



Design and Manufacture of Solid-state Voltage Regulator for Automatic Compensation of Voltage Drop

Morteza Mikhak-beyranvand^{1*}, Houman Bastami²

¹Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

²PhD Graduate, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Iran.

ARTICLE INFO

Article Type:

Original Research

Received: 01.01.2022

Revised: 09.10.2022

Accepted: 10.25.2022

Keyword:

Autotransformer with Tap
Analog System
Distribution System
Solid state Switch
Voltage Regulator

*Corresponding Author:

Morteza Mikhak-beyranvand
Email: mikhak.mo@gmail.com

ABSTRACT

Electricity distribution network delivers 220V voltage to single phase customers. In weak distribution systems, the length of feeders is long so the end of feeders is faced with excessive voltage drop. Compensating for this voltage drop by constructing medium voltage power systems and installing new distribution substations is not cost effective. Especially in rural areas where the prospect of development and increase in subscribers is unlikely. Therefore, other flexible and low-cost solutions should be considered. In this research, to compensate for voltage drop, a semi-industrial model of solid-state voltage regulator was designed and manufactured for a small group of home subscribers who had voltage drop due to their distance from the distribution substation. In this structure, dry autotransformers with nominal power of 15KVA were used as single-phase (or three-phase). The low-voltage autotransformer taps were changed by the use of triac semiconductor switches with voltage closed-loop control. To show the efficiency of this method, a 500VA laboratory sample was made using 12 triacs with 40A rated current, from which successful results were obtained. The measurement results showed that this equipment could limit voltage changes to the range of 0.95 to 1.05 of the nominal value while also not affecting the quality of power. The semi-industrial version of this voltage regulator was manufactured and successfully tested, in which appropriate protection functions are embedded for operational use in power systems.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Electricity distribution network delivers voltage of 220V to single phase customers. In weak distribution systems, the length of feeders is long so the end of feeders is faced with excessive voltage drop. Compensating for this voltage drop by constructing medium voltage power system and installing new distribution substations is not cost effective, particularly in rural areas where the prospect of development and increase in subscribers is unlikely. Therefore, other flexible and low-cost solutions should be considered. In this research, to compensate for voltage drop, a small group of home subscribers who experienced voltage drop in their distribution systems due to their distance from the distribution substation, a semi-industrial model of solid-state voltage regulator (SSVR) was designed and manufactured which can be installed on outdoor electric poles.

Methodology

The proposed SSVR consisted of three main parts of transformer, the switching of transformer taps and the circuit control part. In this SSVR, a dry autotransformer with system nominal power was used as a single-phase (or three-phase). Autotransformers, due to having only one coil, have a smaller core and coil volume, lower cost, and less loss than a conventional transformer with isolated coils. Thus, autotransformers are used here. The low-voltage autotransformer taps were changed by the use of triac semiconductor switches with voltage closed-loop control. To show the efficiency of this method, a 500VA laboratory sample was made using 12 triacs with 40A rated current. It is noteworthy that under normal conditions, when feeder voltage is 220V, coil switch 1/1 is closed, implying that none of the coils are placed in series with the load and the load current does not pass through the transformer coils, and its coil losses are almost zero.

Here, 12 different taps from 140V to 250V with 10V steps were used to automatically adjust the voltage in a wide range. After reducing the voltage to 140V, the autotransformer and SSVR cut off the load and the protection function was performed. This implied that by changing the input voltage to SSVR in the range of 140V to V250V, it was possible to set the output voltage delivered to the load in the range of 220V with changes less than 3%.

One of the most important parts of SSVR implementation is the control circuit of triac firing pulse. In the control circuit, the voltage of the load and feeder is measured and according to the amount of voltage drop, the appropriate tap is selected and then the corresponding triac is excited based on the voltage zero crossing. In the present research, appropriate analog electronic circuits were used to control the firing pulse of triacs. To detect the feeder voltage, it was necessary to measure the line voltage and for this purpose, the line voltage was converted to DC voltage by the diode bridge rectifier. Then, the DC voltage entered the comparator as the main quantity of the line voltage measurement. A comparator circuit consisting of an op-amp was used to compare the online voltage with the reference voltage in order to make suitable signals to be sent to the triacs. The taps 12 of autotransformer had to be switched and consequently LM339 ICs 3 were used, which have 12 op-amps. In order to determine the desired value of the output voltage of the

autotransformer through the op-amp command, voltage divider resistors with equal value were used according to Figure 1. In order to prevent the interference of the operation of different triacs (which causes short-circuiting of some coils of the autotransformer), XORs were used in series with the comparator, which can also be seen in Figure 1.

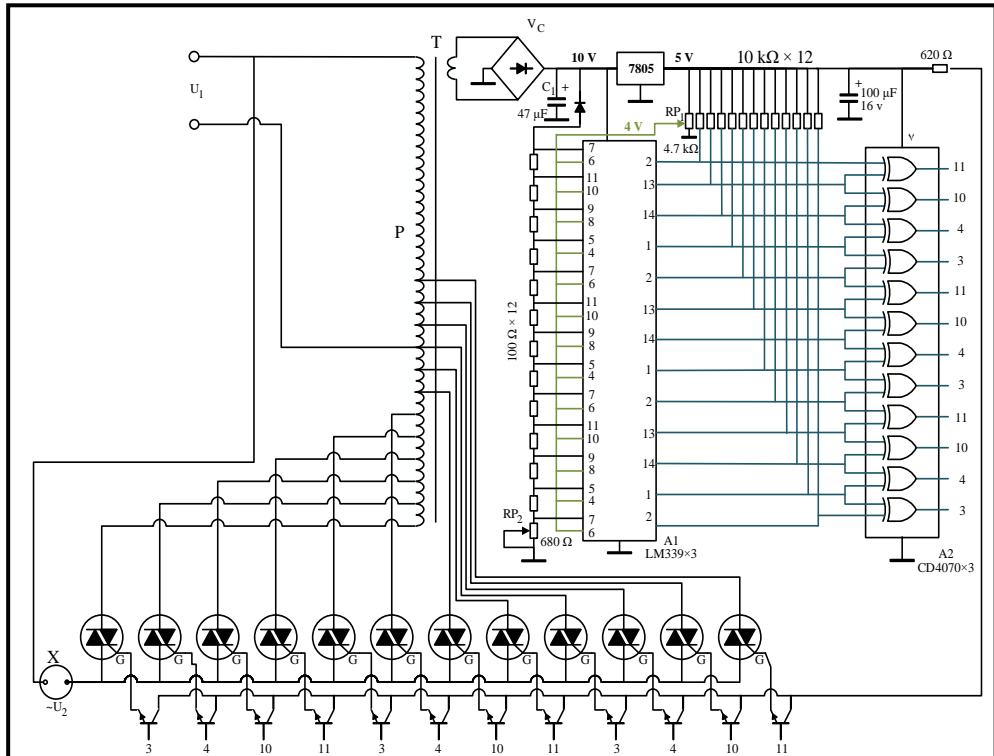


Figure 1. Schematic SSVR with analog control circuit.

When the feeder voltage is between the minimum and maximum value, the voltage of some branches of the voltage divider resistors is greater than V_{ref} and the output of some op-amps switches on. The value of the resistors was set in such a way that with the changes of the feeder voltage in the steps of 10V, the op-amps were turned on in order. The output signals of the digital comparator circuits must fire the triacs of the power circuit, so a suitable interface circuit must be used to convert the output of the control circuit, which is a 5V signal, into the appropriate command to connect and disconnect the triac. MOC3041 optotriac IC was used in this circuit, which enabled to turn the triac on and off at the point of zero voltage, and in this way, it had the least effect on the quality of the voltage waveform and load current.

Results and discussion

The complete setup of SSVR laboratory sample is shown in Figure 2. In this circuit, a 500-watt load was made using 100 watt lamps and used for testing. The output voltage

waveform was measured through a 5-watt 1-ohm resistor, which was connected in series with the neutral wire. The potential on this resistor was less than 10 volts and directly connected to the oscilloscope for measurement. The voltage waveform of the resistor, which is actually equal to the load current, can be seen in Figure 2. As can be observed, the obtained waveform did not have any transients and its harmonics were close to 1%. In addition, the circuit was continuously kept on and no temperature increase was observed on the surface of the heatsink.

