





دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه مهندسی برق - قدرت

رساله برای دریافت درجه دکتری در رشته مهندسی برق - قدرت

عنوان

طراحی و ساخت ترانسفورماتور الکترونیک قدرت

دو طرفه

اساتید راهنما

دکتر سیدحسین حسینی

دکتر محمدباقر بناء شریفیان

مرکز اساتید راهنما  
شهر شاهرود

استاد مشاور

دکتر گئورگ قره‌پتیان

۱۳۸۸ / ۴ / ۱۰

پژوهشگر

مهران صباحی

بهار ۱۳۸۸

۱۳۸۸ / ۴ / ۱۰

۱۱۴۲۳۰

تقدیم به همسر مهربان و فداکارم

به پاس ایثار و عاطفه سرشار او که در روزهای سخت بهترین پشتیبان من بود به  
پاس قلب بزرگش و به پاس محبت‌های بی‌دریغش که پایانی ندارد.

## تقدیر و تشکر

در آغاز مراتب سپاس و قدردانی فراوان خود را از استاتید بزرگوارم آقای دکتر سید حسین حسینی و آقای دکتر محمد باقر بناء شریفیان که همواره راهنما، یاور و پشتیبان اینجانب بوده‌اند و توفیق خود را مدیون این اساتید بزرگوار هستم، اعلام می‌نمایم. همچنین از زحمات استاد محترم جناب آقای دکتر قره‌پتیان که همواره از کمک‌های بی‌دریغ ایشان برخوردار شده‌ام کمال تشکر و امتنان را دارم.

همچنین از دوستان عزیز آقایان دکتر ابراهیم بابائی، مهندس علی یزدان‌پناه گوهرریزی، مهندس سعید دانیالی، مهندس حجت حاتمی و سایر عزیزانی که به‌خاطر اینجانب متحمل زحمات شده‌اند نهایت سپاس و تشکر را داشته و آرزوی توفیق روز افزون ایشان را از خداوند متعال خواهانم.

نام خانوادگی دانشجو: صباحی نام: مهران

عنوان رساله: طراحی و ساخت ترانسفورماتور الکترونیک قدرت دوطرفه

استادان راهنما: دکتر سید حسین حسینی و دکتر محمدباقر بناء شریفیان

استاد مشاور: دکتر گئورگ قره‌پتیان

مقطع تحصیلی: دکتری رشته: برق گرایش: قدرت دانشگاه: تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر تاریخ فارغ التحصیلی: بهار ۱۳۸۸ تعداد صفحه: ۱۴۰

کلید واژه ها: ترانسفورماتور الکترونیک قدرت، ترانسفورماتور حالت جامد، مبدل‌های الکترونیک قدرت

دو طرفه، کلیدهای دوطرفه، مبدل‌های با لینک فرکانس بالا.

**چکیده:** ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت (Power Electronic Transformer, PET) جزو زمینه‌های تحقیقاتی اخیر محسوب می‌شوند و برخلاف سایر مبدل‌های الکترونیک قدرت، کار مطالعاتی و عملی کم‌تری بر روی آن‌ها انجام شده است. بررسی تحقیقات انجام شده بیان‌گر ارزش‌مند بودن تئوری PET می‌باشد هرچند منابع منتشر شده در این زمینه محدود می‌باشد. امروزه ساختارهای انعطاف‌پذیری از PETها مطرح شده‌اند که علاوه بر انجام کار اصلی خود (تبدیل و ایزوله‌سازی ولتاژ)، قادر به انجام توابع دیگری به ویژه در مورد اصلاح کیفیت توان می‌باشند. در این رساله ابتدا پیشینه تحقیقات و روش‌ها مطالعه می‌شود و در ادامه ساختارهای جدیدی با قابلیت کنترل دوطرفه توان برای ترانسفورماتور الکترونیک قدرت (PET دوطرفه) معرفی می‌شود. سعی بر این بوده است که ساختارهای ارائه شده جامع، قابل توسعه و دارای انعطاف‌پذیری لازم برای آرایش‌های مختلف، جهت کاربری‌های متنوع باشند. سپس نحوه کنترل ساختار پیشنهادی و طبقه‌بندی مسیره‌های ارتباطی آن با یک شیوه جدید بیان شده و چندین کاربرد جدید همراه با نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای نشان دادن توانایی‌های ساختار پیشنهادی، همراه با مقایسه‌ای با برخی از آخرین ساختارهای مطرح شده، ارائه می‌شوند. نتایج حاصل از تحقق و ساخت یک نمونه اولیه و آزمایشگاهی از ساختار پیشنهادی نیز ارائه شده‌اند. در ادامه امکان ایجاد شرایط کلیدزنی نرم در ترانسفورماتور الکترونیک قدرت دوطرفه بررسی می‌شود. این مطالعه شامل ارائه مدار نمونه، طراحی، محاسبات تلفات در دو حالت کلیدزنی نرم و کلیدزنی سخت و مقایسه بین آن‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از تحقق یک نمونه آزمایشگاهی نیز ارائه شده‌اند.

از طرف دیگر در مطالعات پیشین چندان به بررسی امکان کاربردهای صنعتی PET توجه نشده است. در واقع می‌توان PET را به‌عنوان مبدل مناسبی در بسیاری از کاربردهای الکترونیک قدرت و سیستم‌های تبدیل انرژی جانشین سایر انواع مبدل نمود. برای بررسی توانایی ترانسفورماتور الکترونیک قدرت در این بازه، دو کاربرد صنعتی از آن ارائه می‌شوند. ابتدا طرح جدیدی از یک سیستم گرمایش القایی بر اساس ساختار PET دوطرفه معرفی و طراحی می‌شود و نتایج عملی حاصل از یک نمونه آزمایشگاهی نیز ارائه شده‌اند. سپس یک سیستم روشنایی بر اساس ساختار PET دوطرفه معرفی می‌شود. همراه با ارائه محاسبات مربوط به طراحی، نتایج عملی اخذ شده از نمونه آزمایشگاهی برای اثبات صحت تئوری ساختار پیشنهادی نیز ذکر شده‌اند.

## فهرست مطالب

فهرست شکل‌ها

فهرست جداول

کلمات اختصاری

## قسمت اول: بررسی منابع و پیشینه پژوهش

## فصل اول: مطالعات اولیه و ساختارهای اساسی ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت

- ۱-۱ مقدمه ۱-۱
- ۲-۱ مروری بر تاریخچه ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت ۲-۱
- ۳-۱ دسته بندی انواع PETها ۳-۱
- ۱-۳-۱ PETهای تک‌فاز ۱-۳-۱
- ۱-۱-۳-۱ PET تک‌فاز با استفاده از ترانسفورماتور با سر وسط ۱-۱-۳-۱
- ۲-۱-۳-۱ PET تک‌فاز کاهنده با ساختار Buck ۲-۱-۳-۱
- ۳-۱-۳-۱ PET با ساختار نوع Boost تک‌فاز ۳-۱-۳-۱
- ۴-۱-۳-۱ PET تک‌فاز با ساختار نوع Buck-Boost ۴-۱-۳-۱
- ۵-۱-۳-۱ PET با ساختار نوع Z-Source تک‌فاز ۵-۱-۳-۱
- ۲-۳-۱ PETهای سه‌فاز ۲-۳-۱
- ۱-۲-۳-۱ PETهای سه‌فاز از نوع Buck ۱-۲-۳-۱
- ۲-۲-۳-۱ PETهای سه‌فاز از نوع Boost ۲-۲-۳-۱
- ۳-۲-۳-۱ PETهای سه‌فاز از نوع Buck-Boost ۳-۲-۳-۱
- ۳-۳-۱ PETهای مستقیم با ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۳-۳-۱
- ۴-۳-۱ PETهای غیرمستقیم با ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۴-۳-۱
- ۵-۳-۱ ساختارهای قابل توسعه PET ۵-۳-۱
- ۴-۱ جمع‌بندی ۴-۱

