



Intelligent Solid-State Voltage Regulator for Voltage Drop Compensation at the End of Low-Voltage Distribution Networks

Morteza Mikhak-Beyranvand^{1*}, Houman Bastami², Amirhossein Farhadian³,
Ebrahim Sharifipour⁴

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

²Assistant Professor, Faculty of Engineering, Lorestan University, Khorramabad, Lorestan, Iran.

³Assistant Professor, Photonic and Quantum Technology Institute, Nuclear Science and Technology Institute, Atomic Agency, Tehran, Iran.

⁴Manager of the Research Office, Lorestan Province Electricity Distribution Company, Khorramabad, Iran.

ARTICLE INFO

Received: 04.11.2023

Revised: 07.27.2023

Accepted: 08.30.2023

Keyword:

Low Voltage Distribution Network
Voltage Drop Compensation
Solid State Switching
Intelligent Protection

*Corresponding Author:

Morteza Mikhak-Beyranvand

Email: mbeyranvand@tvu.ac.ir

ABSTRACT

Severe voltage fluctuations at different points of the network are the main concerns of the widespread low-voltage electrical energy distribution networks. In particular, small industrial loads and rural consumers in remote geographical areas, which are fed by long lines, always experience great voltage drops. The use of common distribution transformers equipped with off-load tap changers has not been effective in solving this problem due to issues such as lack of access to all network points for operators, the need to de-energize the line during tap change, and the successive and unpredictable load changes. Therefore, the use of transformers with automatic voltage adjustment at different points of distribution networks has attracted much attention. The present research aimed to implement a simple solid-state voltage regulator (SSVR) in the low power range to automatically eliminate severe voltage fluctuations. In this research, a solid-state voltage regulator with a rated power of 5 KVA was designed and built to automatically compensate for the voltage of a small group of home customers (who have a severe voltage drop due to the distance from the distribution post). The results of the measurements showed that this equipment can limit the voltage changes to $220 \pm 3\%$, while it does not affect the power quality. In addition, various hardware and software protections were designed for the device built against network disturbances and abnormal consumer functions.



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Severe voltage fluctuations in the different points of the network are one of the serious concerns of the widespread low-voltage electrical energy distribution networks. In particular, small industrial loads and rural consumers in remote geographical areas, which are fed by long lines, always experience large voltage drops. The use of common distribution transformers equipped with off-load tap changers has not been effective in solving this problem due to such issues as the lack of access to all network points for operators, the need to de-energize the line during tap change and the successive and unpredictable load changes. Therefore, the use of transformers with automatic voltage adjustment at different points of distribution networks has been given much attention. This paper aimed to implement a simple solid-state voltage regulator (SSVR) in the low power range to automatically eliminate severe voltage fluctuations.

Methodology

In this research, a solid-state voltage regulator with a rated power of 5 KVA was designed and built to automatically compensate for the voltage of a small group of home customers (who have a severe voltage drop due to the distance from the distribution post). In addition to automatically adjusting the voltage at the end of the feeders, this SSVR will also meet the goals of protecting consumers, neutralizing sudden voltage fluctuations and quick response to sudden changes in voltage. The proposed SSVR consists of three main parts, including the autotransformer, the switches that change the coils in the transformer circuit, and the control part. In this research, to automatically adjust the voltage in a wide range, the selected autotransformer had 15 different taps from 140V to 250V with 5V and 10V steps (after reducing the voltage to 150V, the autotransformer and SSVR cut off the load and the protective function). Switching of autotransformer taps was done through triac switches, which require 15 triacs to change the state of the taps. The 32-bit ARM microcontroller (digital control system) was used as the main processor of SSVR, which performs the main programming of switching, software protections, entering the bypass circuit, and controlling the output voltage. The 3.3V analogue signals of the microcontroller output were applied as input to the driver circuit of the triacs. MOC3023 optotriac was used as the driver of triacs. This optotriac has the task of isolating the power circuit from the electronic circuit. A zero current switching strategy was used to turn on the triacs. Figure (1) shows the general schematic of the product, including the control circuit, interface circuits, and switching.