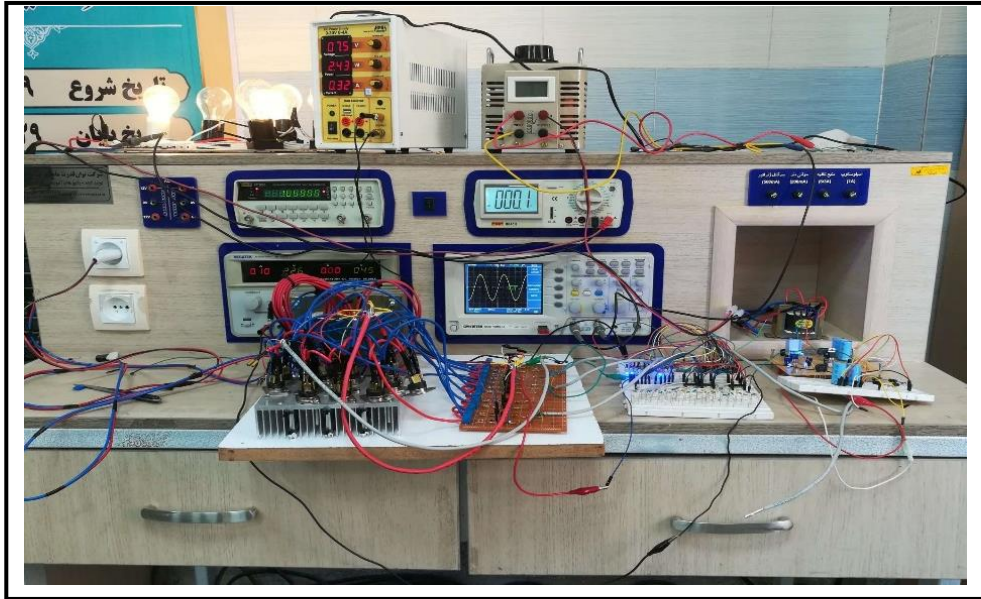


Figure 2. Complete set-up of laboratory sample and lamp current waveform in SSVR operation.

Conclusion

The results showed that SSVR can limit the voltage changes to the range of 0.95 to 1.05 of the nominal value without affecting the quality of power. The semi-industrial version of this voltage regulator was manufactured and successfully tested, in which appropriate protection functions were embedded for operational use in power systems. In general, the obtained results demonstrated that the equipment had a high efficiency in compensating the voltage drop caused by long low pressure feeders.



مجله علمی حرفه‌ای
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

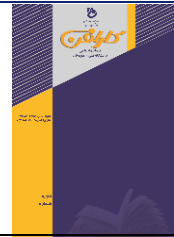
کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

بهار ۱۴۰۲، دوره ۲۰، شماره ۱، ۷۴-۵۵

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi: 10.48301/KSSA.2022.335171.2053



طراحی و ساخت تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد برای جبران خودکار افت ولتاژ

مرتضی میخک بیرانوند^{*۱}، هومن بسطامی^۲ ID

۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

۲- دانش‌آموخته مقطع دکتری، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی فشار ضعیف، ولتاژ ۲۲۰۷ را به مشتریان تک‌فاز تحویل می‌دهند. در شبکه فشار ضعیف، طول برخی از فیدها طولانی است به گونه‌ای که مشترکین انتهایی فیدر با افت ولتاژ بیش از حد مجاز روبه‌رو می‌شوند. جبران‌سازی این افت ولتاژ با احداث خطوط فشار متوسط و نصب پست‌های توزیع جدید مقرون‌به‌صرفه نیست. به‌ویژه در مناطق روستایی که چشم‌انداز توسعه و افزایش مشترکین، احتمال پایینی دارد. بنابراین باید راه‌حل‌های انعطاف‌پذیر و کم‌هزینه دیگری نیز بررسی شوند. در این پژوهش، برای جبران افت ولتاژ گروه کوچکی از مشترکین خانگی که به دلیل دوری از پست توزیع دارای افت ولتاژ هستند، یک نمونه نیمه‌صنعتی تنظیم‌کننده ولتاژ حالت-جامد طراحی و ساخته می‌شود. در این ساختار از اتوترانسفورماتورهای خشک با توان نامی ۱۵KVA به‌صورت تک‌فاز (با سه فاز) استفاده خواهد شد. تغییر تپ‌های اتوترانسفورماتور فشار ضعیف با استفاده از کلیدهای نیمه‌هادی تریاک و با کنترل حلقه بسته ولتاژ انجام می‌شود. برای نشان دادن کارایی این روش، یک نمونه آزمایشگاهی ۵۰۰VA با استفاده از ۱۲ عدد تریاک با جریان نامی ۴۰ آمپر ساخته شده که نتایج موفقیت‌آمیزی از آن حاصل گردیده است. نتایج اندازه‌گیری نشان می‌دهد که این تجهیز می‌تواند تغییرات ولتاژ را به محدوده ۰/۹۵ تا ۱/۰۵ مقدار نامی محدود کند ضمن این‌که کیفیت توان را نیز تحت تأثیر قرار نمی‌دهد. نمونه نیمه‌صنعتی این تنظیم‌کننده ولتاژ ساخته شده و با موفقیت به‌صورت میدانی آزمایش شده است که در آن توابع حفاظتی مناسب برای به‌کارگیری عملیاتی در شبکه‌های قدرت تعبیه شده است.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۰۲/۱۱

بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۰۶/۱۹

پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۰۳

کلید واژگان:

اتوترانسفورماتور دارای تپ

تنظیم‌کننده ولتاژ

سیستم آنالوگ

شبکه توزیع

کلید حالت جامد

*نویسنده مسئول: مرتضی میخک بیرانوند

پست الکترونیکی:

mikhak.mo@gmail.com



©2023 the authors. Published by Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

مقدمه

شبکه توزیع انرژی الکتریکی فشار ضعیف در بعضی از مناطق همچون مناطق روستایی، به دلیل گستردگی جغرافیایی، بسیار طولانی می‌شوند. یکی از مشکلات اصلی این گونه فیدرها افت ولتاژ شدید در مشترکین انتهایی خط فشار ضعیف است به گونه‌ای که تنظیم تپ‌چنجرهای سه‌گانه ترانسفورماتور توزیع قادر به رفع این مشکل نیست. برای مثال در شبکه توزیع فشار ضعیف استان لرستان در حال حاضر در بیش از ۶۰۰ نقطه نیاز به جبران‌سازی افت ولتاژ است. احداث خط ۲۰ کیلوولت و نصب پست‌های توزیع جدید به‌عنوان راه‌حلی مطمئن و سنتی برای برطرف کردن این مشکل به‌کار گرفته می‌شود. این روش از نظر اقتصادی و بهره‌برداری به‌صرفه نیست و برای اجتناب از این هزینه‌ها، جبران‌سازهای ولتاژ جدید و انعطاف‌پذیر نیاز است که ولتاژهای بحرانی نقاط حساس شبکه توزیع را پشتیبانی کند [۱].

برای بررسی بیشتر، روش‌های مختلف جبران‌ساز ولتاژ به‌صورت مقایسه‌ای در جدول ۱ نشان داده شده‌اند. از بین روش‌های ارائه‌شده در این جدول، روش‌های اول، دوم و هفتم، روش‌های مشابهی به حساب می‌آیند و قابلیت کنترل ولتاژ را دارند و سایر روش‌ها پرهزینه و بدون قابلیت کنترلی هستند. روش هفتم یا خازن‌های سویچ‌شونده با وارد و خارج کردن مقدار خازن موردنیاز، مقدار ولتاژ را در یک محدوده کنترل می‌کنند که در آن تغییرات ولتاژ به‌صورت پله‌ای است و از معایب آن می‌توان به احتمال وقوع رزونانس و طول عمر کم خازن اشاره کرد [۲]. در روش دوم یا اتوبوستر الکترونیکی نیز ولتاژ به‌صورت پله‌ای تغییر می‌کند ولی به دلیل استفاده از ترانسفورماتور، طول عمر بالایی برای وسیله امکان‌پذیر است که [۳؛ ۴] از اولین اتوبوسترهای عملیاتی ثبت‌شده در دنیا می‌باشند. مشابه این روش برای تنظیم خودکار ولتاژ در پست‌های فوق توزیع و انتقال به‌کار گرفته شده است به نحوی که تپ‌چنجرهای با تغییر وضعیت موتوری و استابلایزری بر روی ترانسفورماتورهای قدرت تعبیه می‌شود [۵]. این روش هزینه بالا، استهلاک بالا، تلفات اضافی، پاسخ سریع ندادن به تغییرات زیاد ولتاژ و کنترل پذیری پایین دارد. با این وجود تنها تنظیم‌کننده ولتاژ توزیع (DVR) که یک مبدل مبتنی بر الکترونیک قدرت (روش اول) است که قابلیت کنترل پیوسته ولتاژ را دارد [۶]. DVR از خانواده ادوات FACTS محسوب می‌شود و می‌توان آن را در هر نقطه از فیدر برای جبران‌سازی نصب کرد. این وسیله، علاوه بر جبران‌سازی ولتاژ، قادر است کمبود و مازاد لحظه‌ای ولتاژ را اصلاح کند و همچنین همانند فیلتر فعال هارمونیک‌ها را جذب کند. در پیوند DC آن نیز می‌توان منابع تولید پراکنده DC را متصل کرد و بدین ترتیب بخشی از هزینه‌های بهره‌برداری پروژه‌های DG را کاهش داد [۷].

