ترانسفورماتور حالت جامد

جاوید خراسانی/ موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران

مرتضی شفیعی / موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران

حامد ملااحمدیان/ موسسه آموزش عالی خراسان، مشهد، ایران

محمد حسینی ابرده/ دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود، شاهرود، ایران

مهدی علومی/ شرکت برق منطقه‌ای خراسان

چکیده

با توسعه شبکه‌های برق و ورود مصرف‌کنندگان و تولیدکنندگان متنوع، لزوم استفاده از مبدل‌های توان بالا در کاربردهای مختلف، روز به‌روز بیشتر می‌گردد. مبدل‌های نسل جدید می‌بایست توانایی کار با انواع توان اعم از جریان مستقیم و متناوب را دارا باشند. منابع تولید پراکنده، انرژی‌های تجدیدپذیر و حمل و نقل ریلی نمونه‌ای از این کاربردها می‌باشند. یکی از مبدل‌های توان پیشنهادی جهت رفع چالش‌های جدید شبکه قدرت، ترانس حالت جامد است. این ترانس‌ها با استفاده از ادوات نیمه‌هادی قدرت و ترانس فرکانس بالا قابلیت تبدیل سطح ولتاژ و کنترل توان را دارا می‌باشند. کاهش حجم و وزن، رگولاسیون آنی و لحظه‌ای ولتاژ، جداسازی خطا، اصلاح ضریب توان، امکان کنترل پخش توان‌های اکتیو و راکتیو، کنترل جریان خطا در سمت فشار قوی و فشار ضعیف، قابلیت بالای رگولاسیون ولتاژ، امکان تفاوت فرکانس خروجی با ورودی و تعدد فازهای خروجی، امکان داشتن ورودی یا خروجی DC و رفع مشکل عدم توازن بار از جمله مزایای ترانسفورماتورهای حالت جامد بر ترانسفورماتورهای متداول است. در این مقاله، ترانسفورماتور حالت جامد و کاربردهای عمده آن به‌عنوان یک فناوری جدید در شبکه قدرت معرفی و مزایا و محدودیت‌های این فناوری بررسی و تحلیل می‌گردند.

کلمات کلیدی: ترانسفورماتور حالت جامد، ترانسفورماتور الکترونیکی، کیفیت توان، روتر انرژی.

۱- مقدمه

ترانسفورماتورهای سنتی فرکانس پایین از زمان معرفی سیستم‌های AC برای تبدیل ولتاژ و ایزوله‌سازی مورد استفاده قرار می‌گرفته است. با وجود استفاده فراگیر، این تجهیزات دارای معایبی هستند:

- اندازه بزرگ و وزن زیاد دارند.
- روغن ترانسفورماتور برای محیط‌زیست مضر است.
- به دلیل اشباع هسته، هارمونیک تولید می‌کنند، که نتیجه آن جریان هجومی بزرگ است.
- تغییرات ناخواسته در طرف ورودی، مانند افت ولتاژ، شکل موج خروجی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.
- هارمونیک‌های جریان خروجی بر روی ورودی تاثیر دارند. بسته به نوع اتصال ترانسفورماتور، هارمونیک می‌تواند در شبکه منتشر شود و منجر به افزایش تلفات در سیم‌پیچ اولیه گردد.
- در متوسط بار، تلفات بالا دارند. ترانسفورماتورها معمولا طوری طراحی می‌شوند که در نزدیکی بار کامل بالاترین راندمان را داشته باشند. این در حالی است که ترانسفورماتورهای توزیع دارای متوسط بار نامی در حدود ۳۰ درصد می‌باشند.
- تمام ترانسفورماتورهای فرکانس پایین دارای مشکل عدم تنظیم ولتاژ کامل هستند. ترانسفورماتورهای توزیع معمولا کوچک هستند و تنظیم ولتاژ آن‌ها خیلی خوب نیست [۱].
- تلفات بی‌باری دارند.
- به آفست DC بارهای نامتقارن حساس می‌باشند.
- حفاظت اضافه بار ندارند.

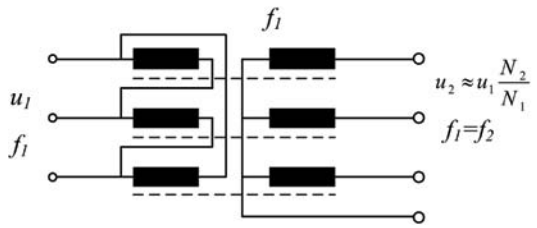
• احتمال آتش‌سوزی در آنها وجود دارد [۲].

از جمله مزایای ترانسفورماتورهای سنتی نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

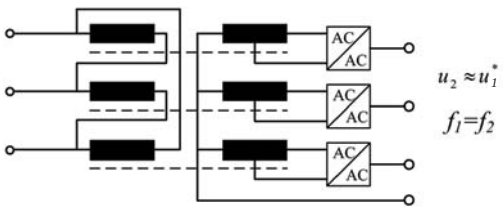
• نسبتا ارزان هستند.
• بسیار مقاوم و قابل اطمینان می‌باشند.
• راندمان بسیار بالا در حدود ۹۸/۵% تا ۹۹/۵% دارند [۳].

در سال‌های اخیر با توجه به افزایش استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر و سایر انواع تولیدات پراکنده، پیچیدگی شبکه‌های الکتریکی افزایش یافته است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها وجود منابع متعدد با خروجی در سطوح مختلف ولتاژ DC و یا AC با فرکانس‌های متنوع می‌باشد. در برخورد با این پیچیدگی، استفاده از تکنولوژی‌های جدید در راستای کنترل و بهبود قابلیت اطمینان شبکه‌ها اجتناب‌ناپذیر است. بر همین اساس و مطابق شکل ۱، چهار ساختار برای ترانسفورماتورها پیشنهاد شده است.

