان، بازده کل را کاهش می‌دهد. روش دیگر، استفاده از یکسوکننده‌های کنترل شونده است. در این یکسوکننده‌ها، به جای استفاده از دیود، باید از سوئیچ‌های قدرت استفاده کرد. با کنترل کلیدزنی سوئیچ‌های مبدل، می‌توان ولتاژ DC خروجی آن را کنترل نمود.

در هر دو روش مذکور، علاوه بر افزایش حجم و قیمت سیستم، پاسخ سیستم نیز کند می‌شود. بنابراین بهتر است که سطح ولتاژ ورودی، ثابت نگه داشته شود و سطح ولتاژ خروجی توسط تغییر دادن نحوه‌ی کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر کنترل گردد. در ادامه به بررسی انواع روش های کلید زنی (سوئیچینگ) اینورترها و بررسی مزایا و معایب هر کدام پرداخته می‌شود.

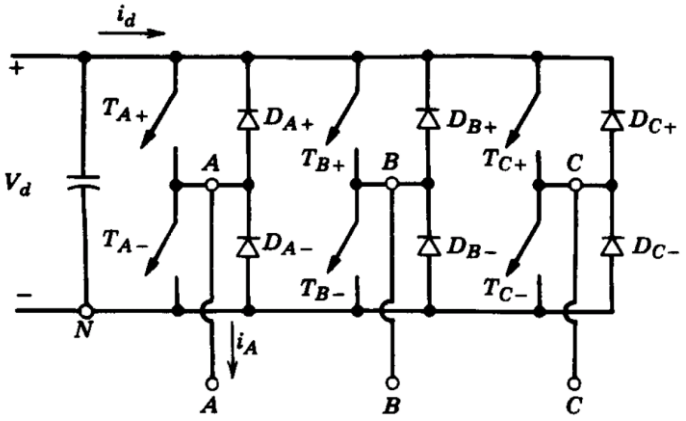
۲ ۳ ۱ سوئیچینگ پالس موج مربعی[1]

در این روش، در هر سیکل موج خروجی اینورتر، هر سوئیچ اینورتر فقط یک بار روشن و خاموش می‌شود[۹]. بنابراین شکل موج خروجی فازهای اینورتر نسبت به N به صورت مربعی می‌شود. در شکل ۲-۳ شماتیک اینورتر سه فاز منبع ولتاژ دیده می‌شود. شکل موج خروجی هر فاز نسبت به N (سر منفی لینک DC) و شکل موج ولتاژ خط آن در شکل ۲-۴ مشاهده می‌شود. هارمونیک‌های ولتاژ خط در نمودار شکل ۲-۵ نشان داده شده است.

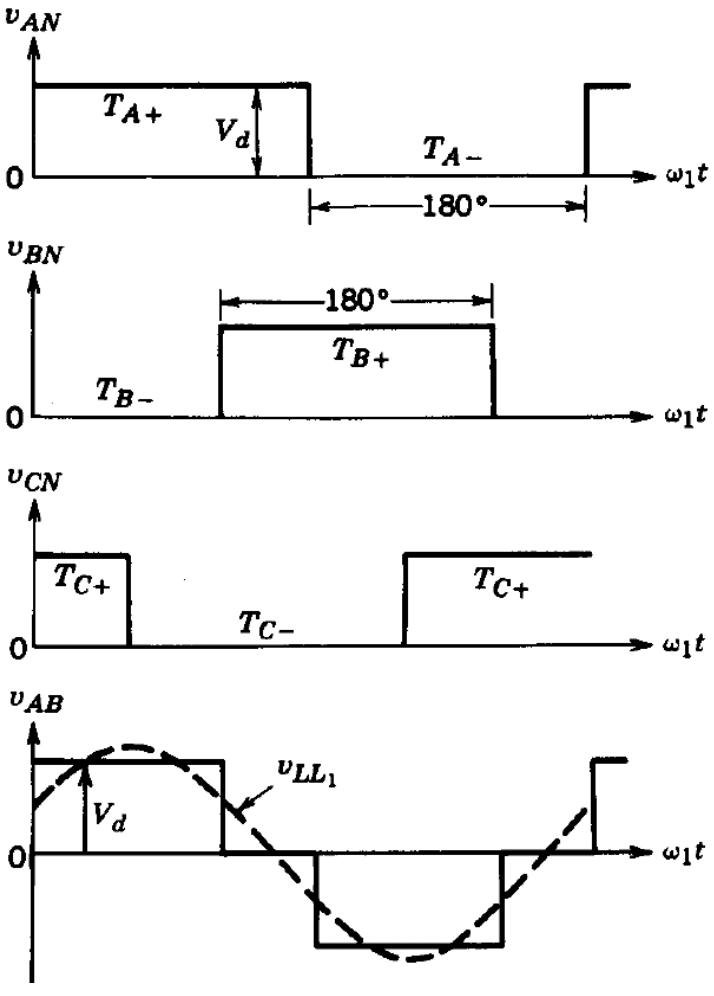
همان گونه که در این نمودار مشاهده می‌شود، شکل موج خروجی، دارای هارمونیک‌های زیادی در فرکانس‌های پایین است. به دلیل اینکه فرکانس هارمونیک‌ها، نزدیک به فرکانس اصلی ولتاژ خروجی اینورتر می‌باشند، فیلتر کردن این هارمونیک ها بسیار مشکل است و علاوه بر آن، به فیلترهای با حجم بزرگ نیاز دارد. عیب دیگر این روش این است که اندازه‌ی ولتاژ موج خروجی اینورتر ثابت است و برای تغییر آن باید منبع تغذیه DC ورودی را تغییر داد. علاوه براین، پایین بودن فرکانس سوئیچینگ در این مبدل‌ها، می تواند باعث ایجاد نویز صوتی