## قسمت دوم: مواد و روش‌ها

## فصل دوم: مبانی و روش‌ها

- ۱-۲ مقدمه ۱-۲
- ۲-۲ بررسی اهمیت موضوع و ضرورت تحقیق ۲-۲
- ۳-۲ اجزاء اصلی PETها ۳-۲
- ۱-۳-۲ ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۱-۳-۲
- ۲-۳-۲ کلیدهای نیمه‌هادی ۲-۳-۲
- ۴-۲ روش‌های ایجاد فرمان کلیدزنی ۴-۲
- ۱-۴-۲ روش مدولاسیون دامنه ۱-۴-۲

۲۱	۲-۴-۲ روش مدولاسیون متقارن
۲۲	۳-۴-۲ PET از نوع مستقیم
۲۳	۴-۴-۲ PET از نوع غیرمستقیم
۲۴	۵-۲ قابلیت PETها در اصلاح کیفیت توان
۲۴	۱-۵-۲ استفاده از PET به عنوان تنظیم‌کننده ولتاژ
۲۵	۲-۵-۲ اصلاح ضریب توان ورودی در PET
۲۶	۶-۲ قابلیت PETها در کاربردهای صنعتی
۲۶	۷-۲ جمع‌بندی

## فصل سوم: نتایج و بحث

۲۷	فصل سوم: معرفی ساختار جامع ترانسفورماتور الکترونیک قدرت با مسیره‌های دوطرفه چندگانه
۲۷	۱-۳ مقدمه
۲۷	۲-۳ تعیین مسیر تحقیق
۲۸	۳-۳ ویژگی‌های ساختار پیشنهادی
۲۹	۴-۳ معرفی ترانسفورماتور الکترونیک قدرت با پورت‌های دوطرفه چندگانه MBP-PET
۳۰	۱-۴-۳ خصوصیات بلوک مدولاتور
۳۰	۲-۴-۳ خصوصیات بلوک دم‌ولاتور
۳۱	۵-۳ مدار اولیه پیشنهادی برای ساختار MBP-PET
۳۱	۱-۵-۳ روش مدولاسیون ولتاژ لینک dc و دم‌ولاتیون در طرف سیکلوکانورتر
۳۲	۲-۵-۳ روش مدولاسیون شیفت فاز در سمت لینک dc با ایجاد کلیدزنی نرم ZVS برای طرف سیکلوکانورتر
۳۵	۳-۵-۳ مدولاسیون پیشنهادی مبتنی بر پهنای پالس ثابت و فرکانس ثابت با قابلیت کلیدزنی نرم ZVS برای طرف سیکلوکانورتر
۳۶	۴-۵-۳ معادلات دینامیکی پورت MPB-PET
۳۶	۶-۳ ساختارهای پیشنهادی MBP-PET با تعداد کلیدهای کاهش یافته
۳۷	۱-۶-۳ ساختار پیشنهادی MBP-PET با شاخه مرجع
۳۷	۲-۶-۳ ساختار پیشنهادی MBP-PET با شاخه‌های متوالی
۳۸	۳-۶-۳ ساختار پیشنهادی MBP-PET برای مدولاسیون از نوع فرکانس و عرض پالس ثابت
۳۸	۷-۳ نحوه کنترل جریان انرژی پورت‌ها در MBP-PET
۳۸	۱-۷-۳ تخمین اختلاف توان کل پورت‌ها برای تنظیم ولتاژ لینک dc
۳۹	۲-۷-۳ نحوه تنظیم ولتاژ لینک dc با تعریف پورت با توان شناور
۴۱	۸-۳ نحوه تقسیم‌بندی پورت‌های MBP-PET
۴۱	۱-۸-۳ کاربرد پورت به‌عنوان منبع ولتاژ کنترل شده
۴۱	۲-۸-۳ کاربرد پورت به‌عنوان منبع جریان کنترل شده
۴۲	۳-۸-۳ کاربرد پورت به‌عنوان مقاومت کنترل شده برای اتصال به هر گونه منبع ولتاژ نامشخص
۴۳	۴-۸-۳ کاربرد پورت به‌عنوان شینه متصل به شبکه سینوسی یا پورت شبکه
۴۴	۹-۳ روش طراحی MBP-PET
۴۴	۱-۹-۳ برآورد ظرفیت مناسب برای خازن لینک dc
۴۵	۲-۹-۳ انتخاب ولتاژ مرجع لینک dc و نسبت دور HFIT

۴۶	۳-۹-۳ تعیین مقدار سلف تطبیق ( $L_r$ )
۴۶	۴-۹-۳ طراحی کنترل کننده
۴۶	۱-۴-۹-۳ کنترل کننده داخلی
۴۷	۲-۴-۹-۳ کنترل کننده خارجی
۴۹	۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET
۵۰	۱-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET پایه با یک پورت
۵۳	۲-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET با یک پورت شبکه و یک پورت منبع ولتاژ
۵۶	۳-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET با یک پورت از نوع شبکه و یک پورت با عمل کرد منبع جریان
۵۸	۴-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET با یک پورت از نوع شبکه، دو پورت با عمل کرد منبع ولتاژ و یک پورت به صورت مقاومت کنترل شده
۶۲	۵-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET با عمل کرد به عنوان فیلتر اکتیو سری و موازی
۶۵	۶-۱۰-۳ نتایج شبیه سازی MBP-PET به عنوان ترانسفورماتور توزیع سه فاز برای بار حساس
۷۱	۱۱-۳ مقایسه MBP-PET با آخرین ساختارهای PET
۷۱	۱-۱۱-۳ عمل کرد MBP-PET برای افزایش سطح ولتاژ ورودی در مقایسه با ساختار PET چند سطحه
۷۴	۲-۱۱-۳ عمل کرد MBP-PET به عنوان ترانسفورماتور الکترونیک قدرت در سیستم توزیع
۷۵	۱۲-۳ نتایج عملی حاصل از نمونه ساخته شده MBP-PET آزمایشگاهی
۷۹	۱۳-۳ جمع بندی
۸۰	<b>فصل چهارم: معرفی ساختار ترانسفورماتور الکترونیک قدرت دوطرفه با قابلیت کلیدزنی نرم</b>
۸۰	۱-۴ مقدمه
۸۱	۲-۴ ساختار PET پیشنهادی با قابلیت کلیدزنی نرم
۸۲	۳-۴ نحوه عمل PET پیشنهادی
۸۲	۱-۳-۴ روش کلیدزنی با استفاده از مدولاسیون PSM
۸۳	۲-۳-۴ شرایط ایجاد کلیدزنی نرم
۸۳	۴-۴ محاسبات شرایط کلیدزنی نرم و تعریف شاخص ZVS
۸۵	۵-۴ محاسبه مقادیر الجان های فیلتر خروجی
۸۶	۱-۵-۴ محاسبه و انتخاب مقدار $L_r$
۸۷	۲-۵-۴ انتخاب مقدار خازن $C_r$
۸۸	۶-۴ محاسبه تلفات کلیدها در ساختار پیشنهادی
۸۸	۱-۶-۴ انتخاب مدل مداری کلیدهای قدرت برای محاسبه تلفات
۸۸	۲-۶-۴ محاسبه تلفات در حالت کلیدزنی نرم
۸۸	۱-۲-۶-۴ محاسبه تلفات هدایت
۹۲	۲-۲-۶-۴ محاسبه تلفات کلیدزنی
۹۳	۳-۲-۶-۴ تلفات کل در حالت کلیدزنی نرم
۹۳	۳-۶-۴ تعیین تلفات در حالت کلیدزنی سخت
۹۳	۷-۴ تعیین مقادیر عددی نمونه برای ساختار پیشنهادی
۹۴	۸-۴ تحلیل بازده ساختار پیشنهادی با استفاده از مقادیر عددی نمونه