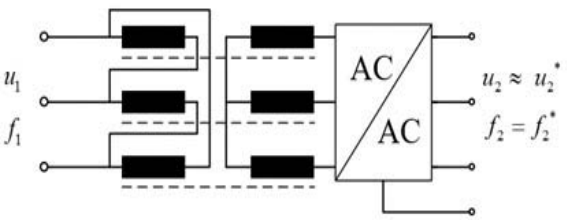
a) ترانسفورماتور غیرفعال یا ترانسفورماتور فرکانس پایین[۱] (LFT)
b) ترانسفورماتور با جبران‌سازی ولتاژ سری
c) ترانسفورماتور برش گر AC سری: از یک برش گر AC برای تغییر فرکانس ولتاژ ثانویه استفاده شده است.
d) ترانسفورماتور حالت جامد با طبقه فعال ورودی و خروجی: در این ساختار، اولیه و ثانویه یک ترانسفورماتور فرکانس بالا[۲] (HFT) به دو مبدل الکترونیک قدرت فعال متصل است. فرکانس ثانویه کاملا قابل کنترل می‌باشد. فرکانس ولتاژ ثانویه به‌صورت مستقل از فرکانس اولیه کنترل می‌شود، اما دامنه ولتاژ ثانویه وابسته به دامنه ولتاژ ورودی (اولیه) است.



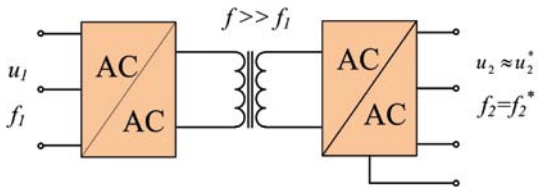
(a)



(b)



(c)



(d)

شکل ۱: انواع ساختارهای ترانسفورماتورها (a) کاملا غیرفعال، (b) جبران‌ساز ولتاژ سری، (c) برش‌گر AC سری و (d) طبقه فعال ورودی و خروجی [۴].

ساختار (d) معمولا با نام ترانسفورماتور حالت جامد[۳] (SST) خوانده می‌شد. این تجهیز علاوه بر SST با نام‌های زیر نیز معرفی شده است [۴]:

• ترانسفورماتور الکترونیکی: در سال ۱۹۶۸ به‌وسیله McMurray
• ترانسفورماتور حالت جامد: در سال ۱۹۸۰ توسط Brooks
• ترانسفورماتور یونیورسال هوشمند: به‌وسیله شرکت EPRI[۴]
• ترانسفورماتور الکترونیک قدرت: توسط شرکت ABB
• مرکز کنترل انرژی: به‌وسیله Borojevic
• روتر انرژی: توسط Wang

۲- کارکردها، فواید و محدودیت‌های SST

ترانسفورماتور حالت جامد، یک تجهیز گران‌قیمت با توانایی‌های عملکردی گسترده است. ترانسفورماتور SST کنترل مسیر شارش توان الکتریکی و اتصال انعطاف‌پذیر منابع تولید پراکنده را به شبکه امکان‌پذیر می‌سازد. همچنین پخش توان که در بهره‌برداری امن و پایدار شبکه حایز اهمیت است به‌وسیله این تجهیز قابل کنترل می‌باشد. البته این قابلیت‌ها طبیعتا با هزینه و پیچیدگی بیشتری نسبت به سیستم‌های متداول همراه خواهد بود. به‌طور کلی می‌توان گفت ترانسفورماتور حالت جامد دارای کارکردها و مزایای زیر است:

• کنترل سطح ولتاژ
• کاهش حجم و وزن
• رگولاسیون آنی و لحظه‌ای ولتاژ
• جداسازی خطا
• اصلاح ضریب توان
• کنترل پخش توان‌های اکتیو و راکتیو
• کنترل جریان خطا در سمت فشار قوی و فشار ضعیف
• قابلیت بالای رگولاسیون ولتاژ
• امکان تفاوت فرکانس خروجی با ورودی و تعدد فازهای خروجی
• امکان داشتن ورودی یا خروجی DC
• رفع مشکلات افت ولتاژ (در صورت دارا بودن ذخیره‌ساز)
• رفع مشکل عدم توازن بار و حل مشکل جریان سیم نول و تلفات ناشی از این مساله و همچنین حذف یا کاهش پدیده عدم تعادل در شبکه توزیع

برخی محدودیت‌های ترانسفورماتور حالت جامد عبارتند از:

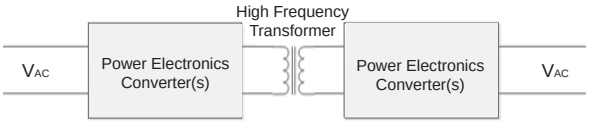
• طراحی پیچیده
• هزینه بالای پیاده‌سازی
• عدم اطمینان در مورد بهره‌وری مناسب در مقایسه با ترانسفورماتور فرکانس پایین سنتی

در سال‌های اخیر هزینه تجهیزات الکترونیک قدرت کاهش یافته و قطعات با قابلیت اطمینان بالاتر، تلفات کم، توان بالا و فرکانس بالاتر تولید شده‌اند. کاهش قیمت‌ها و این حقیقت که SST می‌تواند جایگزین برخی تجهیزات شبکه از قبیل ترانسفورماتورهای متداول

شود، مقبولیت بالقوه استفاده از SST را از نظر اقتصادی افزایش داده است [۱].