امروزه تحقیقات بسیاری در مورد تنظیم‌کننده‌های ولتاژ مبتنی بر الکترونیک قدرت در شبکه‌های فشار متوسط و فشار ضعیف انجام شده است [۸]. با توجه به توسعه شبکه‌های فشار ضعیف به‌ویژه شبکه‌های با تولید پراکنده، توجهات بسیاری به تنظیم خودکار ولتاژ در نواحی مختلف شبکه‌های توزیع جلب شده است [۹]. در همین راستا، تنظیم‌کننده‌های ولتاژ حالت-جامد^۱ (SSVR) توان پایین با توجه به هزینه‌های پایین، قابلیت اطمینان بالا و انعطاف‌پذیری بالا و جبران‌سازی دائم ولتاژ، بهترین راه‌حل برای جبران‌سازی ولتاژ در شبکه‌های توزیع شناخته شده است [۱۰]. عموماً برای کاهش تپ‌ها از کلیدزنی برش‌دهنده موج با کمک کلیدهای IGBT استفاده می‌شود اما این قبیل روش‌ها علاوه بر تولید هارمونیک‌های ناخواسته در ولتاژ و جریان، افزایش هزینه و پیچیدگی ساخت را به همراه دارد [۱۱]. [۱۲] نیز به بررسی تنظیم‌کننده‌های ولتاژ در سیستم‌های توزیع با استفاده از کلیدهای تریاک همراه با مقاومت‌های محدودکننده جریان پرداخته است که این کار باعث افزایش تلفات و تعداد کلیدها در مدار شده است.

در این مقاله یک SSVR با ساختاری شبیه روش اول جدول ۱ برای تنظیم خودکار ولتاژ انتهایی فیدرهای طولانی در شبکه‌های توزیع معرفی خواهد شد که اهدافی چون حفاظت مصرف‌کننده‌ها، خنثی کردن نوسانات ناگهانی ولتاژ، پاسخ سریع به تغییرات ناگهانی ولتاژ، حفاظت مصرف‌کننده‌ها در برابر حالت‌های گذرا از جمله قطع و وصل برق شبکه

¹ Solid-state voltage regulator

نیز برآورده خواهد شد. SSVR معرفی شده، با یک مکانیزم ساده بر مبنای کلیدزنی تریاک اجرا می‌شود که به سادگی قابلیت اجرا را دارد و هیچ‌گونه هارمونیک مزاحمی در جریان و ولتاژ تولید نمی‌کند. این مقاله منتهی به ساخت نمونه نیمه‌صنعتی یک اتوبوستر حالت جامد می‌شود که قابلیت تنظیم ولتاژ در انتهای فیدر فشار ضعیف را دارد و بر روی پایه‌های برق بیرونی قابل اجراست.

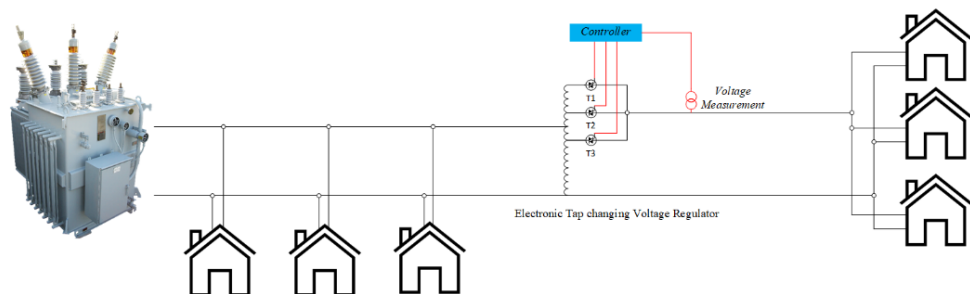
جدول ۱. مقایسه روش‌های جبر انسانی افت ولتاژ انتهای فیدرهای فشار ضعیف طولانی.

روش جبر انسانی	مزایا	معایب
۱ تنظیم‌کننده ولتاژ مبتنی بر مبدل الکترونیک قدرت [۹]	رفع مشکل به‌طور دایم پیوسته بودن ولتاژ خروجی خروج بدون ایجاد اختلال در صورت خرابی قابلیت‌های اضافی برای بهبود کیفیت توان	قیمت بالاتر از اتوبوستر الکترونیکی پیچیدگی بالا تلفات کلیدزنی بالاتر از اتوبوستر الکترونیکی طول عمر و قابلیت اطمینان کمتر از اتوبوستر
۲ اتوبوستر الکترونیکی (موتوردار یا تریستوری) [۴]	رفع مشکل به‌طور دایم هزینه بسیار پایین قابلیت اطمینان بالا	حجم بزرگ‌تر از مبدل الکترونیکی گسسته بودن تغییرات ولتاژ با توجه به تعداد تپ‌های موجود
۳ اتوبوستر معمولی [۳]	رفع مشکل به‌طور موقت هزینه نصب بسیار پایین	نیاز به تنظیم دستی در زمان‌های مختلف شبانه روز و فصل‌های مختلف سال
۴ احداث شبکه ۲۰ کیلوولت و نصب پست جدید	رفع مشکل به‌طور کامل	بسیار پرهزینه
۵ افزایش سطح مقطع کابل	کاهش تلفات اهمی شبکه فشار ضعیف	هزینه نصب بالا افزایش بارگذاری روی همه پایه‌ها برطرف نشدن کامل مشکل افت ولتاژ
۶ خازن‌گذاری معمولی	هزینه بسیار پایین بدون تلفات توان	پدیده رزونانس کنترل نداشتن روی ولتاژ طول عمر کم
۷ خازن سویچ‌شونده	هزینه بالاتر از خازن معمولی کنترل ولتاژ به‌صورت پله‌ای بدون تلفات توان	پدیده رزونانس طول عمر کم
۸ جزیره‌ای کردن بارهای دور و تغذیه از طریق DG	نیاز نداشتن به احداث شبکه جدید استقلال از شبکه سراسری	نیاز به ذخیره‌ساز انرژی (خورشیدی و ...) نیاز به تأمین سوخت فسیلی (دیزل)
۹ اتصال DG متصل به شبکه	جبران تلفات شبکه تزیق توان به شبکه	نیاز به ذخیره‌ساز انرژی (خورشیدی و ...) نیاز به تأمین سوخت فسیلی (دیزل) هزینه بالا کنترل ولتاژ قابل پیش‌بینی نیست

ساختار تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد (SSVR)

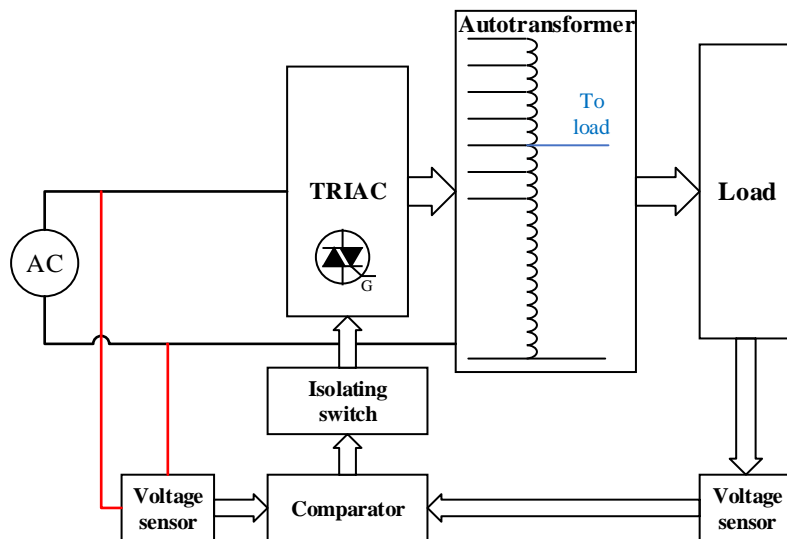
هدف از این مقاله اجرای یک SSVR است که به‌وسیله آن بتوان افت ولتاژ را برای تعدادی از مشترکین انتهای خط فشار ضعیف جبران کرد. شکل ۱ مفهوم نحوه به‌کارگیری این جبران‌سازی الکترونیکی در شبکه توزیع الکتریکی را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که این ایده برای اولین بار در کشور به‌صورت عملیاتی اجرا شده است که در این راستا نگارندگان

این مقاله، پروژه تحقیقاتی با عنوان «ساخت نمونه نیمه‌صنعتی تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد برای جبران افت ولتاژ انتهای فیدرهای فشار ضعیف با قابلیت نصب روی پایه» به شماره قرارداد ۳۱/۱۱۸۸ را بین دانشگاه لرستان و شرکت توزیع برق استان لرستان انجام دادند.



شکل ۱. نمایش مفهومی به کارگیری SSVR در فیدر شبکه توزیع.

شکل ۲ شماتیک کلی SSVR پیشنهادی را نشان می‌دهد که سه بخش اصلی ترانسفورماتور، سوئیچینگ تغییردهنده کویل‌ها در مدار ترانسفورماتور و بخش کنترلی مدار تشکیل شده است. در ادامه این اجزا به تفصیل بررسی می‌شوند.



شکل ۲. شماتیک کلی SSVR پیشنهادی و اجزای تشکیل دهنده آن.