۹۵	۹-۴ نتایج شبیه‌سازی و آزمایشگاهی
۹۸	۱۰-۴ جمع‌بندی
۱۰۰	فصل پنجم: کاربرد ترانسفورماتور الکترونیک قدرت دوطرفه به‌عنوان سیستم گرمایش القایی
۱۰۰	۱-۵ مقدمه
۱۰۱	۲-۵ نحوه عمل‌کرد مدار پیشنهادی
۱۰۳	۳-۵ تحلیل مدار معادل ac ساختار پیشنهادی
۱۰۳	۱-۳-۵ محاسبه فرکانس کلیدزنی
۱۰۴	۲-۳-۵ محاسبه توان خروجی
۱۰۵	۳-۳-۵ نحوه انتخاب مقدار سلف تطبیق دهنده
۱۰۶	۴-۳-۵ نحوه تنظیم فرکانس کلیدزنی
۱۰۷	۴-۵ تخمین ضریب توان طرف منبع و هارمونیک‌های فرکانس پایین
۱۰۸	۵-۵ نمونه آزمایشگاهی ساختار پیشنهادی
۱۰۸	۱-۵-۵ انتخاب کلیدهای دوطرفه
۱۰۸	۲-۵-۵ نحوه عمل‌کرد مدار کنترل
۱۰۹	۳-۵-۵ معیار طراحی
۱۱۰	۴-۵-۵ نتایج عملی
۱۱۲	۶-۵ جمع‌بندی

فصل ششم: کاربرد ترانسفورماتور الکترونیک قدرت دوطرفه به‌عنوان سیستم روشنایی با خروجی‌های چندگانه

۱۱۳	۱-۶ مقدمه
۱۱۴	۲-۶ نحوه عمل‌کرد مدار پیشنهادی
۱۱۵	۳-۶ تحلیل مدار معادل ac ساختار پیشنهادی
۱۱۵	۱-۳-۶ محاسبه فرکانس کلیدزنی
۱۱۶	۲-۳-۶ محاسبه ولتاژ خروجی
۱۱۷	۳-۳-۶ محاسبه توان خروجی
۱۱۸	۴-۶ مثال طراحی
۱۱۸	۵-۶ نمونه آزمایشگاهی ساختار پیشنهادی
۱۱۸	۱-۵-۶ نحوه عمل‌کرد مدار کنترل
۱۱۹	۲-۵-۶ نتایج عملی
۱۲۲	۶-۶ جمع‌بندی

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۱۲۴	فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۱۲۹	مراجع
۱۳۲	چکیده انگلیسی

## شکل‌های فصل اول

- شکل ۱-۱: ساختار کلی PET ۳
- شکل ۲-۱: نمونه‌ای از PET با استفاده از ساختار H ۳
- شکل ۳-۱: ساختار PET تک‌فاز با استفاده از ترانسفورماتور با سر وسط ۵
- شکل ۴-۱: فرمان‌های کنترل کلیدها برای PET تک‌فاز با استفاده از ترانسفورماتور با سر وسط ۵
- شکل ۵-۱: شکل موج‌های ولتاژ خروجی ۵
- شکل ۶-۱: ساختار اساسی PET تک‌فاز از نوع Buck ۶
- شکل ۷-۱: آرایش دیگری از مبدل Buck ۶
- شکل ۸-۱: مبدل نوع Boost تک‌فاز ۶
- شکل ۹-۱: مبدل نوع Buck-Boost تک‌فاز ۶
- شکل ۱۰-۱: ساختار اساسی PET از نوع ZSC ۷
- شکل ۱۱-۱: فرمان کلیدزنی مبدل ZCS ۷
- شکل ۱۲-۱: حالت‌های کار PET از نوع ZSC ۸
- شکل ۱۳-۱: PET سه‌فاز از نوع Buck ۹
- شکل ۱۴-۱: PET سه‌فاز از نوع Boost ۱۰
- شکل ۱۵-۱: مبدل سه‌فاز Buck-Boost ۱۰
- شکل ۱۶-۱: PET سه‌فاز با یک ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۱۱
- شکل ۱۷-۱: PET سه‌فاز با یک ترانسفورماتور ایزوله‌کننده و لینک DC ۱۱
- شکل ۱۸-۱: PET سه‌فاز با ساختار ماتریسی و سه ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۱۲
- شکل ۱۹-۱: برخی از انواع معمول ساختارهای PET غیرمستقیم ۱۳
- شکل ۲۰-۱: ساختار PET سه‌فاز برای سیستم‌های توزیع ۱۳
- شکل ۲۱-۱: انواع PET قابل توسعه ۱۴
- شکل ۲۲-۱: PET قابل توسعه چندسطحی ۱۵

## شکل‌های فصل دوم

- شکل ۱-۲: فرمان‌های کلیدزنی برای  $S_1$  تا  $S_3$  ۲۱
- شکل ۲-۲: شکل موج ولتاژ اولیه و ثانویه ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۲۱
- شکل ۳-۲: شکل موج ولتاژ خروجی قبل و بعد از طبقه فیلتر ۲۱
- شکل ۴-۲: فرمان‌های کلیدزنی برای  $S_1$  تا  $S_3$  در شرایط مدولاسیون متقارن ۲۲
- شکل ۵-۲: شکل موج ولتاژ خروجی در شرایط مدولاسیون متقارن ۲۲
- شکل ۶-۲: روش کار کلی نوع مستقیم PET با ترانسفورماتور ایزوله‌کننده ۲۳
- شکل ۷-۲: روش کار کلی یک نوع PET غیرمستقیم با ترانسفورماتور ایزوله‌کننده و لینک dc ۲۴
- شکل ۸-۲: یک نمونه مدار تنظیم‌کننده ولتاژ ۲۵

## شکل‌های فصل سوم

- شکل ۱-۳: بلوک دیاگرام ساختار پایه پیشنهادی ترانسفورماتور الکترونیک قدرت با پورت‌های دوطرفه چندگانه ۲۹
- شکل ۲-۳: ساختار اولیه پیشنهادی، مدار اولیه ۳۱

