

طراحی و ساخت کنترل کننده توان یکپارچه (UPFC) ۳ کیلوولت آمپری

رضا قاضی
دانشیار گروه مهندسی برق
گروه مهندسی برق - دانشگاه فردوسی مشهد
ایران

مسعود درویش اسکندری
دانشجوی کارشناسی ارشد برق

واژه‌های کلیدی: کنترل کننده توان یکپارچه UPFC، ادوات FACTS

چکیده:

تجدید ساختار سیستم‌های قدرت توسعه پتانسیل‌های استفاده نشده سیستم‌های انتقال را ضروری می‌نماید. از جمله دلایل این ضرورت مسأله زیست محیطی، مشکلات حریم، افزایش هزینه‌ها و سیاست‌های مقررات زدایی می‌باشد. کنترل کننده‌های مبتنی بر الکترونیک قدرت موسوم به ابزار FACTS قادرند توان عبوری از خطوط پربار را کاهش، بار پذیری خطوط را افزایش، تلفات سیستم را کاهش و هزینه تولید را افزایش و پایداری آنرا بهبود بخشند و با کنترل عبور توان نیازمندیهای قراردادها را مرتفع نمایند. استفاده از این وسایل برای مدیریت پرشدگی^۱ حائز اهمیت است و به کارگیری آنها برای رفع یا کاهش پرشدگی حاد در کوتاه مدت توجیه پذیر است. یکی از ادوات کنترل کننده توان یکپارچه (UPFC)^۲

است که با بهره‌گیری از منبع ولتاژ سنکرون^۳ (SVS) قادر است بطور همزمان یا مستقل تمامی پارامترهایی را که در توان عبوری از خط مؤثرند (یعنی ولتاژ، امپدانس و زاویه) را کنترل نماید. از این جهت این وسیله در حال حاضر قوی‌ترین ابزاری است که می‌تواند در کنترل توان خطوط مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله اقدام به طراحی و ساخت یک دستگاه UPFC نیمه صنعتی با ظرفیت 3kVA گردیده است.

۱- مقدمه:

توان انتقالی از یک خط انتقال تابعی از امپدانس خط، اندازه و فاز و ولتاژهای دو سر آن می‌باشد و برای کنترل توان عبوری از آن در گذشته از ترانسفورماتورهای قابل تنظیم^۴ که قادر به تنظیم دامنه و فاز ولتاژ بودند استفاده می‌شد. گرچه این وسایل در شرایط ماندگار و تغییرات کند کارآمد بودند لیکن