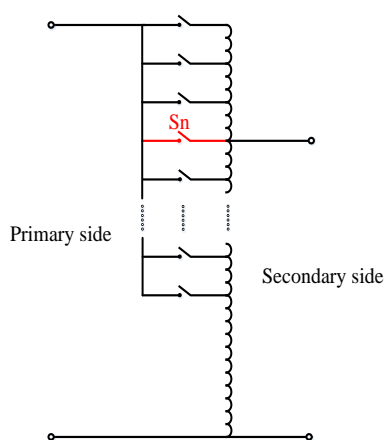
یکی از مهم‌ترین بخش‌های توسعه محصولات به‌ویژه در زمینه مهندسی برق ساخت نمونه آزمایشگاهی است. در نمونه آزمایشگاهی، همه جزییات و پیچیدگی‌های یک نمونه واقعی دیده می‌شوند در حالی که به دلیل توان نامی تجهیزات، هزینه‌های اعتبارسنجی به‌شدت کاهش می‌یابند. در این مقاله یک نمونه آزمایشگاهی جبران‌ساز ولتاژ حالت

جامد VA ۵۰۰ تک‌فاز با ولتاژ نامی خروجی ۲۲۰V ولت ساخته می‌شود که در ادامه نحوه طراحی و ساخت آن تشریح می‌گردد. شایان توجه است که نمونه صنعتی نهایی برای نصب بر روی فیذر توزیع یک جبران‌ساز تک‌فاز ۱۵KVA است که در واقع براساس مبانی نمونه آزمایشگاهی توسعه و ساخته می‌شود که در مقاله بعدی گزارش خواهد شد.

اتو ترانسفورماتور

ترانسفورماتور مؤلفه اصلی تغییردهنده ولتاژ SSVR است که گران‌ترین تجهیز مورد استفاده نیز می‌باشد. با بروز نوسانات ولتاژ فیذر، باید ترانسفورماتور توانایی تغییر مقادیر مختلف ولتاژ را داشته باشد تا در نهایت مصرف‌کننده را با ولتاژ ثابت تغذیه کند. برای این منظور ترانسفورماتور باید دارای کویل‌های مختلفی باشد تا با وارد کردن آنها در مدار، کاهش یا افزایش مناسب ولتاژ را انجام دهد. اتوترانسفورماتورها به دلیل داشتن تنها یک سیم‌پیچ نسبت به ترانسفورماتور معمولی با سیم‌پیچ‌های ایزوله، دارای هسته کوچک‌تر، حجم سیم‌پیچ کمتر، هزینه پایین‌تر و تلفات کمتر هستند بنابراین در اینجا از اتوترانسفورماتور استفاده شده است. شکل ۳ شماتیک مداری و اتوترانسفورماتور استفاده‌شده را نشان می‌دهد. واضح است که با تغییر ولتاژ ورودی به SSVR، باید تپ‌های از اتوترانسفورماتور (با بستن کلیدی مربوطه) وارد مدار شود که در نهایت ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور روی ۲۲۰V تنظیم شود. در اینجا یک مزیت مهم دیگر استفاده از اتوترانسفورماتور هویدا می‌شود و آن این‌که در شرایط عملکرد نرمال فیذر (یعنی زمانی که ولتاژ ورودی به SSVR برابر با ۲۲۰ ولت باشد)، کلید مربوط کویل‌های ۱/۱ بسته می‌شود و این یعنی این‌که هیچ‌یک از کویل‌ها به‌صورت سری با بار قرار نمی‌گیرد و جریان بار از سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتور عبور نمی‌کند و تقریباً تلفات سیم‌پیچ آن به صفر می‌رسد. بنابراین استفاده از اتوترانسفورماتور یک راه‌حل با راندمان بالا را ارائه داده است. شایان ذکر است که در این مرحله برای انجام آزمون‌های ابتدایی و برپایی ستاپ SSVR یک اتوترانسفورماتور VA ۵۰۰ انتخاب شده است تا پس از کسب نتایج موفق و دلخواه از آزمون بی‌باری و بارداری، اتوترانسفورماتور و SSVR در توان نامی نهایی ساخته و بهره‌برداری شود. قطعاً با موفقیت در مطالعات، برپایی و آزمون این SSVR آزمایشگاهی با توان VA ۵۰۰ و کسب دانش لازم در این زمینه، به‌سادگی می‌توان آن را برای توان‌های در رنج دلخواه توسعه داد.

در اینجا برای تنظیم خودکار ولتاژ در یک رنج وسیع، از ۱۲ تپ مختلف از ۱۴۰V تا ۲۵۰V با پله‌های ۱۰V استفاده شده است (پس از کاهش ولتاژ تا ۱۴۰V اتوترانسفورماتور و SSVR بار را قطع می‌کند و عملکرد حفاظتی انجام می‌گیرد). این بدین معنی است که با تغییر ولتاژ ورودی به SSVR در میانگین ۱۴۰V تا ۲۵۰V، می‌توان ولتاژ خروجی تحویلی به بار را در محدوده ۲۲۰V (با تغییرات کمتر از ۳ درصد) تنظیم کرد.



شکل ۳. شماتیک اتوترانسفورماتور (سمت راست) و اتوترانسفورماتور ۵۰۰VA انتخاب شده (سمت چپ).

کلیدزنی تپ‌های اتوترانسفورماتور

یکی از بخش‌های مهم تنظیم‌کننده ولتاژ، سویچ کردن تپ‌های اتوترانسفورماتور است. برای این منظور از کلیدهای تریایک^۱ استفاده شده است [۱۳]. به ۱۲ عدد تریایک برای تغییر وضعیت تپ‌ها اتوترانسفورماتور نیاز است. این کلیدها باید قابلیت عبور جریان نامی و تحمل رفتارهای هجومی و گذرای انتهای فیدر را داشته باشد. از این رو در این مرحله برای توان ۵۰۰ وات یک نمونه تریایک صنعتی ۷۰۰ ولت و ۴۰ آمپر استفاده شده است.

تریایک یک کلید نیمه‌رسانا است که با تحریک پایه گیت شروع به هدایت می‌کند. هدایت جریان می‌تواند در زاویه‌های ۰ تا ۱۸۰ درجه انجام شود. در صورتی که زاویه تحریک صفر درجه باشد، تریایک تمام جریان را در هر دو نیم چرخه مثبت و منفی عبور می‌دهد و مانند یک کلید معمولی رفتار می‌کند و در صورتی که پایه گیت آن تحریک نشود به صورت مدار باز عمل می‌کند و جریان را عبور نمی‌دهد. بنابراین در اینجا با انتخاب زاویه هدایت صفر، از این نیمه‌رسانا به عنوان کلید استفاده شده است. در اینجا فرکانس کلیدزنی بسیار پایین و برابر با ۵۰ هرتز است و همچنین کلیدزنی در جریان صفر اتفاق می‌افتد بنابراین تلفات کلیدزنی تریایک تقریباً برابر صفر است که این موضوع می‌تواند مزیت بسیار مهمی نسبت به IGBT و MOSFT (که عموماً برای برش سیکل ولتاژ به کار گرفته می‌شوند) تلقی شود. بنابراین تنها عامل تعیین‌کننده مقاومت و تلفات حالت هدایت است. با توجه به اینکه مقاومت حالت رسانایی تریایک از دو رقیب خود کمتر است؛ تلفات کمتری دارد و به هیت سینک کوچک‌تری برای خنک کردن نیاز دارد. از طرفی هزینه به کارگیری تریایک به مراتب از کلیدهای پیش‌گفته، کمتر است.

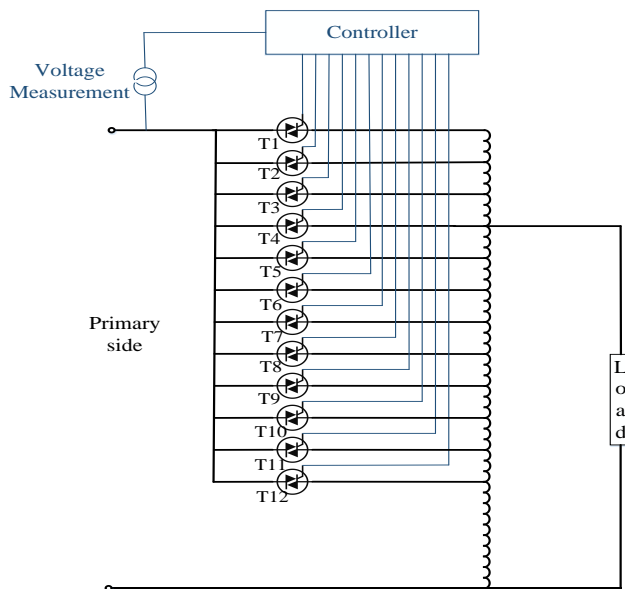
مدار کنترل کلیدزنی

یکی از مهم‌ترین بخش‌های اجرای SSVR، مدار کنترل برای آتش کردن تریایک است. در مدار کنترل، ولتاژ بار و فیدر اندازه‌گیری می‌شود و متناسب با میزان افت ولتاژ، تپ مناسب انتخاب می‌شود و سپس تریایک مربوط به آن براساس نقطه عبور صفر ولتاژ تحریک می‌شود. با توجه به ولتاژ خط باید پالس آتش به تریایک مناسب اعمال شود تا اتوترانسفورماتور از طریق تغییر تپ، ولتاژ بار را ثابت نگه دارد. به این منظور به یک مدار کنترلی برای تشخیص تریایک و تپ مناسب به‌ازای ولتاژهای متفاوت خط نیاز است [۱۴]. در مواردی مشاهده شده است که از سیستم کنترلی برمبنای

^۱ TRIAC

میکروکنترلر استفاده می‌شود که این موضوع در عمل و برای بلندمدت برای $SSVR$ مناسب نیست زیرا اغتشاشات مختلف و غیرقابل پیش‌بینی خط می‌تواند به‌سادگی میکروکنترلرهای همچون AVR ATmega8 را ریست کند [۱۵] (یا حتی آنها را دچار آسیب‌های غیرقابل برگشت کند) و $SSVR$ از مدار خارج شود که با توجه به دسترسی نداشتن همیشگی به $SSVR$ ، این موضوع مستلزم صرف نیروی انسانی و هزینهٔ بسیاری است. بنابراین در این مقاله از مدارات الکترونیکی آنالوگ مناسب برای کنترل پالس اعمالی به ترایاک‌ها استفاده شده است.