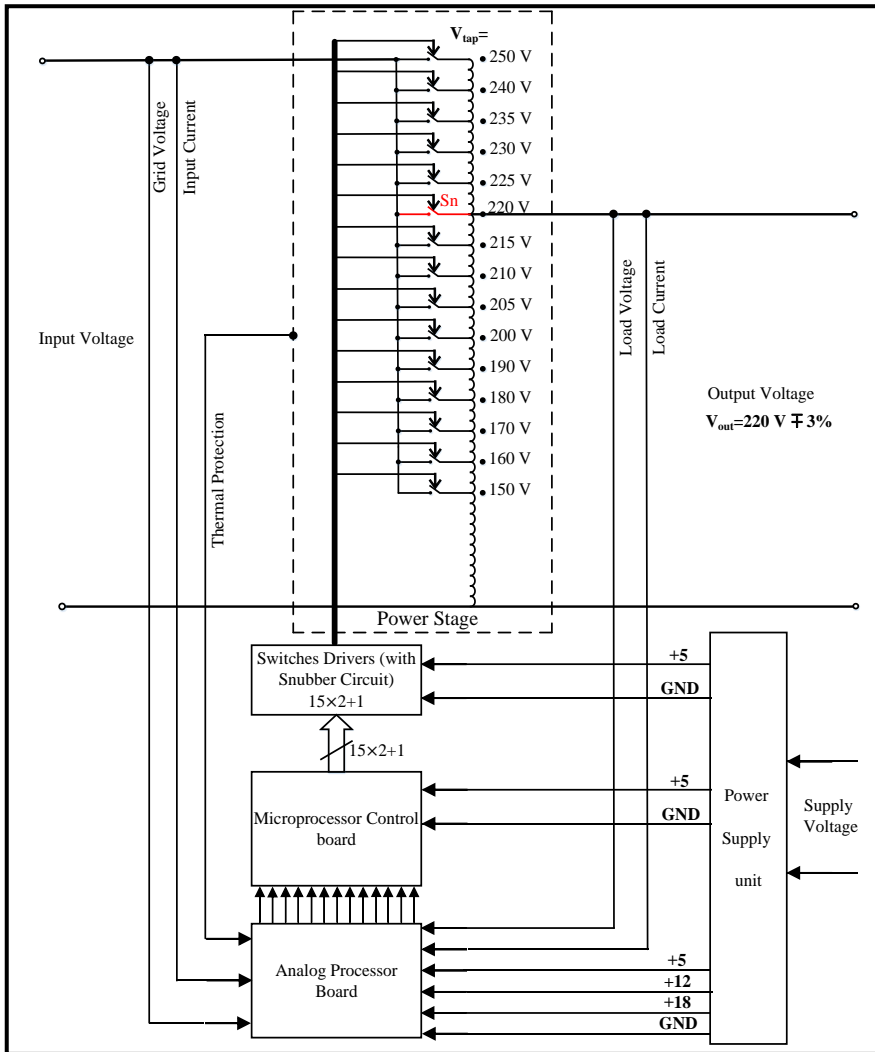


Figure 1. General control schematic of the proposed solid state voltage regulator circuit.

To increase flexibility, three general operating modes were considered for this SSVR. To set the working mode of the voltage regulator, a three-position rotary switch was built into the device. In the first operating mode, the input and output of the device were simultaneously separated from the power grid and the load and the device was placed in an isolated state, meaning that the device was turned off. In the second operating mode, the load was directly connected to the network in such a way that the input phase to the device was directly connected to its output phase and the voltage regulator section (including autotransformer, digital control system, driver, semi-switches and conductor) was completely removed from the circuit. In the third operating mode, a digital control system based on model predictive control (MPC) was used for intelligent control of the SSVR. The device adjusts the output voltage in the set reference value by relying on digital control

based on MPC. The digital control system continuously monitors the performance of the voltage regulator device and performs the necessary control measures according to the device's operating state. In the third operating mode, to increase the reliability of the SSVR 5kVA, another bypass mode named "automatic bypass" was designed and built. The automatic bypass circuit was designed to protect the SSVR device increase its life and prevent common power outages.

Results and discussion

To evaluate the performance of SSVR, two energy meters (with the ability to measure and store electrical parameters) were installed on the input and output of SSVR. For an accurate and comprehensive evaluation, the input and output electrical parameters of SSVR were stored and recorded hourly by the meters for 22 days. As seen in Figure (2), the SSVR was capable of delivering the low voltage of the network in a desirable range to the consumer, confirming the very good performance of this equipment. Based on the measured currents and power factor, the low losses of the equipment and its lack of impact on the power quality and power factor of the network were confirmed.

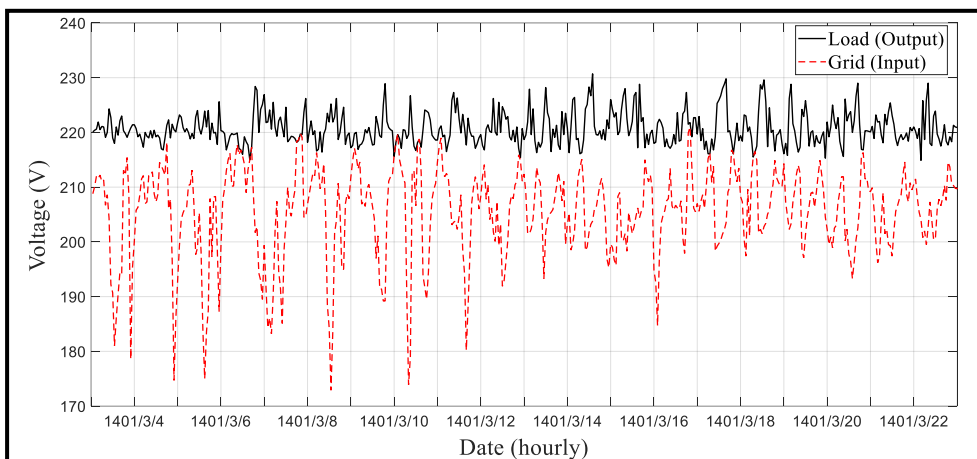


Figure 2. SSVR input and output voltage measured in 22 days.