۳- مفاهیم اساسی SST

ترانسفورماتورهای فرکانس خط (LFT) مدت‌هاست مورد استفاده قرار گرفته‌اند. استفاده گسترده از آن‌ها باعث ارزانی، کارایی بالا، تکنولوژی رشد یافته و قابلیت اطمینان بالای آن‌ها شده و هرگونه بهبود در کارایی آن‌ها نیازمند هزینه زیاد است [۴]. ترانسفورماتور SST که مطابق شکل ۲ از تجهیزات الکترونیک قدرت و یک ترانسفورماتور فرکانس بالا برای تغییر سطح ولتاژ و ایزولاسیون استفاده می‌کند، جایگزینی برای LFT می‌باشد. ذکر این نکته بسیار مهم است که SST دقیقا جایگزین LFT نمی‌شود؛ بلکه SST یک وسیله چندکاره است که تنها یکی از کارایی‌های آن تبدیل یک سطح ولتاژ AC به سطحی دیگر است. سایر کارکردها و مزایای SST عبارتند از [۵] و [۶]:



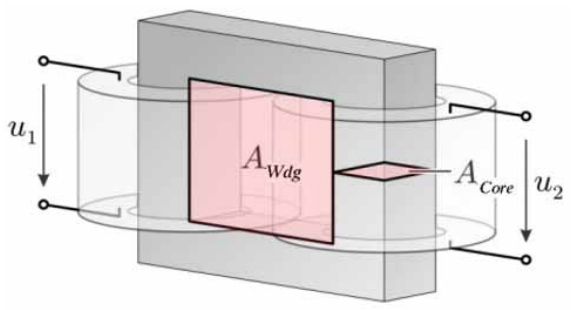
شکل۲: ساختار کلی SST [۱۹]

- کنترل‌پذیری بالا با توجه به استفاده از ادوات الکترونیک قدرت
- ضریب توان واحد: از آنجایی که طبقه AC/DC می‌تواند به‌عنوان یک تصحیح‌کننده ضریب توان عمل کند، SST ضریب توان واحد خواهد داشت. در نتیجه، توان اکتیوِ در دسترس تا ۲۰% افزایش می‌یابد.
- عدم تاثیرپذیری از افت ولتاژ یا اضافه ولتاژها با توجه به‌وجود لینک DC در سیستم SST
- قابلیت حفظ ولتاژ خروجی برای مدت چند سیکل در صورت قطع ورودی با توجه به دارا بودن ذخیره‌ساز خازنی
- قابلیت عملکرد به‌عنوان یک مدار شکن: هنگامی که بخش الکترونیک قدرت در SST خاموش شود، شارش الکتریسیته متوقف می‌شود و مدار قطع خواهد شد.
- قابلیت تشخیص خطا و حفاظت
- تأمین درگاه‌های AC و DC جهت استفاده و اتصال مناسب منابع تولید پراکنده و عناصر ذخیره‌ساز و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان سیستم توزیع
- فراهم کردن امکان پیاده‌سازی شبکه‌های هوشمند توزیع برق از طریق یک شبکه امن مخابراتی برای تضمین پایداری و بهره‌برداری بهینه سیستم‌های توزیع
- مدیریت ذخیره‌سازها: در هنگام گذراها، زمانی‌که توان اکتیو شبکه برای تأمین بار کافی نیست، SST فرمان تولید توان اکتیو را به یکی از منابع تولید پراکنده [۵] (DES) می‌دهد. این کار به SST کمک می‌کند که از افت ولتاژهای گذرای شبکه عبور کند. در حالت دائمی، SST به شارژ/دشارژ DES مطابق برنامه قبلی ادامه می‌دهد.
- توانایی عملکرد جزیره‌ای
- حجم و وزن کمتر با توجه به استفاده از ترانسفورماتور فرکانس بالا. حجم ترانسفورماتور با فرکانس آن نسبت عکس دارد.

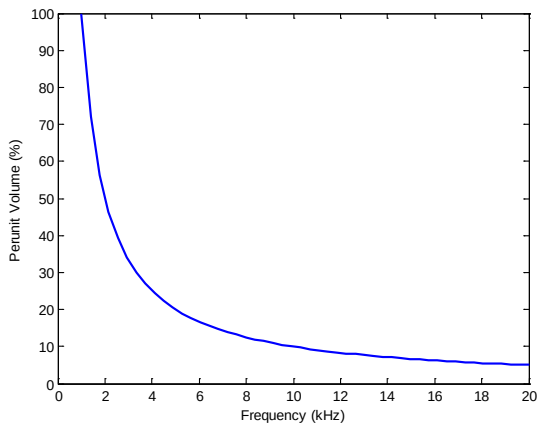
به‌منظور بررسی تاثیر فرکانس بر حجم ترانسفورماتور، شکل ۳ در نظر گرفته شده است. در این شکل داریم:

$$A_{Core}A_{Wdg} = \frac{\sqrt{2}}{\pi}\frac{P_t}{k_W J_{rms}\hat{B}_{\max} f} \qquad (1)$$

که در این رابطه P_t توان نامی، k_W ضریب استفاده از پنجره، B_{max} دامنه چگالی شار، J_{rms} چگالی جریان پنجره و f فرکانس است. برای یک ترانسفورماتور ۲۵ kW، رابطه فرکانس کار با حجم در شکل ۴ نمایش داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، با افزایش فرکانس تا مرز ۲۰kHz می‌توان حجم را به کمتر از ۱۰% نسبت به فرکانس ۱kHz کاهش داد.