شکل ۴ مدار کنترلی پیشنهادی برای $SSVR$ را نشان می‌دهد. برای تشخیص ولتاژ فیدر نیاز است که ولتاژ خط اندازه‌گیری شود که به این منظور توسط یک‌سوساز پل دیودی ولتاژ خط به ولتاژ DC تبدیل می‌گردد و سپس ولتاژ DC به عنوان کمیت اصلی سنجش ولتاژ خط، وارد مقایسه‌کننده می‌شود. از یک مدار مقایسه‌کنندهٔ متشکل از آپ‌امپ^۱ برای مقایسه ولتاژ برخط با ولتاژ مرجع استفاده شده است تا سیگنال‌های مناسب برای ارسال به ترایاک‌ها ساخته شوند. در این تحقیق باید ۱۲ تپ اتوترانسفورماتور سوئیچ شوند بنابراین از ۳ آی‌سی LM339 (که مجموعاً دارای ۱۲ آپ‌امپ هستند) استفاده شده است. همه آپ‌امپ‌ها به یک ولتاژ ثابت با مقدار V_{ref} متصل می‌شوند. برای تشخیص مقدار مطلوب ولتاژ تولیدی اتوترانسفورماتور از طریق فرمان آپ‌امپ، از مقاومت‌های مقسم ولتاژ با مقدار برابر مطابق شکل ۵ استفاده شده است که $V_{input}+$ هر یک از آپ‌امپ‌ها به یک از سر این مقاومت‌ها متصل شده است.

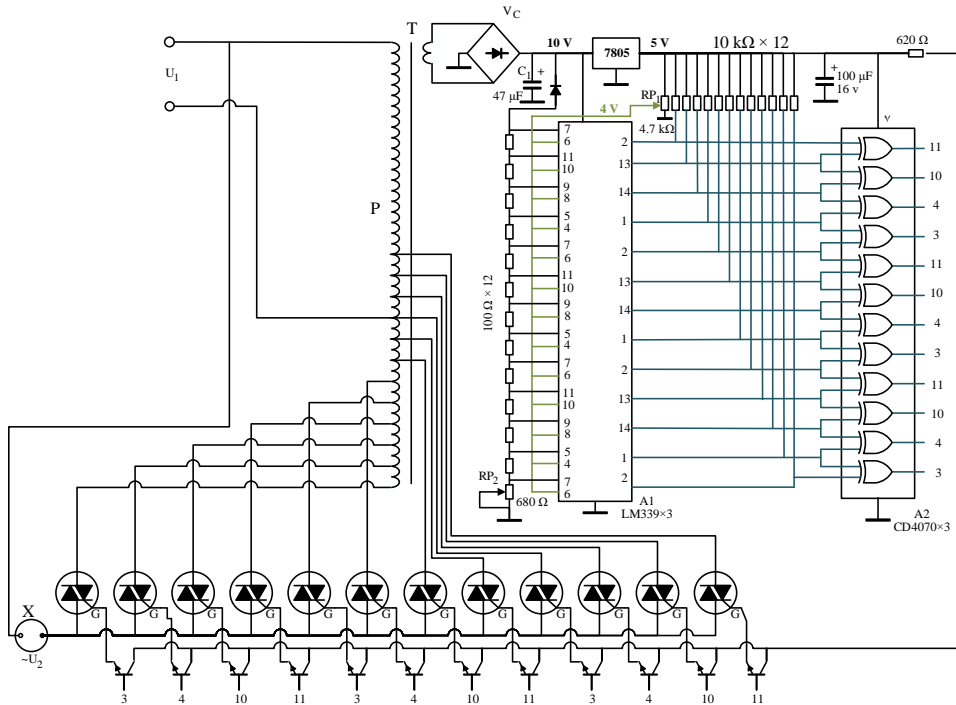


شکل ۴. تغییر تپ اتوترانسفورماتور با دستور کنترلر به ترایاک

به‌منظور جلوگیری از تداخل عملکرد ترایاک‌های مختلف (که باعث اتصال کوتاه شدن بعضی کوپل‌های اتوترانسفورماتور می‌شود) از XORS به‌صورت سری با مقایسه‌گر استفاده شده است که این موضوع در شکل (۵) نیز مشاهده می‌شود. این نکته در اینجا قابل ذکر است که اعمال ولتاژ منفی به‌عنوان سیگنال ورودی پایه‌های XOR غیرقابل قبول است بنابراین خروجی همه آپ‌امپ‌ها، با مقاومت ۱۰ کیلو اهم pull up شده‌اند. بدین ترتیب ورودی همه پایه‌های

¹ Operational Amplifier (Op-Amp)

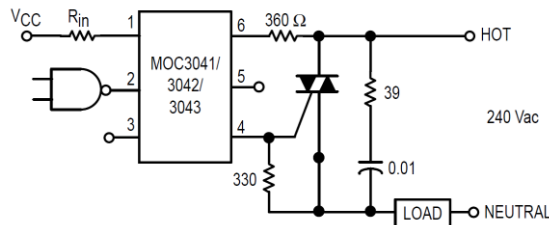
XORS یک هستند و چنانچه خروجی پایین‌ترین آپامپ صفر شود خروجی پایین‌ترین XOR یک شده و فرمان تراپاک متناظر با آن تولید خواهد شد. در صورتی که تغییرات ولتاژ شبکه بیشتر شود، خروجی‌های برخی دیگر از آپامپ‌ها نیز صفر خواهند شد و در نهایت یکی از XORs که یک ورودی آن یک و ورودی دیگر آن صفر باشد، یک می‌شود و فرمان روشن شدن تراپاک مربوط به آن، تولید خواهد شد. برای شفاف‌تر شدن موضوع باید گفت زمانی که ولتاژ فیدر کمترین مقدار خود را دارد (مثلاً 140 V)، ولتاژهای تقسیمی روی مقاومت‌ها کمترین مقدار خود را دارند و در این حالت فقط مقدار ولتاژ بالاترین مقاومت از V_{ref} بزرگ‌تر است در نتیجه فقط خروجی پایین‌ترین آپامپ صفر (حالت روشن) می‌شود. زمانی که ولتاژ فیدر بالاترین مقدار خود را دارد (مثلاً 250 V) ولتاژهای تقسیمی روی مقاومت‌ها بیشترین مقدار خود را دارند و در این حالت ولتاژهای تمام انشعاب‌های مقاومت‌ها از V_{ref} بزرگ‌ترند و در نتیجه خروجی همه آپامپ‌ها صفر (حالت روشن) می‌شوند. زمانی که ولتاژ فیدر بین مقدار مینیمم تا ماکزیمم باشد ولتاژ بعضی انشعاب‌های مقاومت‌ها مقسم ولتاژ از V_{ref} بزرگ‌تر می‌شوند و خروجی بعضی از آپامپ‌ها در وضعیت روشن قرار می‌گیرد. مقدار مقاومت‌ها به نحوی تنظیم شده‌اند که با تغییرات ولتاژ فیدر در استپ‌های 10 V ، آپامپ‌ها به ترتیب در وضعیت روشن قرار گیرند.



شکل ۵. شماتیک کلی SSVR با کنترل مدار آنالوگ.

سیگنال‌های تولیدی مدارهای دیجیتال مقایسه‌گر بایستی تراپاک‌های مدارت قدرت را آتش کنند بنابراین باید از یک مدار واسط مناسب برای این کار استفاده شود که خروجی مدار کنترل که یک سیگنال ۵ ولت است را به دستور مناسب برای قطع و وصل نمودن تراپاک تبدیل کند. در این مدار IC اپتوتراپاک MOC3041 استفاده شده است که قابلیت قطع و وصل تراپاک را در لحظه صفر ولتاژ فراهم می‌کند و به این ترتیب کمترین تأثیر را بر کیفیت شکل موج

ولتاژ و جریان بار می‌گذارد. شکل ۶ مدار اپتوتریاک MOC۳۰۴۱ همراه با اسنابر (محافظ تغییرات سریع ولتاژ) استفاده‌شده برای SSVR را نشان می‌دهد.