Conclusion

In the present research, the design and construction of SSVR to compensate for the voltage drop of several home subscribers who had voltage drop was investigated. The results of the measurements showed that this equipment can limit the voltage changes to $220 \pm 3\%$, while it does not affect the power quality. In addition, various hardware and software protections were designed for the device built against network disturbances and abnormal consumer functions.



شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۲۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶



تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد هوشمند برای جبران افت ولتاژ انتهای فیدرهای فشار ضعیف

مرتضی میخک بیرانوند^{۱*}، هومن بسطامی^۲، امیرحسین فرهادیان^۳، ابراهیم شریفی‌پور^۴

- ۱- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.
- ۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران.
- ۳- استادیار، پژوهشکده فوتونیک و فناوری‌های کوانتومی، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، تهران، ایران.
- ۴- مدیر دفتر تحقیقات، شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان، خرم‌آباد، ایران.

چکیده

اطلاعات مقاله

نوسانات شدید ولتاژ نقاط مختلف شبکه، یکی از دغدغه‌های جدی شبکه‌های جدی شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی فشار ضعیف گسترده است. به خصوص این که بارهای صنعتی کوچک و مصرف‌کننده‌های روستایی در مناطق جغرافیایی دور دست که از خطوط طولانی تغذیه می‌شوند، همواره افت ولتاژهای زیادی را تجربه می‌کنند. استفاده از ترانسفورماتورهای توزیع متداول مجهز به تپ چنجرهای غیرقابل تغییر زیر بار، به دلیل مشکلاتی از قبیل عدم دسترسی همه نقاط شبکه برای اپراتورها، لزوم بی انرژی کردن خط در هنگام تغییر تپ و تغییر مدام و غیرقابل پیش‌بینی بارها، برای رفع این مشکل خیلی راهگشا نبوده است. از این رو به کارگیری ترانسفورماتورهای با تنظیم خودکار ولتاژ در نقاط مختلف شبکه‌های توزیع، مورد توجه زیادی قرار گرفته است. هدف از این مقاله، عملیاتی کردن یک رگولاتور ولتاژ حالت-جامد (SSVR) ساده در محدوده توان‌های پایین برای حذف خودکار نوسانات شدید ولتاژ است. در این پژوهش، یک تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد با توان نامی ۵ kVA برای جبران‌سازی خودکار ولتاژ گروه کوچکی از مشترکین خانگی (که به دلیل دوری از پست توزیع دارای افت ولتاژ شدید هستند) طراحی و ساخته شده است. نتایج اندازه‌گیری‌ها نشان می‌دهد که این تجهیز می‌تواند ولتاژ را در محدوده $220V \pm 3\%$ بدون کاهش کیفیت توان تنظیم نماید. علاوه بر این، در محصول ساخته شده حفاظت‌های مختلف سخت‌افزاری و نرم‌افزاری برای مواجهه با اغتشاشات شبکه و عملکردهای غیر نرمال مصرف‌کننده اندیشیده شده است.

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۱/۲۲

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۵/۰۵

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۸

کلید واژگان:

شبکه توزیع فشار ضعیف
جبران‌سازی افت ولتاژ
کلیدزنی حالت جامد
حفاظت هوشمند

*نویسنده مسئول: مرتضی میخک

بیرانوند

پست الکترونیکی:

mbeyranvand@tvu.ac.ir



مقدمه

بحث تنظیم ولتاژ در شبکه‌های قدرت همواره از دغدغه‌های مهم صنعت برق بوده است. به این منظور در شبکه‌های فشار متوسط (MV)^۱ و فشار قوی (HV)^۲ از ترانسفورماتورهای مجهز به تپ چنجر قابل قطع و وصل زیر بار، به صورت گسترده استفاده شده است. عموماً در تپ چنجرهای مورد استفاده در شبکه‌های MV و HV از کنترل‌کننده‌های الکترومکانیکی تغییر دهنده تپ‌ها استفاده می‌شود که برای تنظیم ولتاژ، به صورت خودکار تعدادی دور سیم‌پیچی به سمت فشار قوی افزوده یا کاسته می‌شود. این تپ چنجرها قیمت بسیار زیادی دارند که این موضوع مانع استفاده آنها در شبکه‌های توزیع شده است از طرفی مسائلی از قبیل استهلاک بالا، تلفات اضافی، عدم پاسخ سریع به تغییرات زیاد ولتاژ، کنترل پذیری پایین، آرک زدن و کربنیزه شدن اتصالات و کاهش کیفیت عایقی روغن به علت کموتاسیون‌های مکانیکی تپ‌ها، همواره به عنوان چالش بزرگی برای ترانسفورماتورهای شبکه‌های قدرت محسوب شده است [۱]. در شبکه توزیع عموماً از تپ چنجرهای ۳ حالت و ۵ حالت استفاده می‌شود. اما این تپ چنجرها به صورت دستی تنظیم می‌شوند و غیر قابل قطع و وصل در زیر بار هستند. علی‌رغم هزینه پایین، این گونه از تپ چنجرها قابلیت تنظیم خودکار و برخط ولتاژ را ندارند و تغییر تپ تنها توسط اپراتور و بعد از بی برق نمودن سمت فشار قوی ترانسفورماتور امکان‌پذیر است. این موضوع باعث عدم ثابت نگه داشتن سطح ولتاژ مشترکان در بازه‌های زمانی مختلف، تحمیل هزینه و وقفه در برق رسانی خواهد شد. علاوه بر این، در موارد بسیاری دیده می‌شود که خرابی و عدم عملکرد صحیح کلید تنظیم ولتاژ، بروز مشکلاتی از جمله جریان گردشی، افزایش تلفات توان و نامتعادلی ولتاژ خروجی ترانسفورماتور را در پی دارد [۲؛ ۳].