[1] Square-Wave Pulse Switching

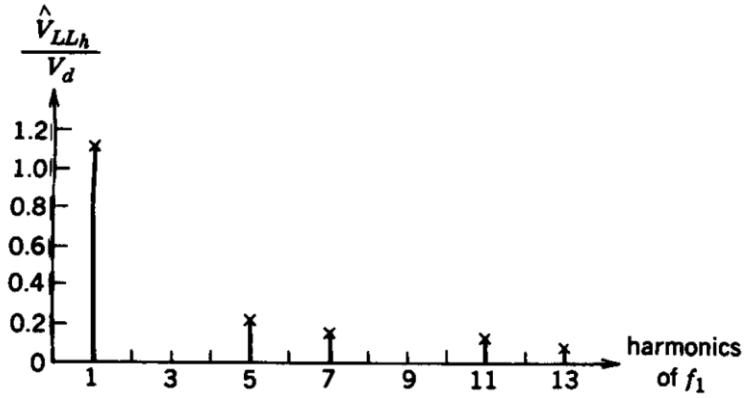
در المان‌های مغناطیسی مدار مثل سلف خروجی شود که یک امر نامطلوب است. مزیت این روش سوئیچینگ نسبت به سایر روش ها، این است که استفاده از سوئیچ‌های فرکانس پایین را امکان پذیر می‌سازد.



شکل ۲ ۳ -اینورتر سه فاز منبع ولتاژ



شکل ۲ ۴ -ولتاژهای خط و فاز اینورتر در روش سوئیچینگ پالس موج مربعی



شکل ۲ ۵ -هارمونیک‌های ولتاژ خط اینورتر در روش سوئیچینگ پالس موج مربعی

۲ ۳ ۲ سوئیچینگ با قابلیت حذف هارمونیک‌های برنامه‌ریزی شده[1]