شکل ۶. مدار اپتوتریاک MOC۳۰۴۱ همراه با اسنابر استفاده‌شده برای SSVR.

به مدار یک‌سوساز در این سیستم نیاز است زیرا آی‌سی‌های مدار الکترونیکی را باید با ولتاژهای نامی تغذیه کند (که عموماً ۵V جریان مستقیم نیاز است) و همچنین اینکه برای تشخیص ولتاژ فیدر و جبران ولتاژ نیاز است که ولتاژ DC برای مدارهای مقایسه‌گر تولید شود. ابتدا ولتاژ خط از طریق یک ترانسفورماتور تک‌فاز کوچک ۲۲۰/۱۲ کاهش می‌یابد و سپس از طریق یک یک‌سوساز تمام موج، به DC تبدیل می‌شود. واضح است که ریپل بالای ولتاژ خروجی قابل قبول نیست بنابراین با موازی کردن فیلتر خازنی با خروجی یک‌سوساز کاهش یافته است.

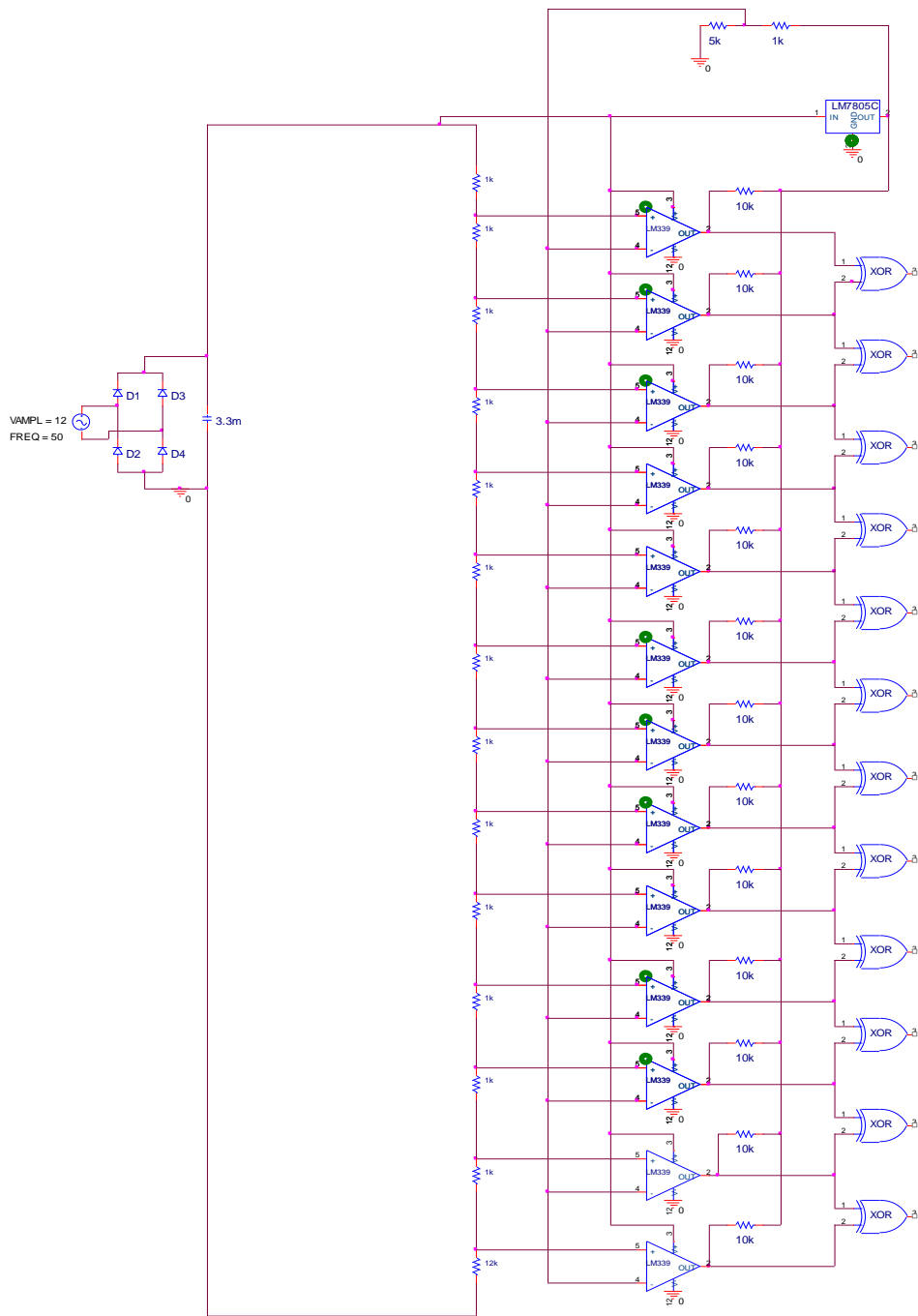
شبیه‌سازی PSPICE

نرم‌افزار Pspice یکی از نرم‌افزارهای قدیمی و نام آشنا در زمینه تحلیل و شبیه‌سازی مدارات آنالوگ است که در آن می‌توان مدارات الکترونیکی را ترسیم و شبیه‌سازی کرد. مدار تشخیص سطح ولتاژ و همچنین مقاومت‌های به‌دست‌آمده از نرم‌افزار MATLAB در نرم‌افزار PSPICE اجرا و در شکل ۷ نشان داده می‌شود. شکل‌های ۸ و ۹ نتایج خروجی نرم‌افزار PSPICE را نشان می‌دهند.

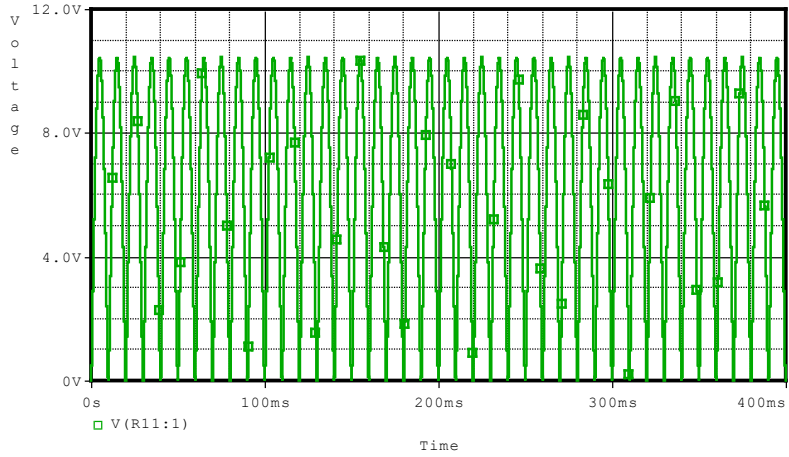
یکی از دشواری‌های ساخت تجهیز، اختلال در عملکرد آپامپ‌ها به دلیل نوسان ولتاژ خروجی یک‌سوساز بود زیرا این ولتاژ ملاک تخمین ولتاژ برق شهر و انجام مقایسه با مقدار ولتاژ DC مرجع است و نوسان بالای ولتاژ خروجی یک‌سوساز باعث تلاقی در روشن شدن تریاک‌ها و سوختن آنها می‌شود. شکل ۸ ولتاژ خروجی یک‌سوساز شبیه‌سازی شده را بدون خازن صافی و با وجود خازن صافی مناسب نشان می‌دهد. مقدار خازن صافی یک‌سوساز تمام موج تک‌فاز را از رابطه ۱ می‌توان تخمین زد:

$$C_e = \frac{1}{4fR} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{2}RF} \right) \quad (1)$$

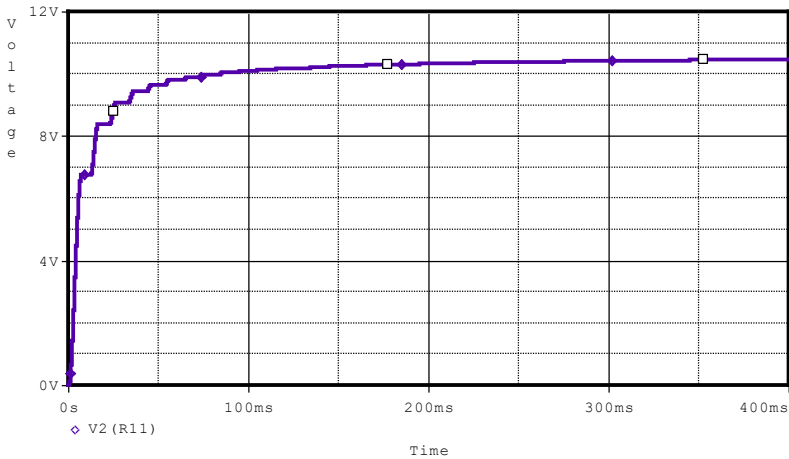
در این رابطه، f فرکانس برق ورودی، R مجموع بارهای مقاومتی قرار گرفته‌شده بر روی یک‌سوساز و RF مقدار نوسان ولتاژ DC خروجی یک‌سوساز است. با توجه به رابطه ۱، با در نظر گرفتن خازن $47\mu F$ می‌توان به نوسان کمتر از ۱ درصد رسید اما برای عملکرد بهتر یک‌سوساز، خازن $3.3mf$ برای تجهیز ساخته‌شده در نظر گرفته شده است. شکل ۹ پالس پیوسته خروجی یکی از آپامپ‌های مدار را در لحظه‌ای که ولتاژ برق شهر از مقدار مرجع آن بیشتر شده است نشان می‌دهد که این ولتاژ به عنوان پالس آتش باعث روشن شدن تریاک مربوط به آن می‌شود که این موضوع صحت عملکرد سیستم را نشان می‌دهد.