امروزه با توجه به گستردگی شبکه‌های انرژی، ترانسفورماتورهای مجهز به تپ‌چنجرهای الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته‌اند به صورتی که حتی این ترانسفورماتورها برای شبکه‌های MV نیز عملیاتی شده‌اند [۴؛ ۵]. اما بیشترین توجه‌ها معطوف به ترانسفورماتورهای مجهز به تپ چنجرهای قابل قطع زیر بار (OLTC)^۳ در شبکه‌های توزیع شده است که با توجه گسترش روز افزون شبکه‌های توزیع، در آینده به توسعه گسترده‌تر این نوع ترانسفورماتورها نیاز است [۶]. از طرفی تولیدات پراکنده (DG)^۴ به خصوص نیروگاه‌های خورشیدی، در شبکه‌های توزیع به شدت در حال گسترش هستند و در آینده‌ای نزدیک سهم بیشتری از تولید انرژی را به خود اختصاص خواهند داد. تزریق توان‌های تولیدی DG به شبکه باعث می‌شود که نوسانات ولتاژ به صورت مکرر اتفاق بیفتند و شاهد افزایش ولتاژ در کل شبکه‌های توزیع باشیم در این صورت پیش‌بینی منحنی‌های بار و ولتاژ فیدرهای توزیع کار بسیار سختی خواهد شد و تپ‌چنجرهای مکانیکی عملاً کارایی نخواهند داشت چرا که تغییرات دائم تپ‌ها مکانیکی امکان‌پذیر نیست [۶]. با استفاده از کلیدهای حالت جامد (نیمه هادی‌ها) می‌توان بر مشکلات تپ‌چنجرهای مکانیکی غلبه کرد. با توجه به پیشرفت تجهیزات نیمه‌هادی، تپ چنجرهای مکانیکی وابسته به تجهیزات الکترونیکی و تپ چنجرهای تمام الکترونیکی مجهز به کلیدهای حالت جامد در سیستم‌های توزیع تا به امروز عملیاتی شده‌اند [۷]. مرجع [۸] به بررسی محدود کننده جریان اتصال کوتاه در فرآیند کموتاسیون ترانسفورماتورهای با تپ چنجر الکترونیکی پرداخته است و اهمیت این موضوع را نشان داده است. تپ چنجرهای الکترونیکی علاوه بر تنظیم خودکار ولتاژ، قابلیت برقراری ارتباط و کنترل از راه دور را دارند که این موضوع می‌تواند بسیار جذاب و ترغیب‌کننده برای بهره‌بردارهای شبکه‌های برق باشد. چرا که می‌توان از آنها برای مانیتورینگ، انعطاف‌پذیری در ریز شبکه‌ها و کنترل بار به‌خوبی بهره برد. به تازگی بحث ترانسفورماتورهای کوچک تنظیم‌کننده ولتاژ با تپ چنجر الکترونیکی مورد توجه قرار گرفته است و مزایای آن به‌خوبی آشکار شده است به نحوی که می‌تواند بسیاری

¹ Medium Voltage (MV)

² High Voltage (HV)

³ On-Load Tap-Changer (OLTC)

⁴ Distributed Generator (DG)

از معضلات سیستم‌های توزیع گسترده را برطرف کند [۹؛ ۱۰]. بنابراین این مقاله بر روی تحلیل و توسعه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد^۱ (SSVR) متمرکز شده است.

شبکه توزیع انرژی الکتریکی فشار ضعیف در بعضی از مناطق (از جمله 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. گاهی اوقات نیز بارهای صنعتی با نوسانات شدید بار که از طریق خطوط با امیدانس بالا تغذیه می‌شوند نوسانات گسترده ولتاژ را در پی دارد. به کارگیری SSVR اتوماتیک می‌تواند انعطاف پذیری بالا و هزینه کم برای تثبیت ولتاژ در سراسر شبکه توزیع ایجاد کند [۱۱]. این تنظیم‌کننده‌های ولتاژ بر خلاف ترانسفورماتورهای توزیع، سطح ولتاژ شبکه را تغییر نمی‌دهند بلکه صرفاً نوسانات ولتاژ را در شبکه فشار ضعیف، حذف می‌کنند. از این رو در این مقاله معطوف به بررسی و پیاده‌سازی SSVR اتوماتیک توان پایین شده است. هدف از این تحقیق پیاده‌سازی به این منظور یک SSVR با توان ۵KVA با ولتاژ نامی ۲۲۰V است که به وسیله آن بتوان نوسانات و افت ولتاژ را برای بخش‌های از شبکه توزیع با شرایط مذکور خنثی کند. SSVR برای حذف نوسانات ولتاژ انتهایی فیدرهای توزیع توسعه و ساخته شده است که به سادگی با نصب بر روی شبکه توزیع، ولتاژ مصرف‌کننده‌های انتهایی خط را به صورت کنترل شده و بدون نوسان تأمین می‌کند و 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 و... نیز برآورده خواهد شد.