شکل۳: ساختار کلی هسته ترانسفورماتور



شکل۴: حجم هسته در فرکانس‌های کاری مختلف نسبت به فرکانس ۱ kHz

۴- برخی کاربردهای عمومی SST

همان‌طور که پیش از این گفته شد، SST نسبت به LFT دارای کارکردها و قابلیت‌های بیشتری است. بدین ترتیب کاربرد SST در برخی زمینه‌ها بسیار جذاب‌تر از LFT می‌باشد. چند نمونه از این کاربردها عبارتند از [۹]-[۷]:

۴-۱- لوکوموتیوها و سایر سیستم‌های کششی

ترانسفورماتورهای مورد استفاده در لوکوموتیوهای کنونی در فرکانس ۱۶٫۷ هرتز کار می‌کنند و حدود ۱۵% از کل وزن لوکوموتیو را تشکیل می‌دهند. استفاده از SST می‌تواند کاهش قابل توجهی در وزن لوکوموتیو ایجاد کند. همچنین، SST می‌تواند کارایی را افزایش داده، هارمونیک و آلودگی صوتی را کاهش دهد [۱۰].

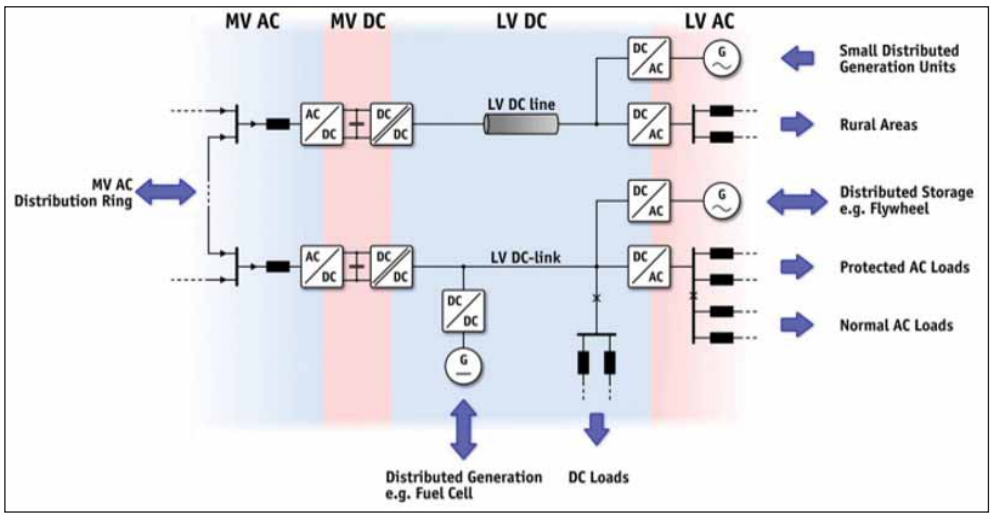
۴-۲- تولید انرژی در دریا

تولید انرژی در دریا، خواه از باد، جذر و مد یا هر منبع دیگری، در صورت استفاده از SST از مزیت کاهش حجم و وزن آن سود خواهد برد. این کاهش، تأثیر مستقیم بر کاهش ابعاد سکوها دارد. امکان

تامین ضریب توان واحد توسط SST، باعث افزایش ظرفیت و کارایی خط انتقال می‌شود که این خود مزیت دیگری در استفاده از SST در این سیستم‌ها می‌باشد.

۴-۳- شبکه‌های هوشمند

در سیستم‌های قدرت آتی، استفاده از تولید تجدیدپذیر افزایش خواهد یافت و نیاز به روشی متفاوت از روش‌های موجود در مدیریت انرژی را آشکار می‌سازد. به‌منظور مدیریت سریع و کارای تغییرات و اغتشاشات ایجاد شده توسط بارها و منابع، SST را می‌توان در جهت تنظیم پویای توزیع انرژی در شبکه مورد استفاده قرار داد. کارکرد SST در این حالت مشابه یک روتر مخابراتی است با این تفاوت که به‌جای پردازش داده، شارش توان را کنترل می‌کند (شکل۶). به همین دلیل، گاه به SST، روتر انرژی هم گفته می‌شود [۱۱].



شکل۵: شبکه‌های هوشمند [۴]

۵- کاربردهای SST در شبکه قدرت [۱۲]

شکل ۵ کاربردهای SST را در شبکه قدرت نشان می‌دهد. این کاربردها عبارتند از:

۵-۱- اتصال بین منبع و بار یا شبکه توزیع

تامین ولتاژ و فرکانس ثابت در خروجی SST در صورت تغییرات ورودی، مهم‌ترین وظیفه SST در این حالت است. همچنین ایجاد ضریب توان واحد که باعث استفاده بهتر از خطوط انتقال می‌شود و نیز بهبود و جبران نوسانات سیستم در شرایط گذرا از دیگر فواید SST در این کاربرد است.

۵-۲- اتصال بین دو شبکه توزیع

یکی از ویژگی‌های مثبت SST عدم نیاز به یکسان بودن ولتاژ و فرکانس و یا همزمانی دو شبکه متصل به آن است. ترانسفورماتور SST را می‌توان برای کنترل توان اکتیو انتقالی بین دو شبکه به‌کار گرفت. یکی از کاربردهای خاص این اتصال در بازار برق است. زمانی که انرژی در شبکه ۲ ارزان‌تر از شبکه ۱ باشد، بهره‌بردار شبکه ۱ می‌تواند تولید خود را کاهش دهد و از شبکه ۲ برق را خریداری نماید [۱۳].