شکل ۷. اجرای مدار مقایسه‌گر برای تشخیص سطح ولتاژ شبکه.

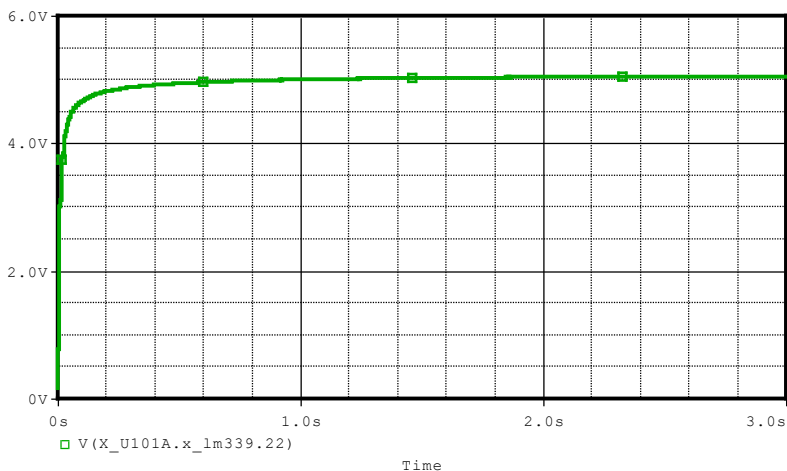


(الف)



(ب)

شکل ۸. ولتاژ DC خروجی یکسوساز و نوسان آن الف) بدون خازن صافی ب) با خازن صافی مناسب.

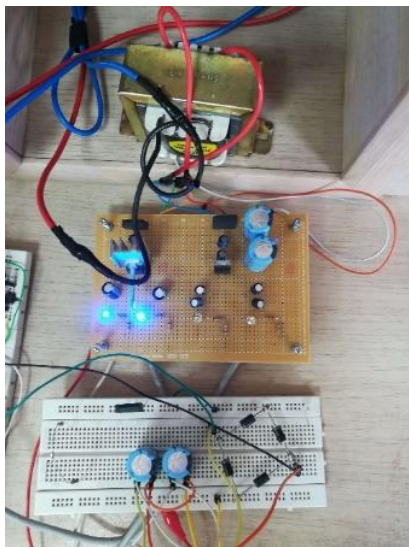


شکل ۹. ولتاژ خروجی آب‌پامپ زمان روشن شدن.

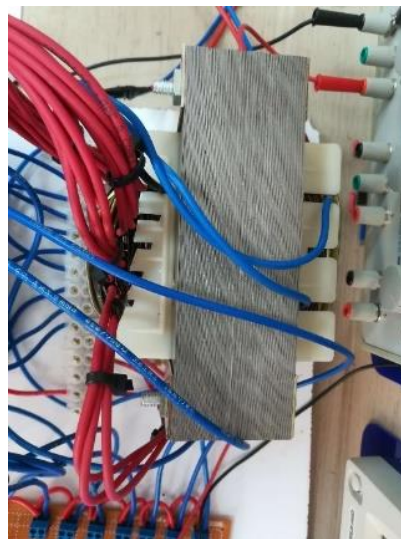
نمونه آزمایشگاهی ساخته شده

شکل‌های ۱۰ تا ۱۸ تصاویر مربوط به نمونه آزمایشگاهی ساخته شده را نشان می‌دهد. اتوترانسفورماتور ۱۲ سر ۵۰۰ وات به همراه ترمینال‌های آن در شکل ۱۰ نشان داده شده است. مدار تغذیه و ترانسفورماتور کاهنده ۲۲۰ به ۱۲ ولت در شکل ۱۱ ارائه شده است. همان‌طور که دیده می‌شود دو نمونه مختلف بررسی شده‌اند. در نمونه اول دو IC رگولاتور با استفاده یک یک‌سوساز تمام موج مجتمع ساخته شده ولی در نمونه دوم از دیوهای جداگانه بر روی بردبرد استفاده شده است. شکل ۱۲ مدار قدرت کلیدهای تریاک را بر روی خنک‌کننده نشان می‌دهد. در هر لحظه از عملکرد مدار، تنها یکی از تریاک‌ها در حالت هدایت کار می‌کند بنابراین هیستیسک قادر است به‌طور مؤثر گرمای تولیدشده را در کلید به محیط بیرون انتقال دهد. مدار کنترل‌کننده شامل مدار مقایسه‌گر و همچنین ICهای XOR در شکل ۱۳ نشان داده شده‌اند.

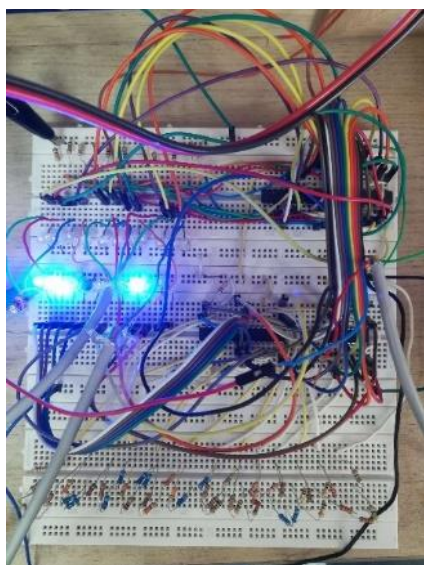
مدار کنترلر سطح ولتاژ شبکه را تشخیص می‌دهد و متناسب با آن یکی از کلیدهای تریاک را برای داشتن ولتاژ ۲۲۰ ولت در خروجی تحریک می‌کند. شکل ۱۴ مدار راه‌انداز درایورها را نشان می‌دهد. این مدار قادر است خروجی مدار کنترلر گه یک سیگنال ۵ ولت است را به دستور مناسب برای قطع و وصل کردن تریاک تبدیل کند. در این مدار IC درایور MOC۳۰۴۱ استفاده شده است که قابلیت قطع و وصل تریاک را در صفر ولتاژ فراهم می‌کند و به این ترتیب کم‌ترین اثر را بر روی کیفیت شکل موج ولتاژ و جریان بار می‌گذارد. شکل‌های ۱۵ تا ۱۷ بخش‌های اصلی مدارهای مونتاژشده را نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. برد تغذیه و کاهنده ولتاژ AC.



شکل ۱۰. اتوترانسفورماتور ۵۰۰ وات.



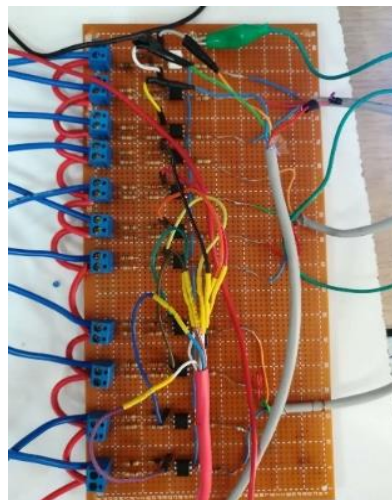
شکل ۱۳. اجرای کنترل‌کننده اصلی و مقایسه‌گر.



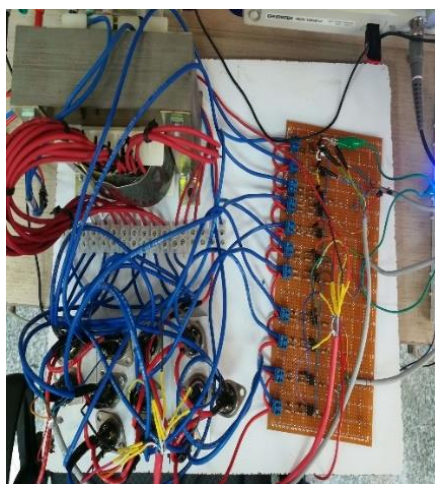
شکل ۱۲. مدار قدرت در بردارنده ۱۲ عدد تراپاک بر روی هیتسینک.