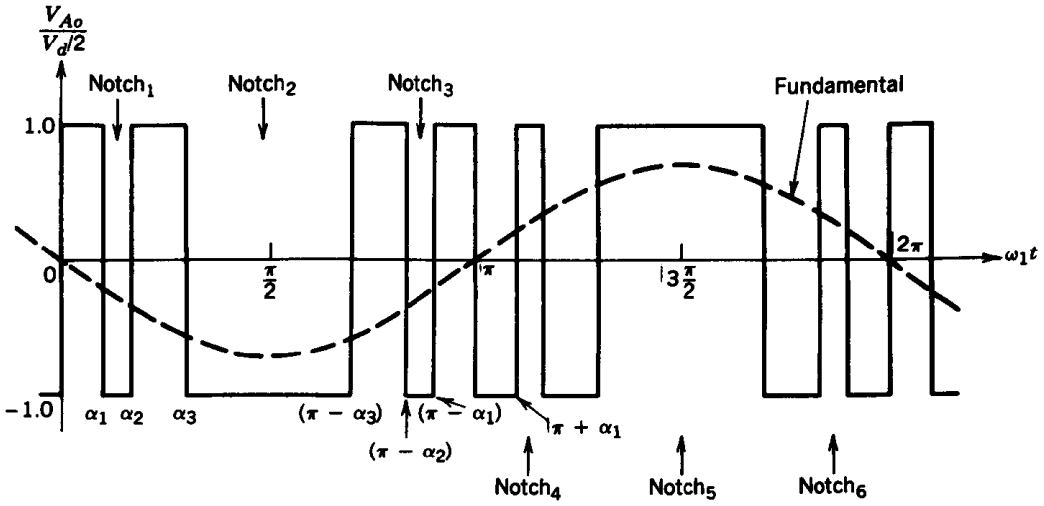
این روش مانند روش قبل می باشد، با این تفاوت که به جای ایجاد یک پالس مربعی درخروجی اینورتر، یک یا چند شکاف[2] در پالس مربعی ایجاد می‌شود[۹]. با تغییر دادن اندازه‌ی این شکاف‌ها می‌توان ولتاژ خروجی اینورتر را کنترل کرد. علاوه بر این، می‌توان اندازه‌ی این شکاف‌ها را طوری تنظیم کرد که یک یا چند هارمونیک در شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر حذف شوند. تعداد هارمونیک‌های قابل حذف به تعداد شکاف‌ها بستگی دارد. بدیهی است که با افزایش تعداد شکاف‌ها، تعداد کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر افزایش می‌یابد.

در شکل ۲-۶ ولتاژ خروجی یکی از فازهای اینورتر که دارای شش شکاف است، مشاهده می‌شود. با ایجاد این شکاف‌ها، هارمونیک‌های پنجم و هفتم آن حذف شده و همچنین دامنه‌ی هامورنیک اول قابل کنترل است. برای کنترل دامنه‌ی هارمونیک اول، زوایای $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ در شکل موج خروجی، باید مطابق نمودار شکل۲-۷ تعیین شوند. همان طور که در نمودار مشاهده می‌شود، برای داشتن هر مقدار دامنه‌ی هارمونیک اصلی، از صفر تا مقدار ماکزیمم آن، می توان سه زاویه‌ی $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ را تعیین کرد.

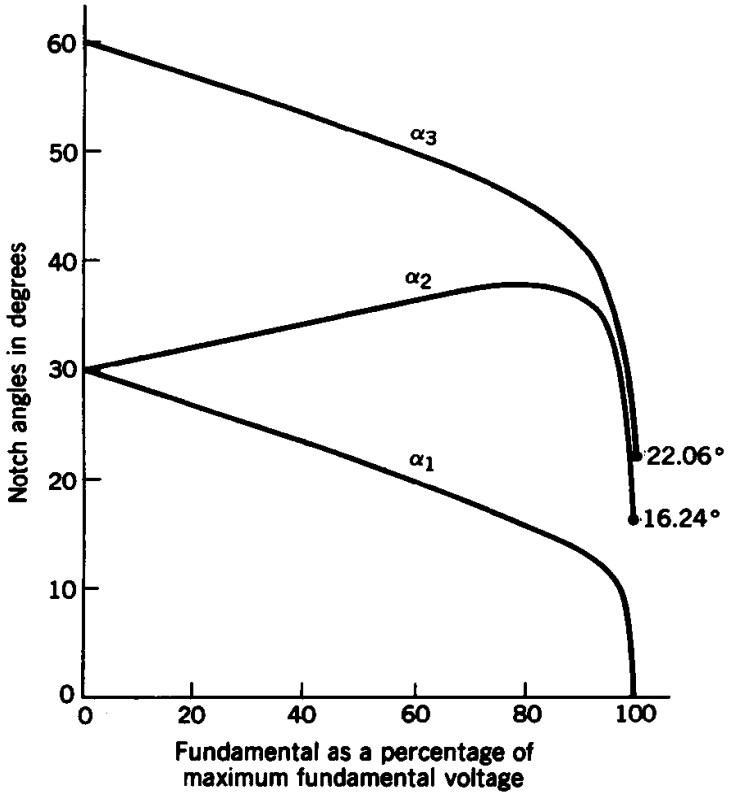
همانطور که در شکل ۲-۵ مشاهده می‌شود، با حذف هارمونیک‌های پنجم و هفتم از ولتاژ خروجی اینورتر، کوچکترین هارمونیک بعد از هارمونیک اصلی آن، هارمونیک یازدهم می باشد. بنابراین فیلتر کردن هارمونیک‌های خروجی اینورتر، نسبت به روش سوئیچینگ پالس موج مربعی ساده‌تر شده است. علاوه براین، اندازه‌ی فیلتر خروجی

[1] Programmed Harmonic Elimination Switching
[2] Notch

اینورتر کوچکتر می‌شود. کاربرد عمده‌ی این روش در اینورترهای تریستوری با توان بالا است که قابلیت افزایش فرکانس سوئیچینگ و انجام روش‌های مدولاسیون PWM در آنها وجود ندارد.