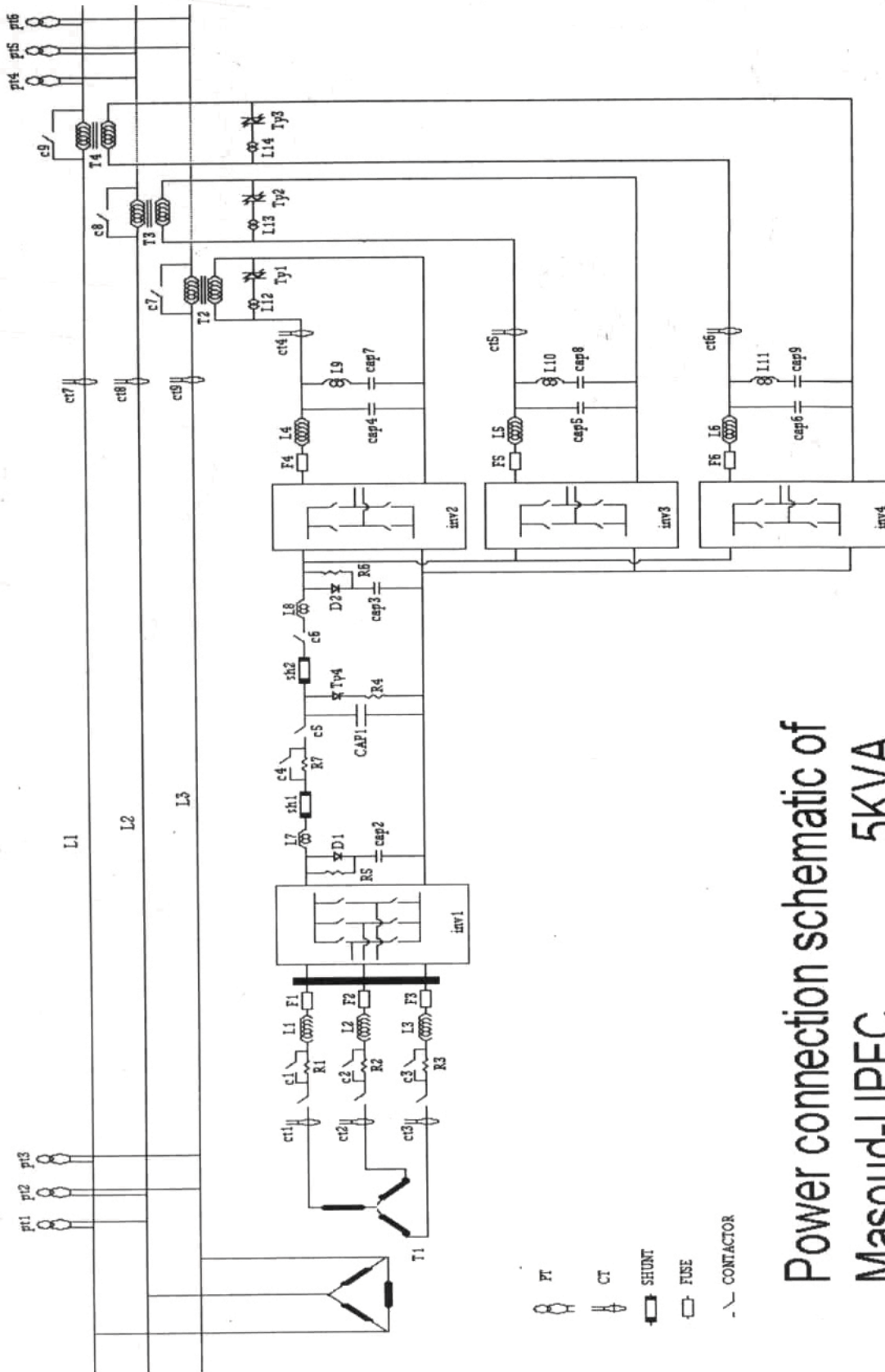
۳- Synchronous Voltage Source

۴- Regulation Transformer

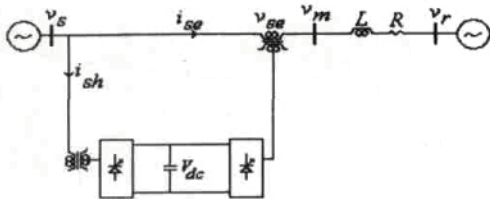
۱- Congestion Management

۲- Unified Power Flow Controller

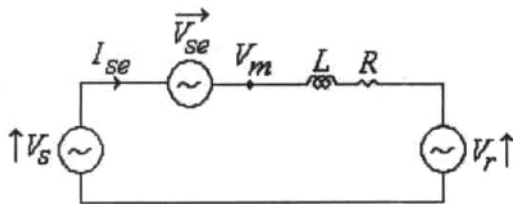
شکل ۴- مدارات قدرت



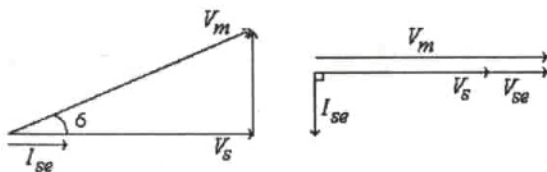
Power connection schematic of Masoud-UPFC 5KVA



شکل ۱- دیاگرام تک خطی UPFC نصب شده در خط انتقال



شکل ۲- نمایش فازوری UPFC



شکل ۳- سمت راست: تزریق ولتاژ همفاز با ولتاژ خط

سمت چپ: تزریق ولتاژ عمود بر ولتاژ خط

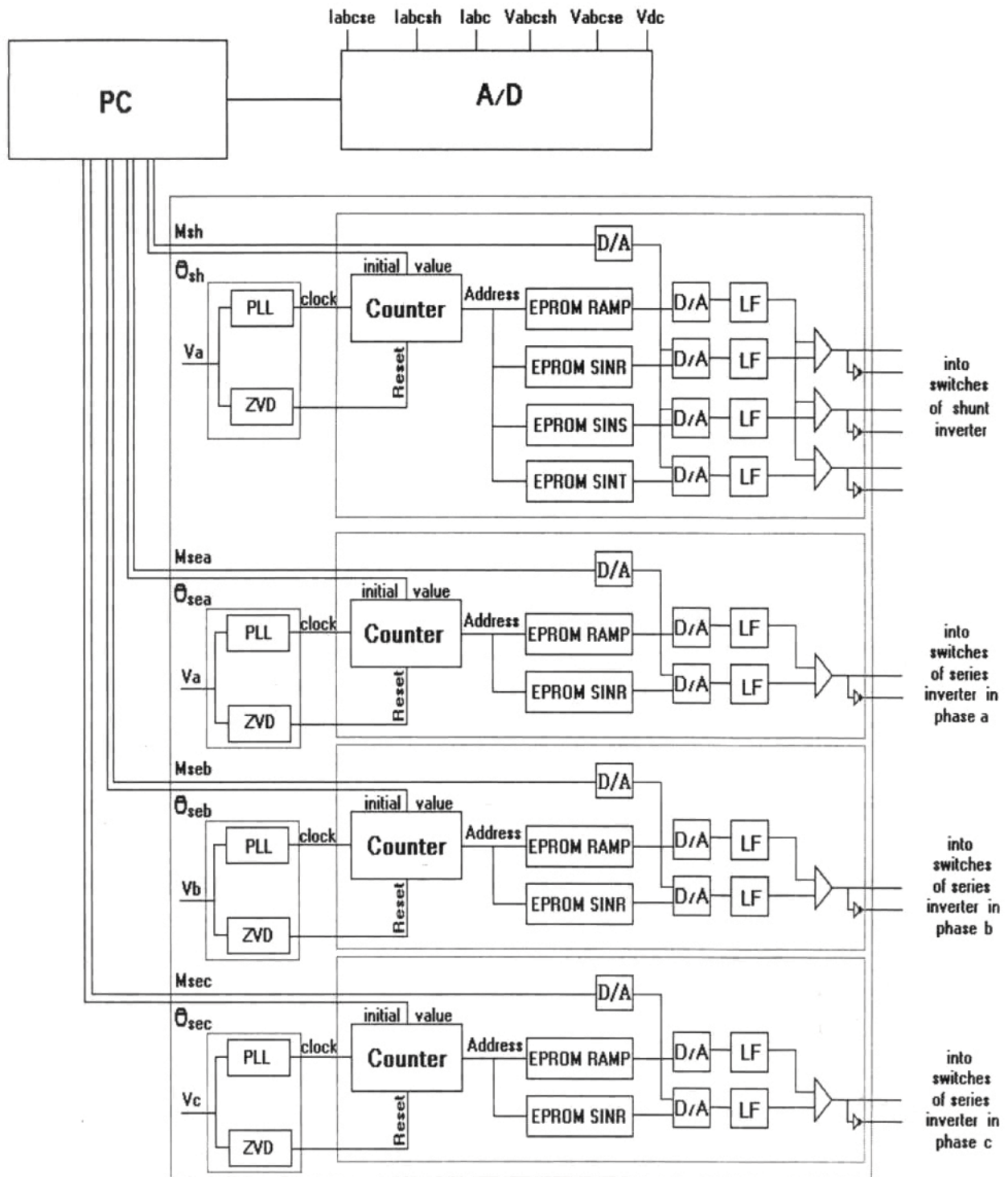
۳- سخت افزار:

سخت افزار دستگاه شامل بخشهای قدرتی و الکترونیکی است که در شکلهای ۴ و ۵ و ۶ نشان داده شده است. کنترل سیستم توسط pc مدل pentium3 انجام می شود که در آن پس از قرائت ولتاژها و جریانهای سه فاز و همچنین ولتاژ DC از طریق A/D و اعمال کنترلرها، اندیس مدولاسیون m و زاویه θ را تولید می نماید. کامپیوتر علاوه بر محاسبه m و θ کلیه فرامین مربوط به باز و بسته شدن کنتاکتورها و روشن و خاموش شدن اینورترها را نیز صادر می نماید در شکل (۴) ترانس T1 و ترانس T2 به ترتیب اتصال موازی و سری اینورترها را به خط فراهم می کنند. سلفهای L1 و L2 و L3 معرف راکتانس شاخه موازی هستند، که جهت عملکرد شاخه موازی ضرورت دارد. کنتاکتورهای C1 و C2 و C3 همراه با مقاومت های R1 و R2 و R3 کار راه اندازی نرم دستگاه را فراهم می کنند. کنتاکتورهای C9 و C8 و C7 جهت خارج

در شرایط گذرا مؤثر نبودند و در نتیجه برای اجتناب از ناپایداری و حفظ حاشیه اطمینان از تمام ظرفیت خطوط استفاده نمی شد. در سالهای اخیر و در پی پیشرفتهای شگرف در زمینه نیمه هادیهای قدرت، با به کارگیری اینورترهای قدرت، ادوات شبکه های انتقال انعطاف پذیر جریان متناوب (FACTS) عرضه و در کاربردهای متعدد بخصوص در سیستمهای تجدید ساختار مطرح گردید [۱-۶]. کنترل کننده توان یکپارچه (UPFC) از آخرین دست آوردهای این ادوات است. این وسیله به کمک دو ترانسفورماتور به صورت سری- موازی به خط انتقال متصل شده و اهدافی نظیر جبران سازی توان راکتیو و یا کنترل توان عبوری از خط را برآورده می نماید [۱] طراحی و ساخت یک دستگاه UPFC با قدرت 3kVA در قالب یک پروژه کارشناسی ارشد با همکاری جهاد دانشگاهی دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی انجام شده است که شرح طراحی و عملکرد آن در بخشهای بعدی مقاله آمده است.

۲- اساس کار UPFC

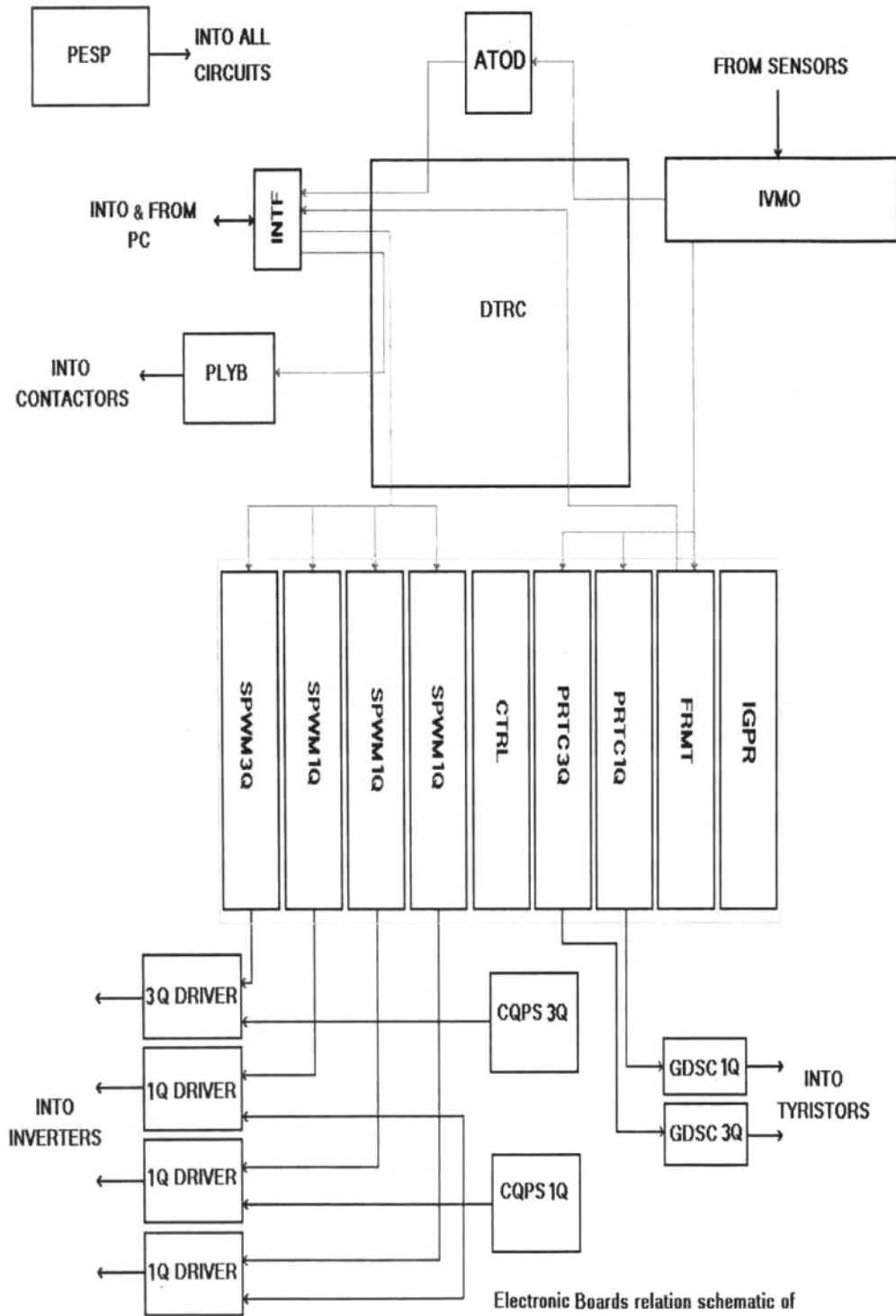
نمای عمومی یک UPFC در شکل (۱) نشان داده شده است که بین دو باس با ولتاژهای V_s و V_r قرار گرفته است. می توان شاخه سری را به منزله یک منبع ولتاژ V_{se} و شاخه موازی را به منزله یک منبع جریان i_{sh} در نظر گرفت. شکل (۲) مدار معادل تک خطی آن را نشان می دهد که از آن L و R مربوط به خطوط انتقال می باشند. V_{se} از نظر اندازه بین مقدار صفر و V_{semax} و از نظر زاویه بین 0 و 2π قابل کنترل است. در نتیجه قادر است توان اکتیو و راکتیو با سیستم مبادله نماید (شکل ۳). در آرایش UPFC توان واقعی مبادله شده توسط SVS، توسط یکی از باسهای انتهایی خط همانطوری که در شکل نشان داده شده است تأمین می گردد [۱].