حفظ ولتاژ مشترکین در محدوده مجاز، در شبکه‌های توزیع مدرن از اهمیت بالایی برخوردار است و توجه محققین بسیاری را معطوف خود ساخته است. در [۱۲] دو حالت کنترل محلی و راه دور برای کنترل بهینه تنظیم‌کننده‌های ولتاژ ارائه شده است. در [۱۳]، چگونگی حذف نوسانات ولتاژ ناشی از منابع انرژی تجدیدپذیر در شبکه‌های توزیع فعال با استفاده از ترانسفورماتورهای هوشمند بررسی شده است. همچنین، در [۱۴] مشکل نوسانات ولتاژ ناشی از نفوذ بالای سیستم‌های فتوولتائیک و چگونگی برطرف نمودن آن با استفاده از تنظیم‌کننده ولتاژ مطالعه شده است. با این حال، جزئیات سیستم کنترل و نکات فنی مربوط به پیاده‌سازی عملی این تجهیزات تنظیم‌کننده ولتاژ بررسی نشده است. در [۱۵] یک تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد مبتنی بر سیستم کنترلی آنالوگ توسط نویسندگان مقاله حاضر ارائه شد اما این سیستم قابلیت برنامه‌ریزی محدودی داشت و در برابر رفتارهای نامتعارف مشترکین خانگی یا اغتشاشات شبکه قدرت عملکرد ضعیفی داشت. در این مقاله تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد با کنترل‌کننده دیجیتال توسعه داده شده است که با برطرف‌سازی محدودیت‌های قبلی، قابلیت‌های عملکردی و حفاظتی برای سیستم طراحی و اعمال خواهد شد. ساختار سیستم پیشنهادی در بخش دوم مقاله تشریح شده است. ساختار کنترل‌کننده دیجیتال در بخش سوم و حفاظت‌های هوشمند در نظر گرفته شده برای سیستم در بخش چهارم بیان گردیده است. نتایج مرتبط با به کارگیری عملیاتی دستگاه در شبکه توزیع برق واقعی در بخش پنجم ارائه شده و در نهایت مقاله در بخش ششم نتیجه‌گیری شده است.

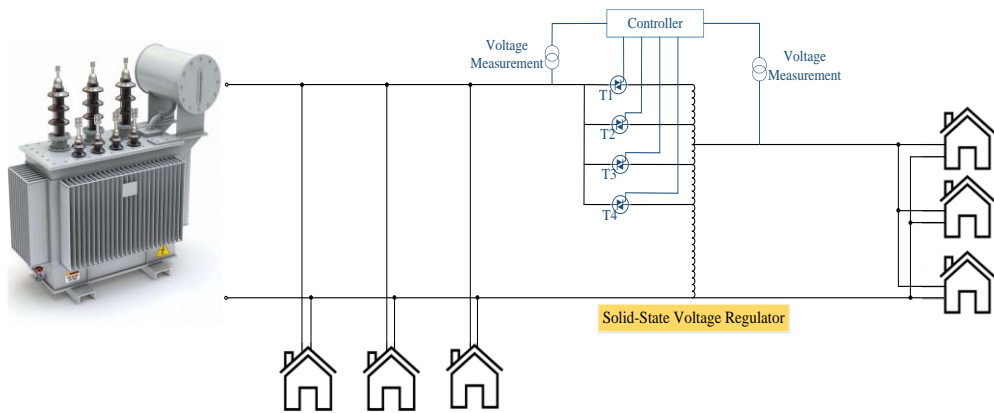
ساختار و قسمت‌های مختلف SSVR پیشنهادی

هدف از این تحقیق، پیاده‌سازی تثبیت‌کننده ولتاژ خودکار در رنج توان‌های پایین برای نقاطی از شبکه است که با نوسانات شدید ولتاژ مواجه هستند. به این منظور در اینجا SSVRهای توان پایین با قابلیت اطمینان بالا، هزینه پایین و کیفیت توان بالا توسعه داده خواهد شد به نحوی که به کارگیری و نصب آنها در سطح شبکه‌های توزیع به خصوص نقاط جغرافیایی دور دست با سهولت انجام شود. این SSVR علاوه بر تنظیم خودکار ولتاژ انتهایی فیدرها اهدافی چون حفاظت

¹ Solid-State Voltage Regulator (SSVR)

مصرف کننده‌ها، خنثی کردن نوسانات ناگهانی ولتاژ، پاسخ سریع به تغییرات ناگهانی ولتاژ و حفاظت مصرف‌کننده‌ها در برابر حالت‌های گذرا (از جمله قطع و وصل برق شبکه) را نیز برآورده خواهد کرد. قابل ذکر است که در اینجا فقط هدف تثبیت ولتاژ است و حذف هارمونیک‌ها، افزایش کیفیت توان و متعادل کردن ولتاژ ۳ فاز در اهداف این مقاله نیست.