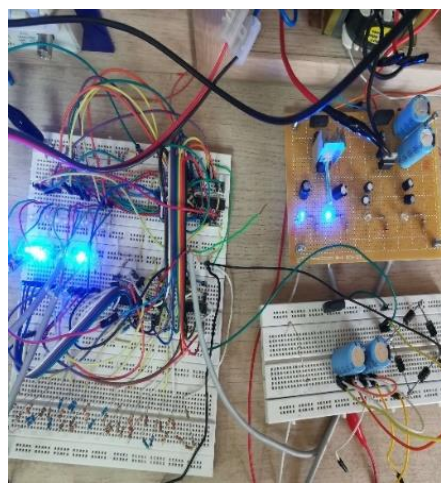
شکل ۱۵. مدار قدرت شامل کلیدها و اتوترانسفورماتور.



شکل ۱۴. برد ICهای درایور ترایاک.

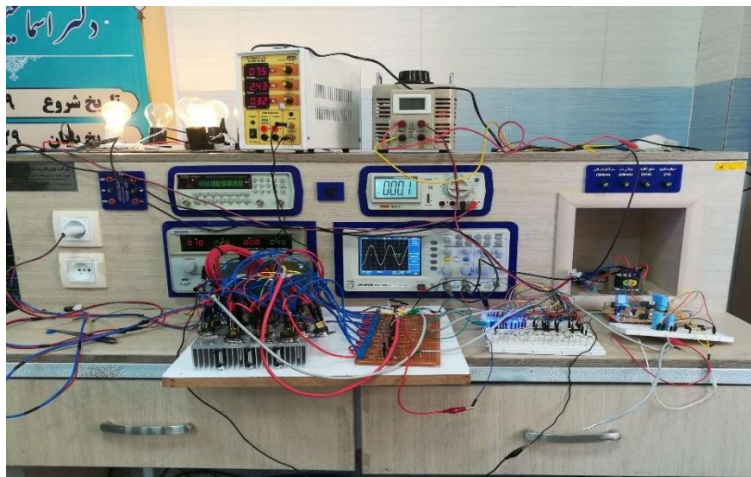


شکل ۱۷. مدار قدرت و درایورهای ترایاک.



شکل ۱۶. برد تغذیه و کنترل در حالت روشن.

چیدمان کامل نمونه آزمایشگاهی SSVR در شکل ۱۸ نشان داده شده است. در این مدار یک بار ۵۰۰ وات با استفاده از ۵ عدد لامپ ۱۰۰ وات ساخته و برای آزمایش استفاده می‌شود. اندازه‌گیری شکل موج ولتاژ خروجی از طریق یک مقاومت یک اهم ۵ وات انجام می‌شود که به صورت سری با سیم نول بار متصل می‌شود. پتانسیل روی دو سر این مقاومت کمتر از ۱۰ ولت است و به‌طور مستقیم برای اندازه‌گیری به اسیلوسکوپ متصل می‌شود. شکل موج ولتاژ دو سر مقاومت که در واقع با جریان بار برابر است در شکل ۱۸ قابل مشاهده است. همان‌طور که دیده می‌شود شکل موج به‌دست‌آمده فاقد هر گونه گذرا و مقدار هارمونیک آن نیز نزدیک به یک درصد است. علاوه بر این، مدار به‌صورت پیوسته در حالت روشن نگه داشته شد و هیچ‌گونه افزایش دمایی در سطح هیئت‌سینک مشاهده نگردید.



شکل ۱۸. چیدمان کامل نمونه آزمایشگاهی و شکل موج جریان لامپ در حالت عملکرد SSVR.

نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت SSVR برای جبران افت ولتاژ تعدادی از مشترکین شرکت توزیع برق که دارای افت ولتاژ هستند بررسی شد. جزئیات مربوط به ساخت نمونه آزمایشگاهی SSVR، ۵۰۰ ولت آمپر ارائه گردید. قطعات مختلف معرفی و نحوه به‌کارگیری آنها در سیستم اصلی تشریح شدند. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که SSVR ساخته‌شده قابلیت تنظیم ولتاژ را به محدوده قابل‌قبول در زیر بار دارد. علاوه بر این کیفیت برق تحویل‌شده به بار نیز تحت تأثیر عملکرد این سیستم قرار نمی‌گیرد. به‌طور کلی نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهند که تجهیز دارای کارایی بالایی در جبران‌سازی افت ولتاژ ناشی از فیدرهای طولانی فشارضعیف است. نمونه ساخت تنظیم‌کننده ولتاژ نیمه‌صنعتی در مقاله آتی ارائه می‌گردد.

تشکر و قدردانی

پژوهش حاضر توسط شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان براساس قرارداد پژوهشی بین دانشگاه لرستان و شرکت توزیع نیروی لرستان به شماره ۳۱/۱۱۸۸ حمایت شد. از مسئولین پارک علم و فناوری لرستان و مرکز رشد واحدهای فناور خرم‌آباد نیز به دلیل فراهم کردن محیط آزمایشگاهی برای ساخت سیستم حاصل‌شده تشکر و قدردانی شود. علاوه بر این از آقای مهندس کمالوند، کمال تشکر را داریم.

References

- [1] Quevedo, J. d. O., Cazakevicius, F. E., Beltrame, R. C., Marchesan, T. B., Michels, L., Rech, C., & Schuch, L. (2017). Analysis and Design of an Electronic On-Load Tap Changer Distribution Transformer for Automatic Voltage Regulation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 64(1), 883-894. <https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2592463>
- [2] Mikhak-Beyranvand, M., Faiz, J., Rezaei-Zare, A., & Rezaealam, B. (2020). Electromagnetic and thermal behavior of a single-phase transformer during Ferroresonance considering hysteresis model of core. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 121, 106078. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106078>

- [3] Bedford, B. D. (1993). *Electric Control Circuit* .(1,914,192). General Electric Company. [https://www.google.com/books/edition/Official Gazette of the United States Pa/xd10UDeIzO0C?hl=en&gbpv=1&dq=Patent+No.+1,914,192.+13+Jun.+1933&pg=PA491&printsec=frontcover](https://www.google.com/books/edition/Official_Gazette_of_the_United_States_Pa/xd10UDeIzO0C?hl=en&gbpv=1&dq=Patent+No.+1,914,192.+13+Jun.+1933&pg=PA491&printsec=frontcover)
- [4] Schatz, R. A. (1966). *Electronic load tap changer systems*. (US3275929A). Westinghouse Electric Corporation. <https://patents.google.com/patent/US3275929A/en?q=US3275929A>
- [5] Siemens Energy. (2013). *Voltage Regulators*. Siemens-energy. <https://www.siemens-energy.com/global/en/offerings/power-transmission/portfolio/transformers/voltage-regulators.html>
- [6] Thompson, R. (1968). A Thyristor Alternating-Voltage Regulator. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industry and General Applications*, IGA-4(2), 162-166. <https://doi.org/10.1109/TIGA.1968.4180871>
- [7] Fernández, S. M., García, S. M., Olay, C. C., Rodríguez, J. C. C., García, R. V., & López, J. V. (2018). Electronic Tap Changer for Very High-Power Medium-Voltage Lines With No Series-Parallel Thyristors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 65(7), 5237-5249. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2777380>
- [8] Garcia, S. M., Rodriguez, J. C. C., Jardini, J. A., Lopez, J. V., Segura, A. I., & Cid, P. M. (2009). Feasibility of Electronic Tap-Changing Stabilizers for Medium Voltage Lines—Precedents and New Configurations. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery*, 24(3), 1490-1503. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2021032>
- [9] Mouli, G. R. C., Bauer, P., Wijekoon, T., Panosyan, A., & Bärthlein, E. M. (2015). Design of a Power-Electronic-Assisted OLTC for Grid Voltage Regulation. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Power Delivery*, 30(3), 1086-1095. <http://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2371539>
- [10] Kadurek, P., Cobben, J. F. G., & Kling, W. L. (2011, May 8-11). *Smart transformer for mitigation of voltage fluctuations in MV networks*. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Rome, Italy. <https://doi.org/10.1109/EEIC.2011.5874838>
- [11] Ismail, A. A. A., Alsuwaidi, H., & Elnady, A. (2021). Automatic Voltage Stabilization Using IGBT Based on Load Tap Changer With Fault Consideration. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 9, 72769-72780. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3079507>
- [12] Lima, R. N. D. C., & Macedo, J. R. (2022). A Novel Switching Methodology for Low Voltage Static Regulators. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Access*, 10, 20745-20763. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3152205>
- [13] Maschinenfabrik Reinhausen. (2023). *On-Load Tap-Changers*. MR. <https://www.reinhausen.com/portfolio/on-load-tap-changers>
- [14] Servetas, E. C., & Vlachakis, A. V. (1981). A New AC Voltage Regulator Using Thyristors. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation*, IECI-28(2), 140-145. <https://doi.org/10.1109/TIECI.1981.351040>
- [15] Kersting, W. H. (2009, March 15-18). *The modeling and application of step voltage regulators*. 2009 Institute of Electrical and Electronics Engineers/Power and Energy Society Power Systems Conference and Exposition., Seattle, WA, USA. <https://doi.org/10.1109/PSC.2009.4840004>