- شکل ۳-۳: روش حذف مولفه dc در ترانسفورماتور ایزوله‌کننده
- شکل ۳-۴: روش اجرای کنترل PSM در ساختار پیشنهادی
- شکل ۳-۵: مولفه‌های هارمونیکی مورد انتظار برای ولتاژ خروجی سیکلوکانورتر
- شکل ۳-۶: روش مدولاسیون و دمدولاسیون پیشنهادی مبتنی بر فرکانس و پهنای پالس ثابت
- شکل ۳-۷: مدار معادل خروجی سیکلوکانورتر در پورت  $z_{am}$
- شکل ۳-۸: ساختار پیشنهادی MBP-PET با شاخه مرجع
- شکل ۳-۹: ساختار پیشنهادی MBP-PET با شاخه‌های متوالی
- شکل ۳-۱۰: ساختار پیشنهادی MBP-PET برای مدولاسیون فرکانس و عرض پالس ثابت
- شکل ۳-۱۱: ساختار کلی MBP-PET
- شکل ۳-۱۲: تولید پالس‌های فرمان کلیدها بر اساس روش مدولاسیون PSM
- شکل ۳-۱۳: بخش راه‌انداز و حفاظت
- شکل ۳-۱۴: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده خارجی پورت با کاربرد به‌عنوان منبع ولتاژ
- شکل ۳-۱۵: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده خارجی پورت با کاربرد به‌عنوان منبع جریان
- شکل ۳-۱۶: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده خارجی پورت با کاربرد به‌عنوان مقاومت کنترل شده
- شکل ۳-۱۷: بلوک دیاگرام کلی کنترل‌کننده خارجی پورت با کاربرد به‌عنوان شینه متصل به شبکه
- شکل ۳-۱۸: ساختار PET پیشنهادی با یک پورت و بار اهمی در لینک dc
- شکل ۳-۱۹: نحوه شارژ خازن، الف) با شارژ اولیه توسط منبع کمکی، ب) بدون منبع کمکی
- شکل ۳-۲۰: الف) از بالا به ترتیب ولتاژ پورت و جریان خروجی پورت، ب) شکل موج‌های باز شده
- شکل ۳-۲۱: الف) از بالا به ترتیب ولتاژ ثانویه HFIT و خروجی سیکلوکانورتر، ب) شکل موج‌های باز شده
- شکل ۳-۲۲: توان متوسط خروجی به شبکه ( $P_I$ ) و توان متوسط ورودی به بار لینک dc
- شکل ۳-۲۳: مولفه‌های هارمونیکی جریان خروجی پورت ( $i_{pri}$ )
- شکل ۳-۲۴: ساختار MBP-PET با دو پورت با کاربرد به‌عنوان پورت شبکه و منبع ولتاژ
- شکل ۳-۲۵: از بالا به ترتیب ولتاژ و جریان پورت اول و ولتاژ و جریان پورت دوم
- شکل ۳-۲۶: توان متوسط خروجی از پورت اول به شبکه، خروجی از پورت دوم و ورودی به لینک dc
- شکل ۳-۲۷: مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ پورت دوم ( $v_{pr2}$ ) تا مرتبه پانزدهم
- شکل ۳-۲۸: الف) نحوه شارژ خازن، ب) نحوه ایجاد تپش در ولتاژ رپیل
- شکل ۳-۲۹: از بالا به ترتیب شکل موج‌های ولتاژ و جریان خروجی پورت دوم
- شکل ۳-۳۰: ساختار MBP-PET با دو پورت با عمل کرد به‌صورت متصل به شبکه و منبع جریان
- شکل ۳-۳۱: ولتاژ و جریان خروجی به‌همراه جریان مرجع پورت دوم
- شکل ۳-۳۲: از بالا به ترتیب ولتاژ ثانویه، ولتاژ خروجی سیکلوکانورتر به‌همراه ولتاژ پورت دوم، جریان مرجع و جریان پورت دوم در مدولاسیون فرکانس و پهنای پالس ثابت
- شکل ۳-۳۳: MBP-PET با چهار پورت با عمل کرد به‌عنوان پورت شبکه، منبع ولتاژ و مقاومت کنترل‌شده
- شکل ۳-۳۴: شکل موج‌های ولتاژ پورت‌های اول تا سوم و شکل موج جریان آن‌ها
- شکل ۳-۳۵: شکل موج ولتاژ پورت چهارم و شکل موج جریان آن
- شکل ۳-۳۶: توان متوسط خروجی از پورت‌ها
- شکل ۳-۳۷: مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ پورت دوم
- شکل ۳-۳۸: توان متوسط خروجی از پورت‌ها در حین قطع منبع ولتاژ متصل به پورت چهارم

- شکل ۳-۳۹: اغتشاش ایجاد شده در ولتاژ دو سر لینک dc در حین قطع منبع ولتاژ متصل به پورت چهارم
- شکل ۳-۴۰: شبکه و بار غیرخطی نامتقارن الف) دیاگرام مداری، ب) ولتاژ و جریان بار
- شکل ۳-۴۱: ساختار MBP-PET با عمل کرد به‌عنوان فیلتر اکتیو سری و موازی
- شکل ۳-۴۲: بلوک دیاگرام مدار کنترل خارجی برای ساختار MBP-PET با عمل کرد به‌صورت فیلتر فعال
- شکل ۳-۴۳: الف) شکل موج‌های جریان بار، جریان اصلاح شده شبکه و جریان جبران‌ساز پورت اول، ب) شکل موج‌های ولتاژ دو سر بار، ولتاژ شبکه ورودی و ولتاژ جبران‌ساز پورت دوم
- شکل ۳-۴۴: طیف هارمونیک ولتاژ دو سر بار
- شکل ۳-۴۵: طیف هارمونیک جریان شبکه
- شکل ۳-۴۶: شبکه سه‌فاز نامتعادل و بار سه‌فاز نامتعادل
- شکل ۳-۴۷: ولتاژ و جریان سه‌فاز شبکه و بار
- شکل ۳-۴۸: ساختار MBP-PET به‌عنوان ترانسفورماتور توزیع سه‌فاز برای بار حساس
- شکل ۳-۴۹: بلوک دیاگرام مدار تخمین‌گر مقدار مقاومت مرجع پورت‌ها
- شکل ۳-۵۰: الف) شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز طرف شبکه، پورت‌های اول، دوم و سوم، ب) شکل موج‌های ولتاژ و جریان سه‌فاز طرف بار، پورت‌های چهارم، پنجم و ششم
- شکل ۳-۵۱: شکل موج ولتاژ پورت‌های اول تا ششم و شکل موج جریان آن‌ها در لحظه رخداد خطای اول
- شکل ۳-۵۲: شکل موج ولتاژ پورت‌های اول تا ششم و شکل موج جریان آن‌ها در لحظه رخداد خطای دوم
- شکل ۳-۵۳: توان متوسط خروجی از پورت‌ها در حین قطع فاز دوم و نیز سوم شبکه
- شکل ۳-۵۴: اغتشاش ایجاد شده در ولتاژ دو سر خازن لینک dc در حین قطع فاز دوم و نیز سوم شبکه
- شکل ۳-۵۵: شکل موج ولتاژ پورت‌های اول تا ششم و شکل موج جریان آن‌ها بعد از خطای دوم
- شکل ۳-۵۶: ترکیب MBP-PET برای افزایش سطح ولتاژ پورت‌ها
- شکل ۳-۵۷: شکل موج‌های ولتاژ و جریان شبکه
- شکل ۳-۵۸: شکل موج‌های ولتاژ و جریان بار
- شکل ۳-۵۹: توان متوسط خروجی از پورت‌ها
- شکل ۳-۶۰: ولتاژ دو سر خازن لینک dc
- شکل ۳-۶۱: اثر تغییرات ولتاژ شبکه بر ولتاژ بار و لینک dc
- شکل ۳-۶۲: مدار قدرت نمونه MBP-PET آزمایشگاهی با دو پورت
- شکل ۳-۶۳: نمونه MBP-PET آزمایشگاهی ساخته شده
- شکل ۳-۶۴: شکل موج‌های ولتاژ و جریان ورودی از شبکه  $(I=IA/div)$ ، الف) جریان ورودی پس‌فاز، ب) ضریب توان واحد، ج) جریان ورودی پیش‌فاز
- شکل ۳-۶۵: شکل ۳-۶۵: تپش در شکل موج ولتاژ لینک dc الف) نتیجه عملی، ب) نتیجه شبیه‌سازی
- شکل ۳-۶۶: ولتاژ و جریان کلیدها، بالا عملی، پایین شبیه‌سازی، الف) S1، ب) S3 و ج) Sa
- شکل ۳-۶۷: ولتاژ و جریان پورت‌ها
- شکل ۳-۶۸: اشکال مختلف شکل موج پورت دوم، الف) شکل موج سینوسی، ب) شکل موج مثلثی، ج) شکل موج مربعی
- شکل ۳-۶۹: طیف هارمونیک ولتاژ پورت دوم الف) بر حسب dB، ب) بر حسب درصد