Control circuits schematic of
Masoud-UPFC 5 KVA

ACECR Nasir Branch --- Ferdowsi University

شکل ۶- بردهای الکترونیکی

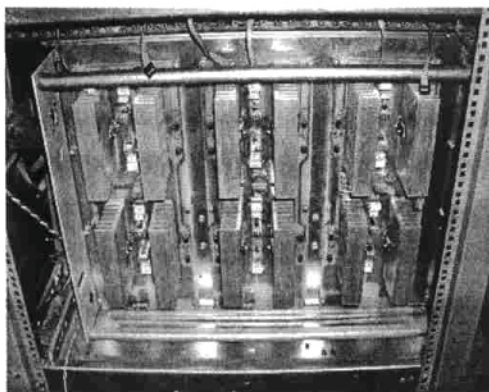


Electronic Boards relation schematic of Masoud-UPFC 5 KVA

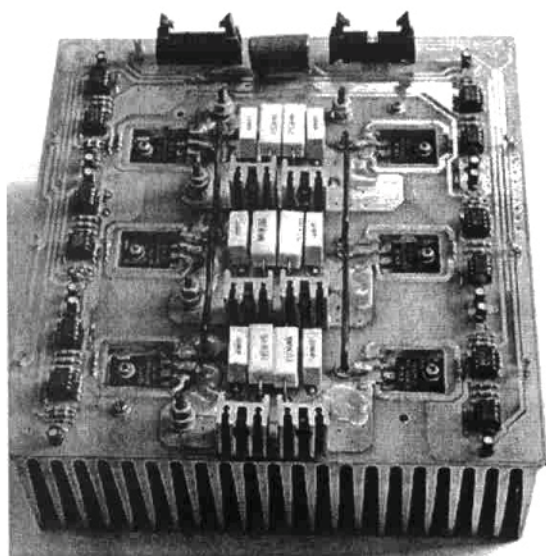
ACECR Nasir Branch --- Ferdowsi University

می باشد. برای درایو IGBT [۹] از روش اپتوکوپلری و آی سی شماره 6N13 که خروجی آن از نوع دیجیتال و سازگار با TTL است، استفاده شده است. الگوی سوئیچ زنی بکار رفته از نوع SPWM می باشد [۱۰] که در آن اندیس مدولاسیون m و یک زاویه θ به آن اعمال می شود فرکانس کلیدزنی 2.55 KHZ می باشد. در شاخه سری از سه اینورتر تک فاز تمام پل استفاده شده است که شامل سوئیچها مدارات اسنابر و درایور است که همراه با هیت سینکها یک مجموعه را تشکیل می دهند. m اندیس مدولاسیون است. اینورتر شاخه موازی یک اینورتر دو سطحی شامل ۶ سوئیچ است که یک مجموعه را تشکیل می دهند و نسبت ولتاژ AC به DC در

$$\text{آن برابر } \frac{\sqrt{2}m}{2\sqrt{2}} \text{ است.}$$



شکل ۷- نمای اینورتر شاخه سری



شکل ۸- نمای اینورتر شاخه موازی

کردن شاخه سری تحت خطاهای شبکه در نظر گرفته شده اند. کنتاکتورهای C4 و C6 امکان عملکرد مستقل شاخه سری و موازی را ایجاد می نمایند. در شکل (۴) ۹ سنسور جریان و ۶ سنسور ولتاژ (CT و PT) نمونه برداری جریان ها و ولتاژها را به عهده دارند. همچنین ولتاژ DC خازن توسط تقسیم مقاومتی تشخیص داده می شود. همچنین خازن CAP2, CAP3, ... همراه با دیود و مقاومت مربوطه، مدارات اسنابر برای حفاظت سوئیچها را تشکیل می دهند.

CAP1 خازن اصلی اینورتر است. مقاومت R4 همراه با کلید مربوط برای تخلیه سریع این خازن در مواقع لزوم در نظر گرفته شده است.

در بخش حفاظت، حفاظت های مختلف که در یک طرح نیمه صنعتی لازم است در نظر گرفته شده است. این حفاظت ها شامل استفاده از سلف سری با هسته هوا به مقدار 500mH

در مسیر DC جهت محدود کردن $\frac{di}{dt}$ و مدار اسنابر RCD

شامل خازن 10 nf با ولتاژ تحمل 1000 ولت و مقاومت $6.8k\Omega$ ، ده واتی و دیود DESI30-12 شرکت LXYS

است. حفاظت جریان زیاد شاخه موازی، حفاظت دمای هیت سینک های اینورترهای سری و موازی، حفاظت ولتاژ خازن

DC، حفاظت جریان زیاد شاخه سری، حفاظت جریان DC و سایر حفاظت های لازم فیوزی در نظر گرفته شده است که از

طریق سیستم کنترل مرکزی اعمال می گردند. خازن DC شامل دو عدد خازن $470\mu f$ و 450V است که جهت انتخاب آن

ملاحظات نظیر ماکزیمم انرژی مورد نیاز جهت مبادله با شبکه در حالت های گذرا، حذف نوسانات ناشی از سایر عناصر ذخیره

کننده انرژی دستگاه و شبکه و نیز سرعت پاسخ دستگاه در نظر گرفته شده است. اندوکتانس بین اینورتر موازی و شبکه سه

عدد سلف هسته هوا 1mH و مقاومت 0.02Ω می باشد که با توجه به ملاحظات ضروری انتخاب شده اند.