شکل ۱ نحوه به‌کارگیری SSVR پیشنهادی را در سطح شبکه توزیع نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل نشان داده شده، SSVR مابین مشترکین انتهایی خط توزیع و ترانسفورماتور واقع شده است. سیستم کنترل کننده وظیفه کلیدزنی تریاک‌ها به منظور تنظیم تعداد دور سیم‌پیچ اتوترانسفورماتور را بر عهده دارد. پایین بودن توان SSVR، باعث سادگی و کم هزینه شدن این ساختار شده است. به‌صورتی که نیازی به محدودسازهای کموتاسیون و مدارهای محافظ جانبی به‌خصوص راکتورهای محدود کننده خطاهای داخلی نیست [۱۶]. هر کدام از بخش‌های SSVR بایستی به نحوی طراحی و به کار گرفته شوند که اهداف مذکور را برآورده کند، در ادامه به تفصیل هر یک از این بخش‌ها تشریح خواهند شد.

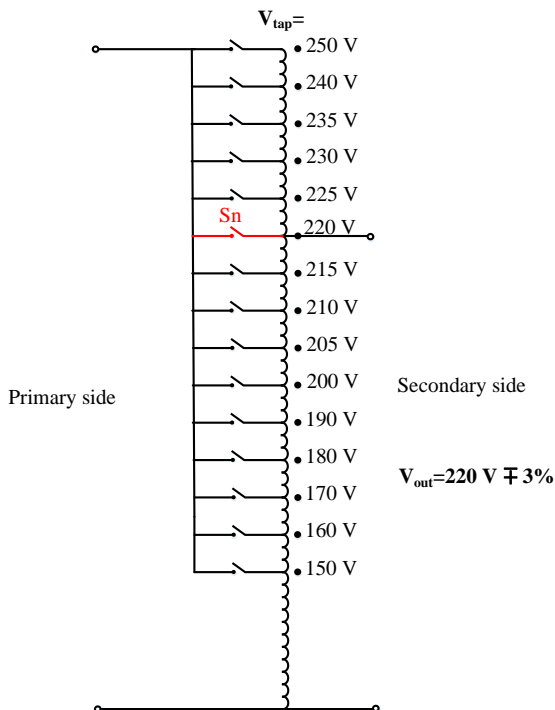


شکل ۱. نمایش مفهوم جبران‌سازی با استفاده از تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد

اتوترانسفورماتور SSVR

ترانسفورماتور به عنوان مؤلفه اصلی تغییر دهنده ولتاژ SSVR است که گران‌ترین تجهیز مورد استفاده نیز می‌باشد. ترانسفورماتور بایستی دارای کویل‌های مختلفی باشد تا با وارد کردن آنها در مدار، کاهش یا افزایش مناسب ولتاژ را انجام دهد. اتوترانسفورماتورها به‌دلیل 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 (۲) شماتیک مداری و اتوترانسفورماتور استفاده شده را نشان می‌دهد. واضح است که با تغییر ولتاژ ورودی به SSVR، بایستی تپ‌های اتوترانسفورماتور (با بستن کلیدی مربوطه) وارد مدار شود که نهایتاً ولتاژ خروجی اتوترانسفورماتور روی ۲۲۰V تنظیم شود. در اینجا یک مزیت مهم دیگر استفاده از اتوترانسفورماتور آشکار می‌شود و آن این‌که در شرایط عملکرد نرمال فیدر (یعنی زمانی که ولتاژ ورودی به SSVR برابر با ۲۲۰ ولت باشد)، کلید مربوط کویل‌های ۱/۱ (کلید Sn) بسته می‌شود و این یعنی این‌که هیچ یک 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 راه حل با راندمان بالا را ارائه داده است.

در این پژوهش برای تنظیم خودکار ولتاژ در یک رنج وسیع، اتوترانسفورماتور انتخاب شده دارای ۱۵ تپ مختلف از ۱۴۰V تا ۲۵۰V با استپ‌های ۵V و ۱۰V است (بعد از کاهش ولتاژ تا ۱۵۰V اتوترانسفورماتور و SSVR بار را قطع می‌کند و عملکرد حفاظتی انجام می‌دهد). این بدین معنی است که با تغییر ولتاژ ورودی به SSVR در رنج ۱۵۰V تا ۲۵۰V، می‌توان ولتاژ خروجی تحویلی به بار در محدوده ۲۲۰V (با تغییرات کمتر از ۳ درصد) تنظیم شود.



شکل ۲. شماتیک مدار اتوترانسفورماتور (سمت راست) و اتوترانسفورماتور ۵KVA انتخاب شده برای پروژه (سمت چپ).