### شکل‌های فصل چهارم

- شکل ۴-۱: مدار قدرت PET پیشنهادی با قابلیت کلیدزنی نرم
- شکل ۴-۲: شکل موج ولتاژ لینک dc

- شکل ۳-۴: روش کنترلی PSM ۸۲
- شکل ۴-۴: نحوه تغییرات جریان سلف فیلتر خروجی برای یک دوره کلیدزنی ۸۴
- شکل ۵-۴: حالت‌های کلیدزنی PET در یک بازه زمانی  $T_d$  ۸۵
- شکل ۶-۴: مدل تلفات کلیدهای قدرت ۸۸
- شکل ۷-۴: ولتاژها و جریان‌های کلیدها در حالت کلیدزنی نرم طی یک دوره کاری ۹۰
- شکل ۸-۴: شکل موج ولتاژ و جریان در شرایط کلیدزنی سخت طی یک دوره کاری ۹۰
- شکل ۹-۴: تغییرات  $L_r^*$  برحسب تغییرات  $D$  ۹۴
- شکل ۱۰-۴: تغییرات شاخص کلیدزنی نرم نسبت به تغییرات دوره کاری ۹۴
- شکل ۱۱-۴: تغییرات راندمان PET برحسب فرکانس کلیدزنی در دو حالت کلیدزنی نرم و سخت ۹۵
- شکل ۱۲-۴: شکل موج‌های شبیه‌سازی و عملی برای جریان  $I_r$  ۹۶
- شکل ۱۳-۴: شکل موج‌های ولتاژ و جریان مربوط به الف ( $\delta_a$ ، ب ( $\delta_b$ ، ج ( $\delta_c$ ) ۹۶
- شکل ۱۴-۴: شکل موج‌های اندازه‌گیری شده و شبیه‌سازی شده، الف) شکل موج خروجی و ولتاژ خروجی سیکلوکانورتور، ب) شکل موج ولتاژ ورودی و خروجی ۹۷
- شکل ۱۵-۴: مقایسه تلفات مدار آزمایشگاهی در دو حالت کلیدزنی نرم و کلیدزنی سخت ۹۷
- شکل ۱۶-۴: بلوک دیاگرام مدار کنترل مدار آزمایشگاهی ۹۸
- شکل ۱۷-۴: نمونه آزمایشگاهی از PET پیشنهادی ۹۸

### شکل‌های فصل پنجم

- شکل ۱-۵: سیستم گرمایش القایی پیشنهادی بر اساس ساختار PET ۱۰۱
- شکل ۲-۵: نحوه عمل PET پیشنهادی، الف) الگوی کلیدزنی، ب) نحوه تنظیم مقدار موثر  $V_{s1}$  ۱۰۲
- شکل ۳-۵: الف) مدار معادل PET پیشنهادی، ب) مدار ساده شده ۱۰۳
- شکل ۴-۵: تغییرات توان متوسط بار برحسب دوره کاری  $D$  و نسبت دور سیم‌پیچی HFIT ۱۰۵
- شکل ۵-۵: روش تنظیم خودکار فرکانس کلیدزنی ۱۰۷
- شکل ۶-۵: شکل موج‌های ولتاژ فاز ورودی  $V_A$  و  $V_{max}$  طرف اولیه HFIT، جریان فاز ورودی  $(i_A)$  و مولفه اصلی آن  $(i_{A1})$  و جریان فیلتر شده فاز  $(i_{AF})$  ۱۰۷
- شکل ۷-۵: نمونه آزمایشگاهی ساخته شده از ساختار پیشنهادی ۱۰۸
- شکل ۸-۵: بلوک دیاگرام مدار کنترل ۱۰۸
- شکل ۹-۵: ولتاژهای اولیه و ثانویه ۱۱۰
- شکل ۱۰-۵: شکل موج ولتاژهای  $V_o$  و  $V_s$  ۱۱۰
- شکل ۱۱-۵: ولتاژ و جریان فاز ورودی، الف) شکل موج‌های اندازه‌گیری شده، ب) شکل موج‌های شبیه‌سازی شده ۱۱۱
- شکل ۱۲-۵: روند گرمایش قطعه کار ۱۱۱

### شکل‌های فصل ششم

- شکل ۱-۶: سیستم روشنایی پیشنهادی بر اساس ساختار PET ۱۱۴
- شکل ۲-۶: نحوه عمل PET پیشنهادی، الف) الگوی کلیدزنی، ب) نحوه تنظیم مقدار موثر  $V_{s1}$  ۱۱۴
- شکل ۳-۶: الف) مدار معادل PET پیشنهادی، ب) مدار ساده شده ۱۱۵
- شکل ۴-۶: نحوه راه‌اندازی نرم ۱۱۶
- شکل ۵-۶: تغییرات فرکانس تشدید برحسب خازن خروجی ۱۱۸

- شکل ۶-۶: نمونه آزمایشگاهی ساخته شده از ساختار پیشنهادی ۱۱۹
- شکل ۶-۷: بلوک دیاگرام مدار کنترل ۱۱۹
- شکل ۶-۸: شماتیک مدار الکترونیکی کنترل ۱۲۰
- شکل ۶-۹: لحظه راه‌اندازی، الف) لامپ ۴۰ وات، ب) لامپ ۲۰ وات ۱۲۰
- شکل ۶-۱۰: ولتاژ و جریان مربوط به یک فاز و طیف هارمونیکی جریان فاز به‌همراه معیار استاندارد ۱۲۱
- شکل ۶-۱۱: ولتاژ و جریان لامپ ۴۰ وات در توان‌های متفاوت خروجی ۱۲۲