۳-۱ توپولوژی والگوی کلیدزنی اینورترها

نمای اینورتر سری و موازی در شکل های ۷ و ۸

نشان داده شده است سوئیچها از نوع IGBT [۸ و ۷]، مدل IXYS32 N60، 600V، 32A، ساخت شرکت فوق الذکر

۲-۳ سیستم کنترلی

ATOD	برد آنالوگ به دیجیتال
IVMO	برد نمونه نمودار
INTF	برد واسط با کامپیوتر
DTRC	برد واسط با نمونه بردار
IGPR	برد حفاظت جریان زیاد DC
FRMT	برد تشخیص فرکانس شبکه
PRTC1Q	برد حفاظت های هیت سینک اینورتری و تشخیص جریان زیاد شاخه سری
PRTC3Q	برد حفاظت دمای هیت سینک اینورتری موازی
CTRL	برد تشخیص اضافه ولتاژ DC
PLYB	برد درایور ترستورهای حفاظت اضافه ولتاژ DC
GDSC1Q	برد درایور ترستورهای حفاظت اضافه جریان شاخه سری
SPWM1Q	برد تولید سیگنال PWM
SPWM3Q	برد تولید سیگنال PWM
3Q DRIVER	برد درایورهای اینورتر
1Q DRIVER	برد درایورهای اینوتر
CQPS3Q	تغذیه ایزوله اینوترها
CQPS1Q	تغذیه ایزوله اینوترها
GDSC1Q	برد استاب
GDSC3Q	برد استاب

۴- نتایج علمی

۴-۱- راه اندازی

یکی از مشکلاتی که در اتصال اولیه اینورتر موازی به شبکه رخ می دهد، جریان زیادی است که برای شارژ خازن از دیودهای هرزگرد عبور می نمایند. برای حل این مشکل مطابق شکل (۴) در حالی که کنتاکتورهای C1 و C2 و C3 باز هستند، اینورتر با بسته شدن کنتاکتورهای سری، از طریق سری شدن با مقاومت های R1، R2 و R3، به شبکه متصل می شود. در این حالت، خازن پس از مدتی که به مقدار R بستگی دارد تا

نحوه اعمال فرامین کنترلی دستگاه در شکل ۵ نشان داده شده است سیگنالهای نمونه برداری شده که مقدار آنها ۱۶ عدد است وارد مبدل آنالوگ به دیجیتال AD 9042 می شود فرکانس عملیات حدود 1MHz می باشد. خروجیها بصورت دیتای ۱۲ بیتی از طریق برد واسط به کامپیوتر روانه می گردند. جهت پردازشها و اعمال کنترلها از PC استفاده شده است [۱۱]

برای تولید سیگنال SPWM با فرکانس 2.5 KHZ مورد نیاز، نیم پلهای اینورتر، سه EPROM هر یک حاوی یک سیکل سیگنال سینوسی به نحوی که با یکدیگر 120° اختلاف فاز داشته باشند؛ بکار برده شده و EPROM چهارم حاوی پنجاه سیکل سیگنال مثلثی می باشد. مطابق شکل آدرس تمامی EPROM مشترکاً توسط یک شمارنده تولید می شود. کلاک این شمارنده توسط یک PLL که ورودی آن نمونه ولتاژ فاز است تأمین می شود. خروجی PLL برابر $f \times 10^{17}$ است که f فرکانس برق شهر و 2^{17} تعداد کل آدرسهای EPROM است. جهت سنکرون شدن با برق شهر، یک مدار لحظه عبور ولتاژ فاز a را از نقطه صفر تشخیص داده و همزمان فرمان ریست شمارنده را صادر می کند. صدور این فرمان باعث می شود تا آدرس شمارنده به مقدار موجود در ورودی مقدار اولیه اش برگردد. این مقدار اولیه همان زاویه θ مربوط به مدولاسیون SPWM است. از طرف دیگر خروجی EPROMها به یک مبدل دیجیتال به آنالوگ رفته و در این قسمت اندیس مدولاسیون m به آن اعمال می گردد. همانطوری که بیان شد محاسبه m و θ و اعمال کلیه فرامین به عهده کامپیوتر است. در حالت حلقه بسته فرکانس عملیات کنترل حدود 1.6 KHZ می باشد.

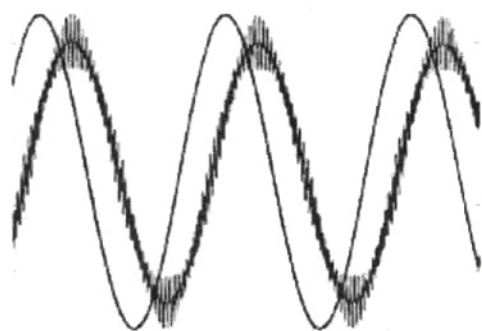
۳-۳ بردهای الکترونیکی

برای انجام عملیات مختلف بردهای گوناگون به اسامی IVMO و ATOD و... طراحی شده است که مفهوم آنها در ذیل و نحوه ارتباط آنها در شکل ۶ آمده است.