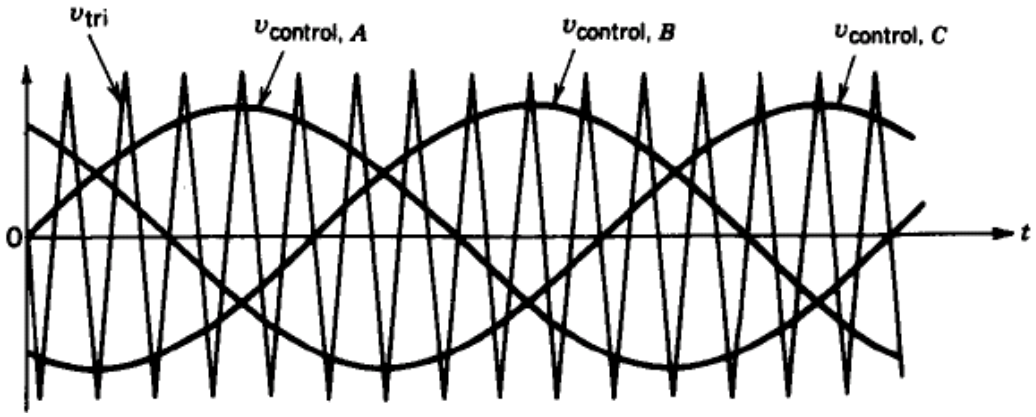
شکل ۲ ۶ -ولتاژ یکی از فازهای اینورتر در روش سوئیچینگ با قابلیت حذف هارمونیک‌های برنامه‌ریزی شده



شکل ۲ ۷ -اندازه‌ی زاویه‌ی شکاف‌ها بر حسب اندازه‌ی هارمونیک اصلی خروجی اینورتر

۲ ۳ ۳ سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس سینوسی[1]

در این روش، سه سیگنال سینوسی مرجع ($V_{control}$) که دارای اختلاف فاز ۱۲۰ درجه هستند، با یک موج مثلثی یا دندانه‌اره‌ای مطابق شکل ۲-۸ مقایسه می‌شوند و پالس گیت سوئیچ‌های اینورتر ساخته می‌شود. با تغییر دامنه و فرکانس سیگنال‌های مرجع، می‌توان دامنه و فرکانس خروجی اینورتر را کنترل کرد[۹].



شکل ۲ ۸ -سیگنال‌های سینوسی مرجع سه فاز و موج مثلثی مرجع در روش سوئیچینگ با مدولاسیون پهنای پالس سینوسی

در این روش، فرکانس کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر با فرکانس موج مثلثی (f_s) برابر است. نسبت فرکانس مدولاسیون (m_f) مطابق زیر تعریف می‌شود:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1} \qquad (۱-۲)$$

که f_1 فرکانس هارمونیک اصلی خروجی اینورتر است. همچنین اندیس مدولاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}} \qquad (۲-۲)$$

که $\hat{V}_{control}$ ماکزیمم دامنه‌ی سیگنال سینوسی کنترلی و $\hat{V}_{tri}$ ماکزیمم دامنه‌ی سیگنال مثلثی می‌باشد.

روش کلیدزنی سوئیچ‌های اینورتر به این صورت است که وقتی $V_{control}$ هر فاز از V_{tri} بزرگتر شد، سوئیچ بالایی ساق مربوط به آن فاز روشن و سوئیچ پایین خاموش می‌شود. در صورتی که $V_{control}$ هر فاز از V_{tri} کوچکترشد، سوئیچ پایینی ساق مربوط به آن فاز اینورتر روشن و سوئیچ بالایی خاموش می‌شود.

شکل موج‌های مربوط به ولتاژ فازهای A و B اینورتر نسبت به N و شکل موج ولتاژ خط در خروجی اینورتر در شکل ۲-۹ قابل مشاهده می‌باشند. همچنین هارمونیک‌های ولتاژ خط اینورتر در شکل ۲-۱۰ مشاهده می‌شوند.

---

[1] Sinusoidal Pulse Width Modulated Switching