### جداول فصل سوم

۳۳	جدول ۱-۳ حالت‌های ممکن کلیدزنی FBDCI
۳۳	جدول ۲-۳ تعریف نمادها
۵۰	جدول ۳-۳ پارامترهای شبیه‌سازی کلی
۵۰	جدول ۴-۳ پارامترهای شبیه‌سازی اول
۵۳	جدول ۵-۳ نتایج عددی شبیه‌سازی اول
۵۳	جدول ۶-۳ پارامترهای شبیه‌سازی دوم
۵۵	جدول ۷-۳ نتایج عددی شبیه‌سازی دوم
۵۷	جدول ۸-۳ پارامترهای شبیه‌سازی سوم
۵۹	جدول ۹-۳ پارامترهای شبیه‌سازی چهارم
۶۱	جدول ۱۰-۳ نتایج عددی شبیه‌سازی چهارم
۶۳	جدول ۱۱-۳ پارامترهای شبیه‌سازی پنجم
۶۶	جدول ۱۲-۳ پارامترهای شبیه‌سازی ششم
۶۸	جدول ۱۳-۳ نتایج عددی شبیه‌سازی ششم
۷۳	جدول ۱۴-۳ پارامترهای شبیه‌سازی هفتم
۷۶	جدول ۱۵-۳ برخی از پارامترهای نمونه ساخته شده

### جداول فصل چهارم

۸۳	جدول ۱-۴ معرفی علائم
۸۹	جدول ۲-۴ تعریف نمادهای به‌کار رفته در شکل ۴-۷
۹۲	جدول ۳-۴ تلفات کلیدزنی
۹۳	جدول ۴-۴ جمع‌بندی تلفات هدایت و کلیدزنی سخت
۹۴	جدول ۵-۴ مقادیر عددی نمونه
۹۵	جدول ۶-۴ پارامترهای نمونه آزمایشگاهی
۹۵	جدول ۷-۴ عناصر به‌کار رفته در مدل آزمایشگاهی

### جداول فصل پنجم

۱۰۲	جدول ۱-۵ حالت‌های ممکن کلیدزنی
۱۱۰	جدول ۲-۵ پارامترهای مدار آزمایشگاهی
۱۱۱	جدول ۳-۵ پارامترهای مدار در حال کار

### جداول فصل ششم

۱۱۸	جدول ۱-۶ مقادیر طراحی
۱۲۱	جدول ۲-۶ پارامترهای طرف ورودی با توان‌های مختلف خروجی
۱۲۱	جدول ۳-۶ مقادیر اندازه‌گیری شده

Automatic voltage regulator	AVR
Distributed generation	DG
Digital signal processing	DSP
Electro magnetic interference	EMI
Flexible ac transition systems	FACTS
Full-bridge active rectifier	FBAR
Full bridge dc link inverter	FBDCI
High frequency isolating transformer	HFIT
High-voltage press-pack IGBT	HV-PPI
Isolated gate controlled thyristor	IGCT
Intelligent universal transformer	IUT
Multi bi-directional ports power electronic transformer	MBP-PET
Phase locked loop	PLL
Phase shift modulation	PSM
Power electronic transformer	PET
Power factor compensation	PFC
Proportional integral derivative	PID
Pulse width modulation	PWM
Single-input multi-output high-frequency isolating transformer	SMHIT
Static var compensator	SVC
Uninterrupted power supply	UPS
Z-Source Converter	ZSC
Zero voltage switching	ZVS



# فصل اول

## مطالعات اولیه و ساختارهای اساسی ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت

### ۱-۱ مقدمه

ترانسفورماتورها در سیستم‌های تبدیل انرژی الکتریکی نقش مهمی به عهده داشته و از اساسی‌ترین ادوات سیستم‌های قدرت محسوب می‌شوند. این ادوات وظایف متعددی از جمله تبدیل سطوح ولتاژ، ایزوله‌سازی گالوانیکی<sup>۱</sup>، تنظیم ولتاژ و برخی موارد دیگر را به عهده دارند. مقبولیت و استفاده گسترده از ترانسفورماتورها در اکثر سیستم‌های تبدیل انرژی الکتریکی، به دلیل این است که دارای ساختار ساده، قابلیت اطمینان، پایداری و راندمان بالا می‌باشند. در کنار این مزایا، مواردی از قبیل حجم زیاد هسته آهنی و سیم‌پیچی‌های مسی استفاده شده در ساختمان ترانسفورماتورها، آن‌ها را تبدیل به یکی از ادوات سنگین و حجیم کرده است. برخی دیگر از مسائل موجود در ترانسفورماتورها را می‌توان به شرح زیر بیان کرد:

- ضعف در تنظیم افت ولتاژ،
- حساسیت به هارمونیک‌ها،
- ایجاد نویز صوتی.

همچنین ترانسفورماتورها کنترل‌پذیر نبوده و قادر به رفع بسیاری از مسایل کیفیت توان نیستند. موارد زیر نمونه‌هایی از معایب ترانسفورماتورها می‌باشند:

- عدم توانایی در حذف هارمونیک‌های ولتاژ و جریان،
- عدم توانایی در اصلاح ضریب توان،
- عدم قابلیت پاسخ به تغییرات دینامیکی سریع.

در سالیان اخیر و با پیشرفت قابل توجه در تکنولوژی ساخت کلیدهای نیمه‌هادی، اندیشه جایگزینی ترانسفورماتورها با ادوات الکترونیک قدرت، به‌منظور کاهش حجم، وزن و افزایش کنترل‌پذیری و افزایش قابلیت‌های آن‌ها ارائه شده است. بنابراین به جای ترانسفورماتورهای حجیم قدیمی که نقش چندانی در بهبود مشکلات کیفیت توان یک سیستم تبدیل انرژی الکتریکی نداشتند، ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت (PET)<sup>۲</sup> پا به عرصه وجود گذاشتند. همانند جانشینی ادوات FACTS<sup>۳</sup> به‌عنوان کندانسورهای سنکرون و بانک‌های خازنی، PETها نیز قادرند جایگزینی مناسب برای ادوات الکترومکانیکی سیستم‌های تبدیل انرژی الکتریکی مانند ترانسفورماتورها شوند. با این دیدگاه در دهه‌های اخیر PETها مورد توجه بیش‌تری قرار گرفته‌اند. از دیدگاه تاریخی PETها از دهه ۸۰ میلادی به‌طور جدی مطرح شده‌اند. هدف اولیه از مطرح کردن PETها، استفاده از مدارات الکترونیک قدرت با حجم و وزن کم‌تر به جای ترانسفورماتورهای معمولی بوده است. با گذشت زمان بررسی PETها نشان داد که آن‌ها می‌توانند قابلیت انجام وظایفی از جمله رفع

<sup>1</sup> Galvanic isolation

<sup>2</sup> Power electronic transformer

<sup>3</sup> Flexible ac transition systems

مشکلات کیفیت توان را نیز داشته باشند. بررسی تحقیقات انجام شده بیانگر ارزشمند بودن تئوری PET به عنوان جانشینی مناسب در هر سیستم تبدیل انرژی الکتریکی می‌باشد. هرچند که ساخت PETها حتی در حد نمونه آزمایشگاهی چندان مورد توجه قرار نگرفته، ولی امید آن می‌رود که با گذشت زمان و با پیشرفت سریع تکنولوژی کلیدهای پرقدرت، چنین هدفی محقق شده و در آینده به صورت گسترده‌تری در تمامی سیستم‌های تبدیل انرژی، حتی با توان‌های بالا، نیز استفاده شوند. همان‌طور که ذکر گردید در سال‌های اخیر هدف‌های اولیه استفاده از PETها که به‌مواردی مانند تنظیم ولتاژ و کاهش ابعاد محدود می‌شد، به‌موارد افزون‌تری از جمله اصلاح ضریب قدرت، تبدیل فرکانس و سایر موارد مربوط به کیفیت توان، افزایش یافته است. در این فصل، به‌همراه مروری بر پیشینه پژوهشی، ساختارهای عمده‌ای که تاکنون مطرح شده‌اند به‌همراه مزایا و معایب بررسی خواهند شد.