شده آن نیز در شکل (۱۲) آمده است. فرکانسهای بالای روی شکل موج جریان که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به وضوح بیشتری نشان داده شده است، همان فرکانس سوئیچینگ دستگاه می‌باشد که مطابق شکل ۱۵ در یک جریان زیاد حدود 60A قابل توجه نمی‌باشد. دلیل شکستهایی که در شبیه‌های مثبت و منفی ریسپلهای فرکانس بالای جریان دیده می‌شود، وجود پنج سطح ولتاژ در خروجی اینورتر نسبت به زمین شبکه است که ولتاژ شکل ۱۶ را روی سلف L1 ایجاد می‌نماید. این شکل موج در حقیقت تفاضل SPWM تولیدی و ولتاژ شبکه است. افزایش اندازه L1 و یا فرکانس سوئیچینگ موجب کاهش دامنه این فرکانس می‌گردد اما اشکالاتی نظیر افزایش تلفات را بدنبال دارد، البته می‌توان توسط یک فیلتر ناچ و یک فیلتر پائین گذر در خروجی تقریباً این فرکانس را حذف کرد.

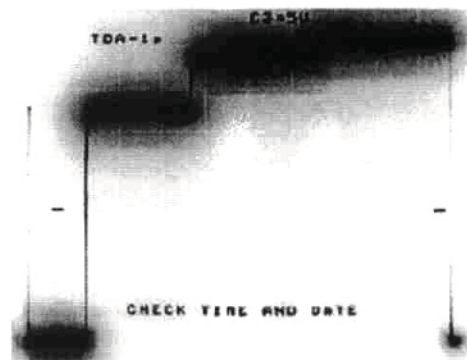


شکل ۱۱- جریان یک فاز اینورتر موازی همراه ولتاژ فاز مربوطه

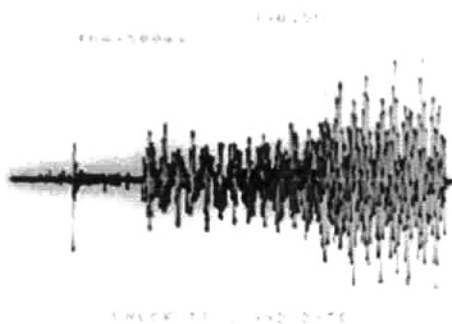


شکل ۱۲- جریان یک فاز اینورتر موازی همراه ولتاژ فاز مربوطه (شبیه سازی)

$380\sqrt{2}$ ولت شارژ می‌شود و سپس اینورتر با اختلاف زاویه صفر با شبکه روشن و آنگاه کنتاکتورهای دو سر مقاومتها بسته می‌شوند و ولتاژ خازن طی این دو مرحله به مقدار $380 \times \frac{2}{m} \sqrt{\frac{2}{3}}$ که با اندیس مدولاسیون 0.9 برابر 700 ولت می‌شود، می‌رسد. البته این مراحل بطور خودکار با برنامه‌ریزی کامپیوتر انجام می‌شود. نمونه ولتاژ خازن طی این مراحل و نیز جریان یک فاز توسط اسیلوسکوپ حافظه‌دار ضبط شده است که در شکل ۹ و ۱۰ نشان داده شده است. پیک محدود شده اولیه جریان و نیز فرکانسهای سوئیچینگ به وضوح در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۹- تغییرات ولتاژ خازن طی مراحل راه اندازی



شکل ۱۰- تغییرات جریان یک فاز اینورتر موازی طی مراحل راه اندازی

۴-۲ جریان خروجی اینورتر موازی

نمونه‌ای از شکل موج جریان یک فاز که مقدار موثر آن حدود 10A است به همراه ولتاژ فاز مربوطه در شکل (۱۱) نشان داده شده است. جهت مقایسه، نمونه شبیه‌سازی

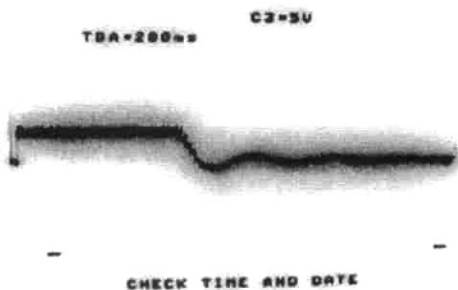
۳-۴ پاسخهای گذرای سیستم

پاسخ حلقه باز سیستم به ازاء تغییر پله ای θ در حالیکه مدولاسیون m ثابت می باشد بدست آمده است. شکل ۱۷ تغییر جریان از خازنی به سلفی همراه با تغییرات ولتاژ خازن به ازاء تغییر پله ای θ از -۱ به ۱ درجه نشان داده شده است. ملاحظه می شود که پاسخ سیستم کمتر از یک سیکل و پیوستگی جریان قابل توجه است.

پاسخ حلقه بسته سیستم در حالی که از یک کنترلر PI جهت تثبیت جریان در مقدار مرجع بر روی دستگاه قرار داده شده است، در ولتاژ DC که معیار مناسبی برای این مطالعه است، در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این حالت پاسخ سیستم حدود ۵ سیکل می باشد.



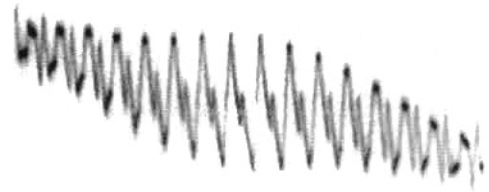
شکل ۱۷- تغییر جریان از خازنی به سلفی



شکل ۱۸- پاسخ حلقه بسته ولتاژ خازن به تغییر پله ای در θ

۴-۴ جریان و ولتاژ اینورتر سری

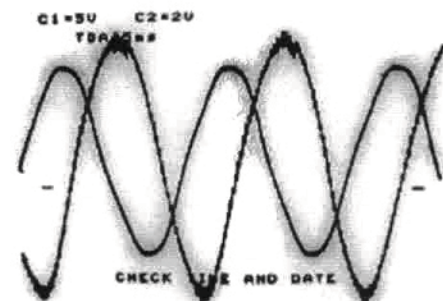
در شکل ۱۹ نمونه ای از ولتاژ ۵۰ ولتی یکی از اینورترهای شاخه سری را نشان می دهد همچنین در شکل ۲۰ نمونه ای از شکل موج جریان خروجی اینورتر سری در حال