۵-۳- اتصال بین شبکه‌های فشار متوسط و فشار ضعیف

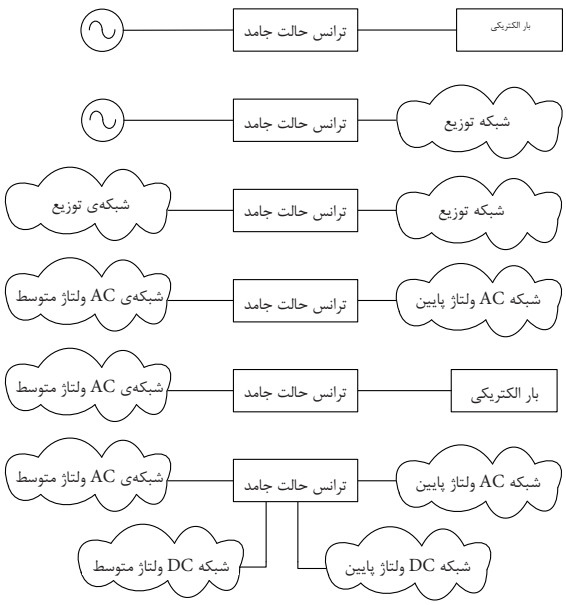
در مقایسه با LFT، SST می‌تواند با دقت خوبی شارش توان انتقالی از شبکه فشار متوسط به شبکه فشار ضعیف را کنترل نماید. این قابلیت، به خصوص در زمانی که شبکه LV دارای منابعی از قبیل پنل‌های فتوولتاییک است می‌تواند مورد توجه خاص قرار گیرد. با هدف جلوگیری از اضافه‌بار شدن خطوط انتقالِ با ظرفیت محدود، SST می‌تواند مقدار توانی را که بین بخش‌های مختلف شبکه رد و بدل می‌شود، محدود نماید.

۵-۴- اتصال بین شبکه فشار متوسط و بارها

بارهای فشار ضعیف اغلب دارای عدم تعادل هستند و می‌توانند باعث اغتشاشات هارمونیکی در ولتاژ و نیز ایجاد عدم تقارن ولتاژ شوند. در شرایطی که عدم تعادل بار زیاد است یا حجم بارهای غیر خطی بالاست، حتی اضافه کردن سیم نول هم نمی‌تواند به‌طور کامل اغتشاش‌ها را خنثی نماید. در این شرایط، SST، با تولید ولتاژی که تاثیرپذیری اندکی از بارهای نامتعادل و غیرخطی دارد، می‌تواند به رفع این مشکل کمک نماید.

۵-۵- اتصال بین تولید پراکنده و شبکه‌های هوشمند

منابع انرژی پراکنده مانند آرایه‌های فتوولتاییک و توربین‌های باد، منابع متنوعی برای انرژی الکتریکی فراهم کرده‌اند. این منابع اغلب ولتاژها یا فرکانس‌های متغیری دارند و گاه ممکن است خروجی آن‌ها DC باشد. در حال حاضر SST قابلیت انعطاف کافی برای فراهم کردن شرایط اتصال این منابع به شبکه‌های قدرت کنونی را دارد.



شکل۶: کاربردهای SST در شبکه قدرت

۶- موانع استفاده وسیع از SST

- با وجود کاربردها و مزایای وسیع SST هنوز مشکلاتی در سر راه پذیرش عمومی آن وجود دارد. اغلب این مشکلات از نوظهور بودن این تکنولوژی نشات می‌گیرد و انتظار می‌رود که رفته‌رفته و با رشد تکنولوژی SST مرتفع شود. معایب کنونی SST در قیاس با LFT در شکل (۶) نشان داده شده است. این معایب را می‌توان در موارد زیر خلاصه نمود [۴] :
- هزینه های LFT نسبت به SST پایین‌تر است. البته این مساله به نسل اول SST بر می‌گردد و با کاهش قیمت نیمه هادی‌ها و مدارهای کنترلی، قیمت SST نیز کاهش خواهد یافت. از سوی دیگر، قیمتِ رو به افزایشِ مواد اولیه‌ای مانند مس و فریت در ساخت LFT، تاثیر مثبتی بر پذیرش SST خواهد داشت.
- طبیعت پیچیده SST، آن را به سیستمی بدل کرده که قابلیت اطمینانش نسبت به LFT چندان بالا نیست. با این حال، طراحی ماژولار SST امکان جداسازی و عبور از خطاها را فراهم می‌سازد. همچون تمام سیستم‌ها، انتظار می‌رود قابلیت اطمینان SST هم با رشد تکنولوژی افزایش یابد.

راندمان SST را به سختی می‌توان با LFT قیاس نمود. تاکنون چندان مشخص نشده است که بازدهی SST های نسل‌های بعد به چه میزان خواهد رسید. در مقالات مختلف مقادیری بین ۹۰ تا ۹۸,۱ درصد برای راندمان SST بیان شده است. راندمان LFT ها البته بیش از ۹۷,۳ % می‌باشد. اگر چه بازدهی کلی LFT از SST بیشتر است، خصوصیاتی همچون کاهش هارمونیک و ضریب توان واحد می‌تواند باعث برتری SST نسبت به LFT در عملکرد باشد. نگاه به مساله راندمان به‌صورت جزء نگر منجر به برتری ترانس سنتی می‌گردد، وگرنه داشتن یک نگاه کل نگر و سیستمی یعنی نگاه به شبکه همراه با بار و ترانس حالت جامد و محاسبه راندمان مجموعه ممکن است به نتیجه‌ای متفاوت منتهی گردد.