## ۲-۱ مروری بر تاریخچه ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت

ترانسفورماتورها بیش از یک قرن است که در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. به‌طور عمده، ترانسفورماتورها از هسته‌های آهنی و سیم‌پیچ‌های مسی ساخته می‌شوند که در آن‌ها از روغن‌های خاص برای ایجاد محیط عایقی و نیز انتقال حرارت استفاده می‌شود. در سال‌های اخیر با توجه به پیشرفت قابل توجه در تکنولوژی ساخت کلیدهای نیمه‌هادی، ایده استفاده از این قطعات در ترانسفورماتورها نیز مطرح شد. این ایده، اولین بار در سال ۱۹۷۰ توسط McMurray با ثبت اختراعی با عنوان "مدارهای مبدل قدرت با لینک فرکانس بالا"<sup>۱</sup> ارائه شد. در این مدار برای تبدیل شکل موجی با فرکانس پایین به شکل موج با فرکانس بالا از دو مدار سیکلوکانورتر<sup>۲</sup> با قابلیت کلیدزنی فرکانس بالا به‌همراه یک ترانسفورماتور فرکانس بالا استفاده شده بود. از مزایای این روش پیشنهادی می‌توان به کاهش حجم و وزن و همچنین قابلیت تنظیم اتوماتیک ولتاژ خروجی اشاره کرد [۱] و [۲]. به‌دلیل این‌که قطعات نیمه‌هادی‌ها در آن زمان (سال ۱۹۷۰) دارای مقادیر نامی بسیار پائینی بودند برای مدت نسبتاً طولانی پیشرفت قابل توجهی در این زمینه به وجود نیامد. با پیشرفت در تکنولوژی ساخت نیمه‌هادی‌های با قدرت بالا، دو باره در سال ۱۹۸۰ ایده استفاده از "ترانسفورماتورهای حالت جامد"<sup>۳</sup> پیشنهاد شد که سابقه آن در [۳] بررسی شده است. در این دوران روش‌هایی بر اساس ساختار مبدل باک<sup>۴</sup>، جهت تولید یک ترانسفورماتور کاهنده استفاده شده بود. در این روش، کلیدهای استفاده شده در مبدل نه تنها باید دارای قدرت تحمل سطح ولتاژ بالای ورودی را داشته باشند بلکه باید بتوانند جریان بالای طرف خروجی را نیز تحمل کنند که از معایب عمده این روش می‌باشد. به دلیل قیمت بالای کلیدهای قدرت و مشکلات ساخت مبدل، این ایده چندان مورد توجه قرار نگرفت. در دهه ۸۰ میلادی و اوایل دهه ۹۰ چند مقاله در مورد تنظیم کننده‌های ac ارائه گردید. به‌عنوان نمونه در سال ۱۹۹۱ ساختار جدیدی از یک ترانسفورماتور الکترونیکی برای تنظیم ولتاژ ac ارائه شد که در آن از دو کلید دوطرفه استفاده شده بود [۴]. در سال ۱۹۹۲ ایده‌های مبدل قدرت تشدیدی برای ترانسفورماتورهای الکترونیکی نیز مطرح گردید [۵]. در سال ۱۹۹۵ ایده‌ای با قابلیت جبران افت ولتاژ موجود در سیستم داخلی مبدل، با عنوان "ترانسفورماتورهای حالت جامد مجهز به سیستم تنظیم کننده خودکار ولتاژ"<sup>۵</sup> مطرح شد. در سال ۱۹۹۶ مفاهیم "ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت" توسط Harada با عنوان "ترانسفورماتور هوشمند"<sup>۶</sup> ارائه شد [۶]. در سال ۱۹۹۷ ایده استفاده از ترانسفورماتورهای مبتنی بر الکترونیک قدرت در سیستم‌های توزیع، با استفاده از دو سیکلوکانورتر ac به ac با "کلیدهای دوطرفه"<sup>۷</sup> مطالعه گردید [۷] و در ادامه، شکل نسبتاً بهبود یافته‌ای از آن در سال ۱۹۹۹ ارائه شد [۸]. ساختارهای دیگری نیز توسط سایر محققین ارائه شده است

<sup>1</sup> Power converter circuits having a high-frequency link

<sup>2</sup> Cyclo-converter

<sup>3</sup> Solid state transformer

<sup>4</sup> Buck

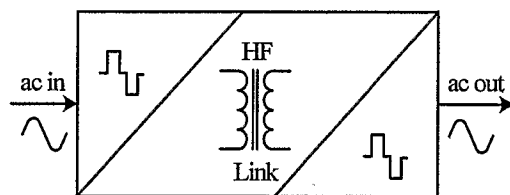
<sup>5</sup> Automatic voltage regulator

<sup>6</sup> Intelligent transformer

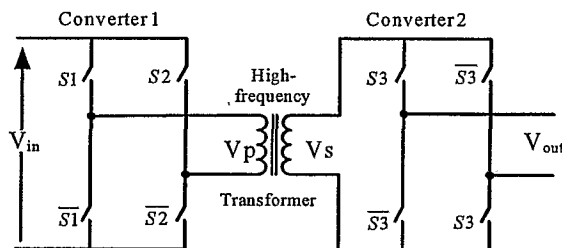
<sup>7</sup> Bi-directional

[۹] و [۱۰]. در سال ۲۰۰۰ نمونه یک ترانسفورماتور آزمایشگاهی مبتنی بر الکترونیک قدرت با مشخصات 240V/120V و 7.5kW ساخته شد [۱۱]. اکثر PETهای پیشنهاد شده در کارهای تحقیقاتی فوق به صورت تک فاز بوده‌اند. در سال‌های اخیر چند مقاله در مورد PETهای سه فاز ارائه شده است [۱۲] که در تمامی ساختارهای پیشنهادی از لینک‌های متعدد dc و ac استفاده شده است. در سال ۲۰۰۲ ایده استفاده از مبدل‌های ماتریسی در ساختار PETها مطرح شد [۱۳] و [۱۴]. برخی از مزایای مبدل‌های ماتریسی، قابلیت حذف عناصر ذخیره‌کننده انرژی، امکان جاری شدن دوطرفه توان و کنترل ضریب توان ورودی می‌باشند. به نظر می‌رسد که در آینده مبدل‌های ماتریسی جایگزین مناسبی برای مبدل‌های کلاسیک استفاده شده در ساختار PETها شوند [۱۵]. در عین حال چنین ساختارهایی قابل توسعه با زیر مدارهای مشابه هم و یا مدولار<sup>۱</sup> نبوده و امکان سری شدن آنها برای تحمل ولتاژهای بالا وجود ندارد، لذا ساختارهای مدولار و غیرمستقیم PETها نیز جزو آخرین مطالعات انجام شده اخیر می‌باشند [۱۶]. در حالت کلی با توجه به پیشرفت سریع ادوات نیمه هادی و تکنولوژی کلیدهای پر قدرت، پیش‌بینی می‌شود که در آینده ترانسفورماتورهای الکترونیک قدرت به‌عنوان مفهوم جدیدی از مبدل‌های الکترونیک قدرت مطرح شوند [۱۷].