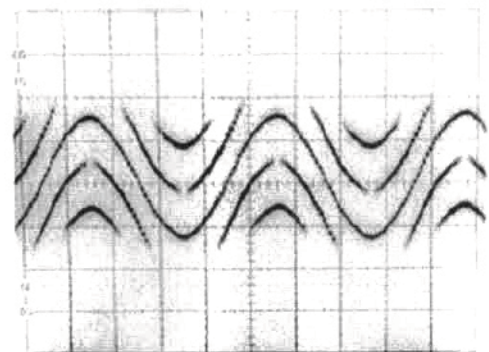
شکل ۱۳- ریبیل فرکانس بالای روی جریان



شکل ۱۴- ریبیل فرکانس بالای روی جریان

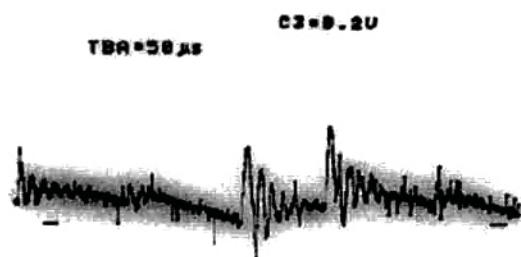


شکل ۱۵- جریان یک فاز اینورتر موازی همراه با ولتاژ فاز مربوطه

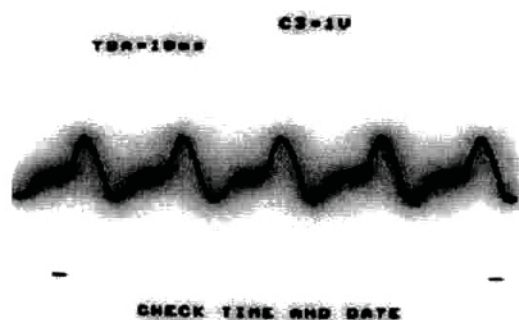


شکل ۱۶- ولتاژ دو سر سلف واقع بین اینورتر و شبکه

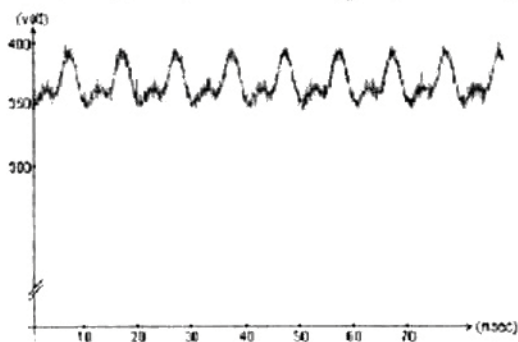
توسط مدار PLL اندازه گیری و به EPROM ها خورانده می شود. تأثیر تغییرات ولتاژ خازن DC، در ولتاژ خروجی اینورتر که به صورت PWM می باشد؛ در شکل ۲۴ نشان داده شده است. راه حلهایی برای غلبه بر این مشکل ارائه شده است که نتایج اعمال آنها بر روی دستگاه در مقاله بعدی خواهد شد. در خاتمه جهت اطلاعات بیشتر در زمینه نرم افزار، نقشه ها و جزئیات بیشتر می توان به مرجع [۱۲] مراجعه کرد. تصویری از دستگاه در شکل ۲۵ آمده است.



شکل ۲۱- ریپل سوئیچینگ ایجاد شده روی ولتاژ خازن

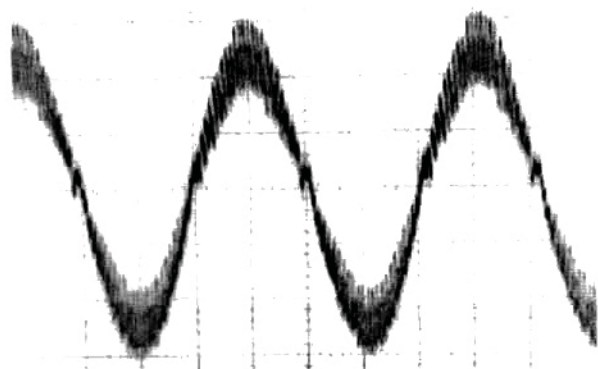


شکل ۲۲- شکل موج ولتاژ خازن حاوی ریپل ۵۰ و ۱۰۰ هرتز

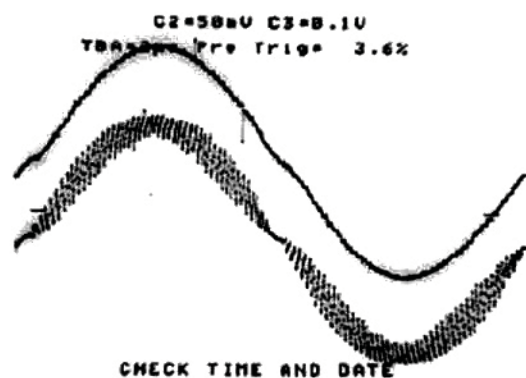


شکل ۲۳- شکل موج ولتاژ خازن (شبیه سازی)

تزریق توان اکتیو به خط قبل و بعد از فیلتر را نشان می دهد



شکل ۱۹- شکل موج ولتاژ تزریقی به خط توسط اینورتر سری



شکل ۲۰- شکل موج جریان خروجی اینورتر سری در شرایط تزریق توان اکتیو قبل و بعد از فیلتر

۴-۵ ریپل ولتاژ خازن

یکی از مباحث علمی مهم در خصوص کنترلرهای FACTS، کنترل ولتاژ خازن DC است. در این پروژه در عمل ملاحظه شد که ولتاژ خازن علاوه بر دارا بودن ریپل سوئیچینگ (که در شکل ۲۱ نشان داده شده است) دو فرکانس ۵۰ و ۱۰۰ هرتز با دامنه های متفاوت نیز روی این شکل موج ولتاژ وجود دارد (شکل ۲۲). نمونه شبیه سازی آن در شکل ۲۳ ملاحظه می شود.