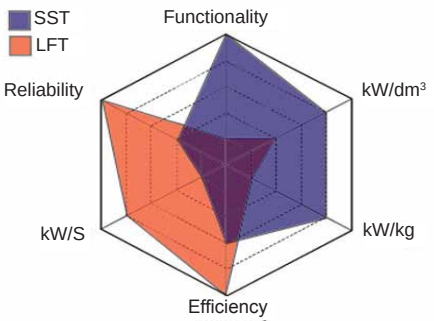


Figure 2.6: Comparison between LFT and SST[6]

شکل۷: مقایسه بین LFT و SST [۶]

با وجود این معایب، بهبود عملکرد و کارایی یک شبکه توزیع با حضور SST، صرفه اقتصادی SST را در آینده نزدیک رقم خواهد زد.

۷-بررسی نمونه‌های ساخته شده

این تکنولوژی به دلیل نو ظهور بودن دارای نمونه‌های تحقق یافته‌ی محدودی در صنعت می‌باشد. از طرفی به دلیل جذابیت این موضوع برای پژوهشگران، کارهای تحقیقاتی متعددی در حال انجام بود . نمونه‌های تحقیقاتی مختلفی تاکنون ارایه شده است. در این بخش تنها نمونه‌های تحقق یافته‌ی صنعتی و نیمه‌صنعتی بررسی می‌گردند. چند نمونه از SSTهای ساخته شده برای کاربردهای مختلف شامل موارد زیر است:

۱. در پروژه UNIFLEX یک SST با سه پورت ساخته شده است که دو پورت آن برای اتصال بین شبکه‌های ۳,۳kV و پورت سوم برای اتصال به شبکه فشار ضعیف در نظر گرفته شده است [۱۴].

۲. ABB در حال حاضر به استفاده از SST در کاربردهای حمل و نقل ریلی به جهت افزایش کارایی و چگالی توان توجه کرده است [۱۵] و [۱۶].

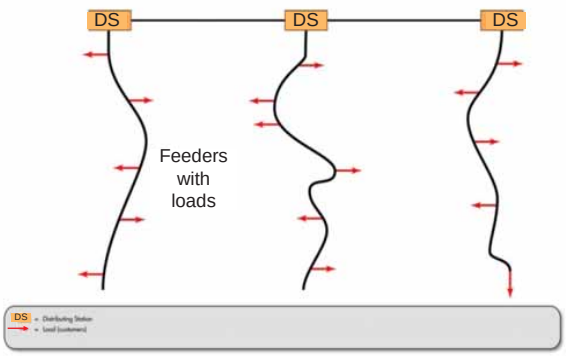
انواع ساختارهای ارایه شده برای SST با توجه به ادوات مختلف سویچینگ بکار گرفته شده در آن‌ها به‌صورت زیر است:

- استفاده از سویچ‌های SiC[۱۶]
- شرکت EPRI یک SST با عنوان ترانسفورماتور یونیورسال هوشمند[۶] ساخته و در آن بجای IGBT یا MOSFET از SGTO در یک مبدل DC-DC رزونانسی با هدف کاهش تلفات سویچینگ استفاده کرده است [۱۷] و [۱۸].

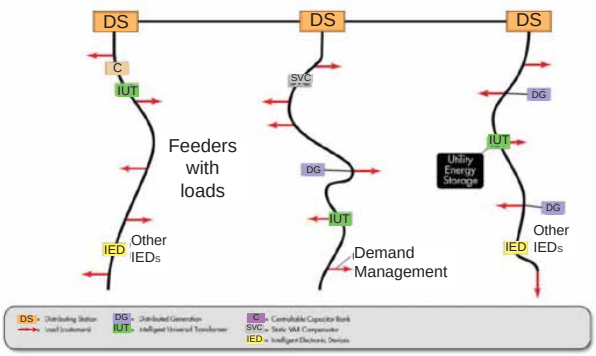
به دلیل ملاحظات شرکت‌های دارنده‌ی این تکنولوژی اطلاعات محدودی در زمینه‌ی ترانس حالت جامد در اختیار می‌باشد، در ادامه در خصوص ترانس‌های حالت جامد معرفی شده توسط EPRI و ABB توضیحاتی ارایه شده است.

۷-۱- ترانس یونیورسال هوشمند EPRI

در سال ۲۰۰۶ میلادی موسسه‌ی تحقیقات توان الکتریکی (EPRI) اقدام به معرفی ترانس یونیورسال هوشمند (IUT) نمود. جهت مشخص نمودن دلیل استفاده از IUT در شبکه‌ی توزیع برق نمودار شکل (۸) و شکل (۹) ارایه شده است. در شکل (۸) شبکه‌ی برق سنتی و در شکل (۹) شبکه‌ی برق هوشمند در حضور ادوات هوشمند از قبیل SVC، IUT[۷] و IED[۸] نشان داده شده است. با استفاده از IUTها امکان مانور و کنترل راحت‌تر شبکه فراهم می‌گردد.