ساختار کلی PETها در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است می‌توان با استفاده از دو مبدل و یک ترانسفورماتور فرکانس بالا، عمل تبدیل ولتاژ را انجام داد. شکل (۱-۱) یکی از ساختارهای کلی PET، بدون لینک dc را نشان می‌دهد که از دو سیکلوکانورتر و لینک ac بین آن دو تشکیل شده است. این نوع ساختارها به اشکال مختلف مطالعه شده‌اند و اغلب آنها از نوع مبدل‌های ac-ac از نوع ولتاژی بوده و بر اساس لینک فرکانس بالای ایزوله‌کننده<sup>۲</sup> ساخته شده‌اند. به‌طور کلی می‌توان گفت که ساختار ترانسفورماتور الکترونیک بر پایه مبدل نوع ولتاژ با لینک فرکانس بالای ایزوله‌کننده استوار است که روش کار آنها بر اساس انواع مدولاسیون از قبیل مدولاسیون پهنای پالس<sup>۳</sup> می‌باشد. مبدل‌های استفاده شده جهت تبدیل فرکانس می‌توانند انواع مختلفی داشته باشند. به عنوان مثال مطابق شکل (۲-۱) می‌توان از پل‌های H با کلیدهای دوطرفه برای ساخت مبدل‌ها بهره گرفت که به خصوص در مبدل‌های چندسطحه با ورودی و خروجی ac به‌طور وسیعی استفاده می‌شود [۱۸].



شکل ۱-۱: ساختار کلی PET



شکل ۲-۱: نمونه‌ای از PET با استفاده از ساختار H

<sup>1</sup> Modular

<sup>2</sup> High frequency isolating link

<sup>3</sup> Pulse width modulation

برخی از مزایای این ساختار شامل ایجاد ایزولاسیون الکتریکی، تبادل دوطرفه توان، قابلیت ایجاد کلیدزنی نرم<sup>۱</sup> به همراه استفاده از مدولاسیون PWM و عدم وجود آلودگی صوتی می‌باشند.

### ۳-۱ دسته بندی انواع PETها

در این بخش با بیان تعریفی برای دسته‌بندی انواع PETها، مطالعه‌ای اجمالی از کارهای قبلی انجام می‌شود. به‌طور کلی PETها قابل تفکیک به دو گروه عمده می‌باشند. گروه اول، PETهای غیرمستقیم که دارای عنصر ذخیره‌کننده انرژی و لینک dc بوده و گروه دوم، PETهای مستقیم که ساختارهایی بدون استفاده از عنصر ذخیره‌کننده انرژی و لینک dc می‌باشند [۱۹]. گروه اول خود به دو زیر مجموعه قابل تقسیم است که دسته اول PETهای مدولار قابل گسترش هستند که می‌توانند با اتصال سری و موازی مدول‌ها برای توان‌های مختلف طراحی شوند و دسته دوم، انواع غیرمدولار که قابل گسترش نبوده و تنها برای یک رنج ولتاژی و جریانی خاص قابل بهره‌برداری هستند. در انواع مستقیم PET عمل تبدیل انرژی بدون استفاده از عناصر ذخیره‌کننده انرژی، مانند خازن‌ها، صورت می‌گیرد و واسطه‌ای به غیر از ترانسفورماتور ایزوله‌کننده فرکانس بالا، بین طرف‌های ورودی و خروجی وجود نخواهد داشت. در انواع غیرمستقیم ممکن است بسته به ساختار استفاده شده، یک یا چند واسطه با قابلیت ذخیره‌کنندگی انرژی، استفاده شده باشد. در این صورت نیاز به طبقه یک‌سوساز نیز وجود خواهد داشت. از مزایای PETهای غیرمستقیم نسبت به انواع مستقیم، می‌توان به قابلیت انعطاف‌پذیری بیش‌تر آن‌ها، در جهت بهبود کیفیت توان مانند اصلاح ضریب قدرت و کاهش هارمونیک‌ها اشاره کرد. اما به دلیل ساختار پیچیده‌تر PETهای غیرمستقیم، کنترل دوطرفه انرژی دشوارتر شده و راندمان پایین‌تری حاصل خواهد شد. همچنین بسته به تعداد فازهای ورودی و خروجی، PETها می‌توانند حالت تک‌فاز و یا سه‌فاز داشته باشند. در ادامه این بخش، انواع PETها با در نظر گرفتن تعداد فازهای ورودی و خروجی بررسی شده‌اند.

### ۱-۳-۱ PETهای تک‌فاز

عملکرد اساسی PETهای تک‌فاز با نوع سه‌فاز یکسان است. نوع تک‌فاز ساختار ساده‌تری داشته و تعداد کلیدهای نیمه‌هادی کم‌تری لازم دارد. از طرفی طراحی و کنترل نوع تک‌فاز ساده‌تر بوده و معمولاً برای سطوح قدرت پایین، چه از نظر ولتاژ و چه از نظر جریان‌های ورودی و خروجی، در نظر گرفته می‌شود.

### ۱-۱-۳-۱ PET تک‌فاز با استفاده از ترانسفورماتور با سر وسط

شکل (۳-۱) یک نمونه از PETهای تک‌فاز را با استفاده از ترانسفورماتور با سر وسط نشان می‌دهد. در این ساختار تعداد کلیدهای دوطرفه نسبت به ساختارهای اولیه PETهای تک‌فاز (شکل (۲-۱)) به نصف کاهش می‌یابد. کلیدهای به کار رفته در شکل (۳-۱) از نوع دوطرفه بوده و ترتیب اعمال فرمان‌های کنترل کلیدها در شکل (۴-۱) نشان داده شده است. اگر فرکانس کلیدزنی خیلی بالاتر از فرکانس ولتاژ ورودی و نیز فرکانس قطع فیلتر پایین‌گذر خروجی مدار (متشکل از  $L_o$  و  $C_o$ ) باشد، رفتار مدار مشابه نوع مبدل dc بوده و بهره ولتاژ مدار برای دامنه مولفه اصلی خروجی نسبت به ولتاژ ورودی با استفاده از رابطه (۱-۱) حاصل می‌شود:

$$A_v = \frac{1-2D}{n \left( 1 + \frac{r}{R_o} \right)} \quad (1-1)$$

که در آن  $D$  دوره‌کاری<sup>۲</sup>،  $n$  نسبت دور ترانسفورماتور،  $r$  مقاومت معادل داخلی مبدل و  $R_o$  مقاومت بار می‌باشند. شکل (۵-۱)، شکل موج‌های ولتاژ خروجی مدار را قبل و بعد از طبقه فیلتر برای نسبت تبدیل حدود  $0/3$  نشان می‌دهد. از

<sup>1</sup> Soft switching

<sup>2</sup> Duty cycle