با بررسی مشخص شد که هر نوع عدم تعادل در ولتاژهای شبکه باعث تولید هارمونیک دوم روی ولتاژ خازن می گردد که این پدیده موجب ایجاد هارمونیک سوم در جریان خروجی اینورترها می شود. اما فرکانس 50HZ ولتاژ خازن، ناشی از اختلاف فرکانس بین خروجی اینورتر و ولتاژ شبکه است که

پس از عملیاتی شدن نتایج آن در مقاله ارائه گردید. نتایج نشان داد که علیرغم پیچیدگی‌های موجود در زمینه ایجاد و حفاظت‌های لازم و کنترل ولتاژ خازن و تولید سیگنال مرجع به نحوی که ریپل ولتاژ خازن را که در اثر عوامل مختلف ظاهر می‌شود به حداقل برساند، نتایج رضایت‌بخش و می‌توان قدم‌های بعدی در طراحی و ساخت نمونه نیمه صنعتی و صنعتی برداشت.

۶- تقدیر و تشکر

از مسئولین محترم جهاد دانشگاهی دانشگاه خواجه‌نصیرالدین طوسی که امکانات این تحقیق را فراهم نمودند و همچنین از همکاری آقایان مهندس علی پناهلو، مهندس داوود رضی، مهندس عباس ذاکری و اعضاء محترم هیأت علمی جهاد دانشگاهی تشکر و قدردانی می‌گردد.

۷- مراجع

[1] Y. H. Song and A.T. Johns, " Flexible ac transmission systems (FACTS) ", IEE, London, 1999.

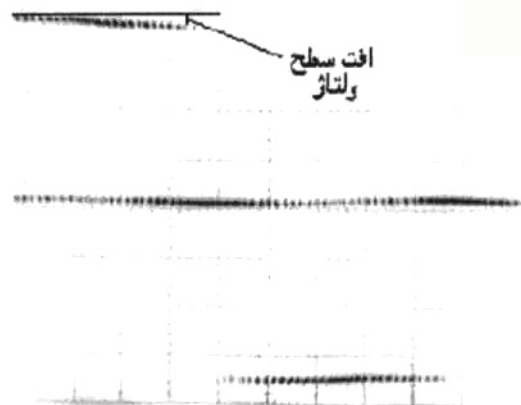
[2] N.G. Hingorani and L. Gyugyi, " Understanding FACTS: concepts and technology of flexible ac transmission systems", IEEE press, New York, 2000.

[3] E. Edris, "FACTS technology development: An update, IEEE power engineering review, v10.20, no.3, March 2000.

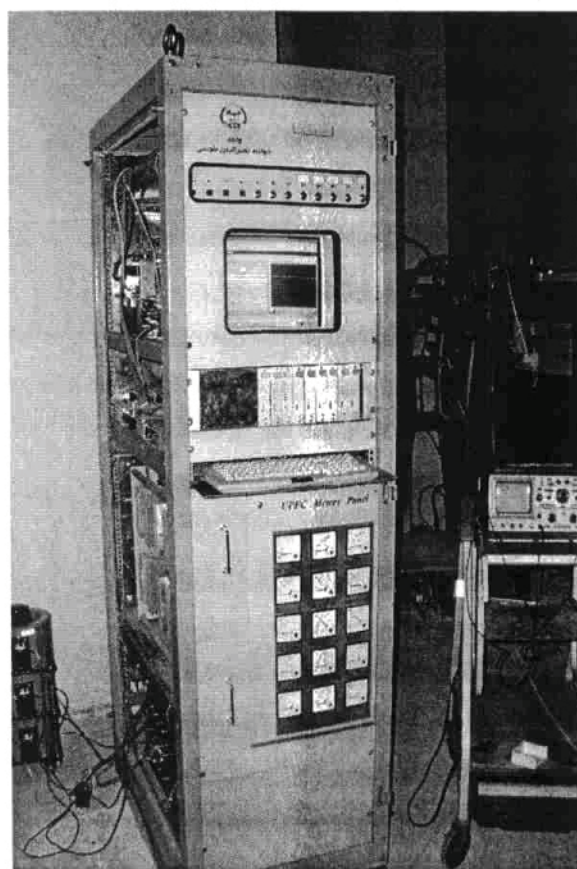
[4] E. Acha V G Agelidis " Power electronic control in electrical systems " Newnes 2002.

[5] S.N. Singh and A.K. David, " Congestion management by optimizing FACTS devices location", Electric utility deregulation and restructuring and power technologies, proceeding DRPT 2000.

[6] X Wang et. Al. " Series FACTS devices in financial transmission rights auction for congestion management., IEEE power engineering review vol.21, issue 11., Nov. 2001.



شکل ۲۴- ولتاژ خروجی فاز به فاز اینورتر



شکل ۲۵- تصویری از دستگاه ساخته شده

۵- نتیجه گیری

با توجه به اهمیت یافتن به کارگیری ادوات FACTS در سیستم‌های انتقال و توزیع جهت رفع پاره‌ای از مشکلات، از جمله دست یافتن به کیفیت توان مطلوب در شبکه‌های توزیع، افزایش بار پذیری سیستم‌های قدرت و مدیریت پرشدگی خطوط، طراحی و ساخت یک نمونه از دستگاه UPFC در قالب یک پروژه کارشناسی ارشد مطرح و

[7] Fairchild application note 9020, IGBT Basic 1 and 2.

[8] Semicron Co. " Power IGBT module and design consideration", 2000.

[9] Fairchild application note AN7519, IGBT gate drive guideline "

[10] N. Mohan " Power electronics: converters, applications and design", John Wiley and sons, 1995.

[11] M. A. Mazidi, " The 80x86pc and compatible computers " Vol.2, 2000.

{۱۲} مسعود درویش اسکندری " طراحی و ساخت یک دستگاه کنترل کننده توان یک پارچه ۳ کیلوولت آمپری " پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه فردوسی مشهد زمستان ۱۳۸۲.