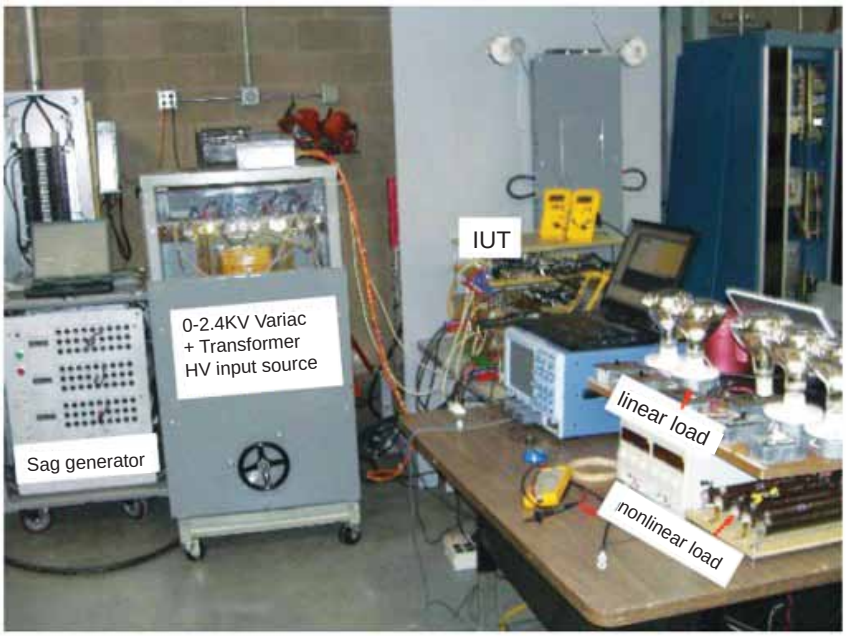


شکل۸: نمایش مفهومی شبکه توزیع برق سنتی [۱۸]



شکل۹: نمایش مفهومی شبکه توزیع برق هوشمند [۱۸]

در حال حاضر این پروژه در فاز ساخت نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار دارد. شکل (۱۰) تصویری از نمونه‌ی آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد. این نمونه دارای ساختار سه طبقه بوده و ولتاژ ورودی حداکثر ۲٫۴ کیلوولت و ولتاژ خروجی ۲۲۰ ولت می‌باشد. اطلاعات فنی بیشتری از نمونه‌ی ساخته شده منتشر نشده است. بنا بر گزارش‌های EPRI، توسعه‌ی نمونه‌ی آزمایشگاهی به نمونه‌ی صنعتی با قابلیت تحمل خطا و حفاظت، هنوز به انجام نرسیده است [۱۸].

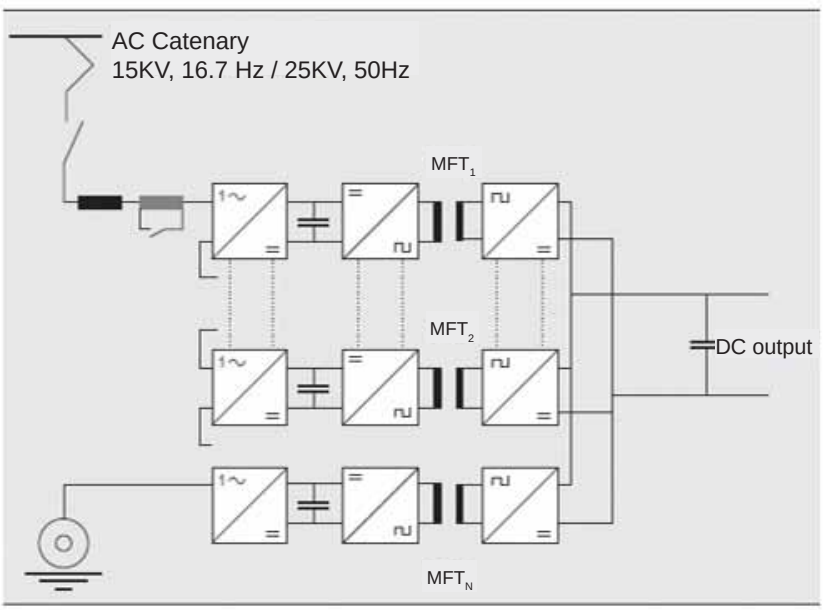


شکل ۱۰: نمونه آزمایشگاهی IUT ساخته شده توسط EPRI [۱۸]

۷-۲- ترانس الکترونیکی ویژه قطار برقی

از ترانس الکترونیکی ویژه قطار برقی یا PETT[۹] نموده است. در شکل (۱۱) ساختار بلوکی ترانس پیشنهادی نشان داده شده است. در این ساختار، برق AC ورودی پس از یکسوسازی به فرم AC فرکانس بالا تبدیل شده و از ترانس فرکانس بالا عبور می‌کند و در نهایت تبدیل به برق DC می‌شود.

به‌منظور مقایسه ترانس سنتی با ترانس فرکانس بالا در مواردی چون محدوده توان عملکردی، چگالی توان، راندمان، وزن روغن خنک‌کننده و وزن مس بکار رفته برای سیم‌پیچی، جدول (۱) ارایه شده است. همان‌طور که در این جدول مشخص است ترانس فرکانس



شکل۱۱- ساختار بلوکی ترانس پیشنهادی ABB[۱۵]

شرکت ABB با بررسی ساختار قطارهای برقی فعلی که از سال ۱۸۸۴ میلادی دارای تغییرات قابل توجهی نبوده است، اقدام به پیشنهاد استفاده بالا از چگالی توان بالاتر و حجم و وزن کمتری نسبت به ترانس سنتی برخوردار می‌باشد [۱۵].

جدول ۱: مقایسه ترانس سنتی و ترانس فرکانس بالا [۱۵]

	ترانس فرکانس متوسط		ترانس فرکانس پایین	
محدوده توان (KVA) ۷۵۱-۲۲۱۱	- ۱۰KHz	- ۵KHz	۲۵KV ۵۰Hz	۱۵KV ۱۶/۷Hz
چگالی توان (VA/Kg)	۳۵۰۰	۲۶۰۰	۵۳۰-۴۵۰	۳۵۰-۲۲۰
راندمان در توان نامی و حداکثر دما	۹۹/۳%	۹۹/۳%	۹۵%**	۹۲%*
وزن روغن (gr/KVA)	۹۰	۹۰	۲۵۰-۵۵۰	۵۰۰-۶۰۰
وزن مس (gr/KVA)	۴۰	۶۰	۲۵۰-۴۵۰	۴۵۰-۵۵۰

۸- جمع بندی

در این مطالعه، ترانسفورماتور حالت جامد معرفی و مزایا و معایب آن مورد بررسی قرار گرفت. حجم کمتر و قابلیت‌های کنترلی این تجهیز، از مهم‌ترین مزایای آن نسبت به ترانسفورماتورهای فرکانس پایین سنتی است.

با وجود عملکرد و ویژگی‌های قابل توجه، SST در حالت کلی به دلیل محدودیت‌هایش، جایگزین ترانسفورماتورهای فرکانس پایین معمولی نمی‌شود. با این حال، استفاده از SST در شرایط کاربری خاص مورد توجه قرار می‌گیرد.

به‌نظر می‌رسد با استفاده از SST در شبکه توزیع و با تکیه بر قابلیت‌های کنترلی آن، بتوان تلفات کلی توان را در شبکه به میزان قابل توجهی کاهش داد. این مساله در کارهای آینده مورد توجه قرار خواهند گرفت.

***

پی‌نوشت‌ها

1-Low Frequency Transformer
2-High Frequency Transformer
3-Solid State Transformer
4-Electric Power Research Institute
5-Distribution Energy Storage
6- Intelligent Universal Transformer (IUT)
7-Static Var Compensator
8-Intelligent Electrinic Device
9-Power Electronic Traction Transformer

مراجع

[1]L. Heinemann, G. Mauthe, "The Universal Power Electronics Based Distribution Transformer, An Unified Approach," 32nd IEEE Power Electronics Specialists Conf. (PESC 2001), Vancouver, Canada, June 17-21, 2001, pp. 504–509

[2] Y. W. Lu, W. Zhang, Y. Liu, "A large signal dynamic model for single-phase AC-to-DC converters with power factor correction" IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004. (PESC 04). 20-25 June 2004, Vol.2, pp. 1057 – 1063.

[3] G. Nirgude, R. Tirumala, N. Mohan "A new, large-signal average model for single-switch DC-DC converters operating in both CCM and DCM" IEEE 32nd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2001. (PESC. 2001), vol. 3, pp. 1736 - 1741.

[4] "The solid-state transformer concept: A new era in power distribution", AFRICON 2009, 23-25 Sept. 2009, pp. 1-6.

[5] H. d. T. Mouton, J. W. van der Merwe "Solid-state transformer topology selection", *IEEE International Conference on Industrial Technology*, Feb. 10-13, 2009, pp. 1-6.

[6] S. Bhattacharya, T. Zhao, G. Wang, S. Dutta, "
Design and development of Generation-I silicon based Solid State Transformer", 25th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010, Feb. 21-25, pp. 1666-1673.

[7] J. W. Kolar "Intelligent Solid State Transformers (SSTs), A Key Building Block of Future Smart Grid Systems" The MEGA Cube Project, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich

[8] J.W. Kolar, G.I. Ortiz, "Solid State Transformer Concepts in Traction and Smart Grid Applications" Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich

[9] J.W. Kolar, "Next Generation Power Electronics Infrastructure System", The EEnergy Internet, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zurich

[10] M. Claessens, D. Dujic, F. Canales, P. Stefanu, "Traction transformation" Energize, March 2013, pp. 49-52

[11] S. Bhattacharya, A. Juneja, "Energy router: Architectures and functionalities toward Energy Internet" 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm), Oct. 17-20, 2011, pp. 31-36.

[12] D. Wang, C. Mao, J. Lu "Operation and control mode of electronic power transformer", 2009 IEEE PES/IAS Conference on Sustainable Alternative Energy (SAE), Sept. 28-30, 2009, pp. 1-5,

[13] SIEMENS, "Power Transmission and Distribution Solutions" Siemens Energy Sector, Power Engineering Guide

[14] S. Bifaretti, P. Zanchetta, A. Watson, L. Tarisciotti, "Advanced Power Electronic Conversion and Control System for Universal and Flexible Power Management" IEEE Transactions on Smart Grid, Vol.2, no. 2, pp. 231-243.

[15] ABB, "ABB Special Report Transformers", 2012.

[16] D. Grider , M. Das, A. Agarwal, J. Palmour "10 kV/120 A SiC DMOSFET half H-bridge power modules for 1 MVA solid state power substation", 2011 IEEE Electric Ship Technologies Symposium, April 10-13, 2011, pp. 131-134.

[17] A. Maitra, A. Sundaram, M. Gandhi, S. Bird, S. Doss, "Intelligent Universal Transformer design and applications", 20th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution, CIRED 2009. June 8-11, pp. 1-7

[18] F. Goodman, "EPRI Intelligent Universal Transformer" December, 2006