نحوه کلیدزنی تپ‌های اتوترانسفورماتور

در SSVR پیشنهادی از تریاک با کموتاسیون اجباری (با قطع و وصل در لحظه صفر ولتاژ) استفاده شده است و همانند IGBTها برش در سیکل ایجاد نمی‌کند بنابراین نیاز به ادوات جانبی همانند راکتورها ندارد و این موضوع به عنوان یک مزیت مهم باعث سادگی و ارزان شدن SSVR می‌شود [۱۷]. در این مد کنترلی نیازی به راکتورهای سری با کلیدهای تغییر دهنده تپ نیست چرا که با اندازه‌گیری دقیق جریان ورودی و خروجی ترانسفورماتور اجازه اتصال کوتاه شدن تب‌ها از طریق بسته شدن هم زمان کلیدها یا مدار باز شدن لحظه‌ای کل کلیدها (در مد کنترلی ZCS^1) داده نخواهد شد. این موضوع در کاهش هزینه و ابعاد تنظیم کننده خودکار ولتاژ بسیار مؤثر است [۱۸]. در استراتژی ZCS ، لحظه عبور جریان از صفر حائز اهمیت است و دامنه جریان در سوئیچینگ اثرگذار نیست بنابراین برای بالا بردن دقت

¹ The Zero Current Switching

نمونه برداری جریان از سنسور جریان اثر هال اشباع شونده ۱۰۰ آمپر استفاده شده که خطای اندازه‌گیری جریان کمتر از ۴٪ شده است.

مد کنترلی SSVR پیشنهادی

یکی از بخش‌های مهم پروژه، سوییچ کردن تپ‌های اتوترانسفورماتور است. این منظور از طریق کلیدهای تریاک انجام می‌شود. هر کلید تریاک از دو تریستور که با پلاریته مخالف به هم متصل شده‌اند تشکیل شده است که قابلیت عبور جریان را در دو نیم سیکل مثبت و منفی فراهم می‌کند. میکروکنترلر ARM ۳۲ بیتی (سیستم کنترل دیجیتال) به عنوان پردازنده اصلی محصول استفاده شده است که برنامه‌ریزی اصلی سوئیچینگ، حفاظت‌های نرم افزاری، وارد کردن مدار بای پس، کنترل ولتاژ خروجی و... رو انجام می‌دهد. سیگنال‌های آنالوگ ۳.۳V خروجی میکروکنترلر به عنوان ورودی مدار درایور تریاک‌ها اعمال می‌شود. از اپتوتریاک MOC۳۰۲۳ به عنوان درایور تریاک‌ها استفاده شده است این اپتوتریاک وظیفه ایزوله کردن مدار قدرت از مدار الکترونیک را دارد. شکل (۳) شماتیک کلی محصول شامل مدار کنترلی، مدارهای واسط، کلید زنی و... را نشان می‌دهد.

استراتژی‌های عملکردی SSVR

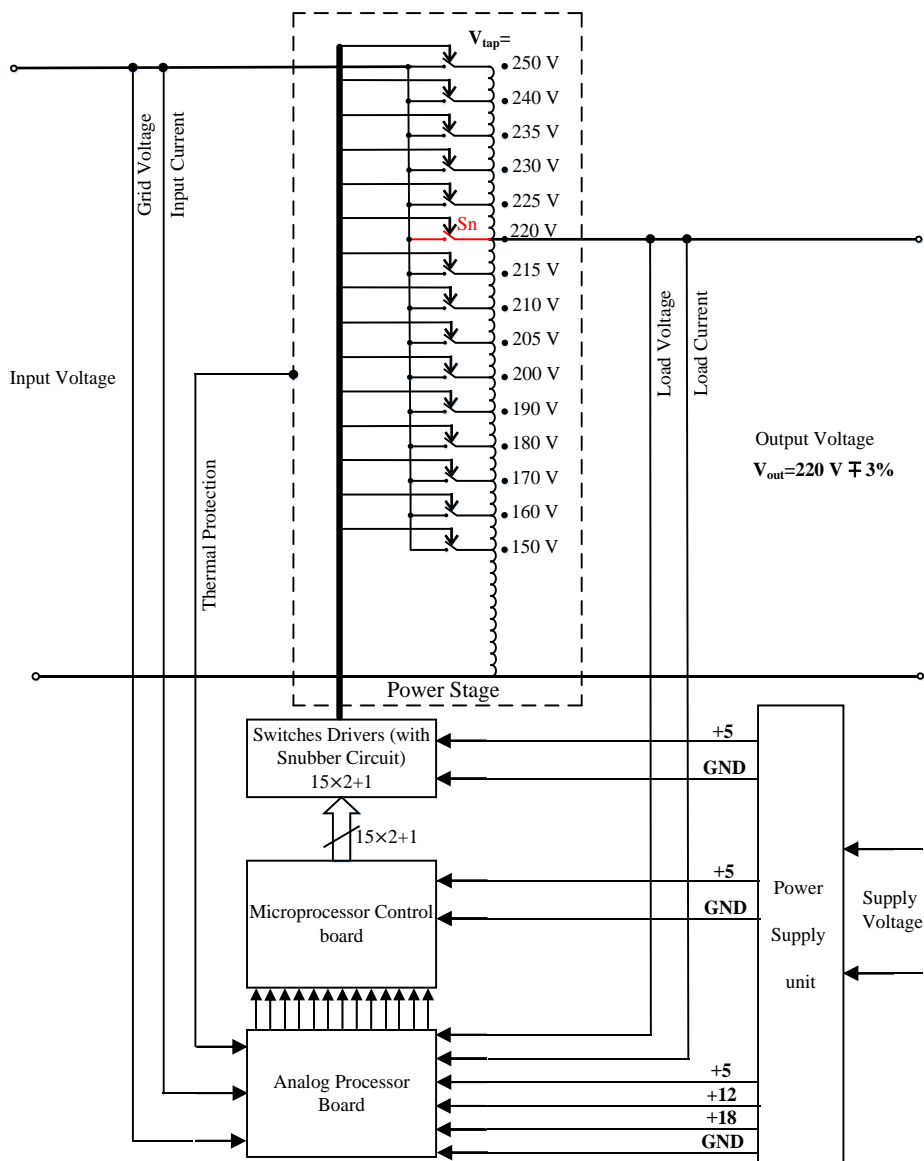
به منظور افزایش انعطاف‌پذیری، سه حالت عملکردی کلی برای این SSVR در نظر گرفته شده است. برای تنظیم حالت عملکردی تنظیم‌کننده ولتاژ، یک کلید گردان سه حالت درون دستگاه تعبیه شده است. سه وضعیت کاری عبارتند از:

- الف) حالت عملکردی اول: حالت خاموش
- ب) حالت عملکردی دوم: حالت بای پس دستی
- ج) حالت عملکردی سوم: کنترل دیجیتال هوشمند مبتنی بر کنترل کننده پیش بین مدل MPC¹

حالت عملکردی اول

برای قرار دادن دستگاه در حالت عملکردی یک می‌بایست کلید گردان را در وضعیت «۰» قرار داد. در این حالت، فاز ورودی و خروجی دستگاه به صورت هم‌زمان از شبکه برق و بار جدا می‌شود و دستگاه در حالت ایزوله قرار می‌گیرد این بدین معنی است که دستگاه در وضعیت خاموش قرار می‌گیرد که به موجب آن، اتصال الکتریکی دستگاه با شبکه و بار قطع می‌گردد. لازم به ذکر است که اتصال سیم نول و اتصال سیم ارت (زمین) دستگاه در تمامی حالات عملکردی آن برقرار است.

¹ Model Predictive Controller (MPC)



شکل ۳. شماتیک کلی کنترلی تنظیم کننده ولتاژ حالت جامد پیشنهادی.

حالت عملکردی دوم

در حالت عملکردی دوم، با قرار دادن کلید گردان در وضعیت «۱» دستگاه تنظیم کننده ولتاژ در وضعیت بای پس دستی قرار می گیرد. در این حالت، بار مستقیم به شبکه متصل می شود به نحوی که فاز ورودی به دستگاه به طور مستقیم به فاز خروجی آن متصل می شود و بخش تنظیم کننده ولتاژ (شامل اتوترانسفورماتور، سیستم کنترل دیجیتال، درایور، کلیدهای نیمه هادی و...) به طور کامل از مدار خارج می گردد. این وضعیت برای تعمیر و نگهداری قسمت تنظیم کننده

ولتاژ در نظر گرفته شده است. لازم به ذکر است که با استفاده از این حالت عملکردی، خرابی تنظیم‌کننده ولتاژ نمی‌تواند باعث ایجاد وقفه در تغذیه بار مشترک شود.

حالت عملکردی سوم

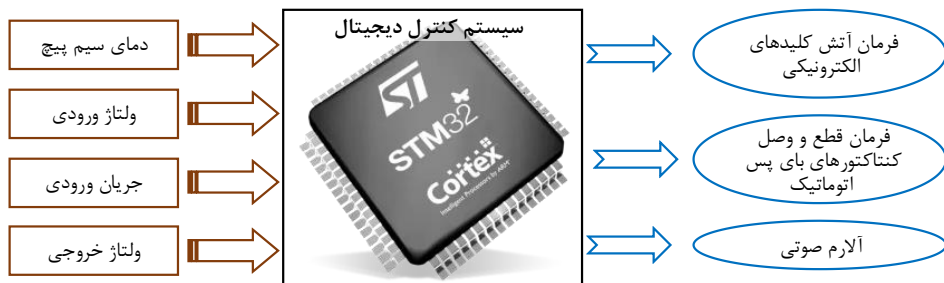
با قرار دادن کلید گردان در وضعیت «۲» دستگاه وارد حالت عملکردی سوم می‌شود که دستگاه در حالت کنترل هوشمند قرار می‌گیرد. در این مقاله برای کنترل هوشمند SSVR در حالت عملکردی سوم، از سیستم کنترل دیجیتال مبتنی بر کنترل‌کننده پیش‌بین مدل (MPC) استفاده شده است. دستگاه با تکیه بر کنترل دیجیتال مبتنی بر MPC ولتاژ خروجی را در مقدار مرجع تعیین شده تنظیم می‌کند. سیستم کنترل دیجیتال، به طور پیوسته عملکرد دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ را پایش می‌کند و متناسب با حالت عملکردی دستگاه اقدامات لازم کنترلی را انجام می‌دهد. متغیرهای پایش شده عبارتند از:

- ولتاژ ورودی دستگاه
- جریان ورودی به دستگاه
- دمای سیم پیچ اتوترانسفورماتور
- ولتاژ خروجی دستگاه

خروجی سیستم کنترل دیجیتال شامل موارد زیر هست:

- فرمان وضعیت روشن یا خاموش بودن تمام کلیدهای حالت جامد موجود در دستگاه
- فرمان قطع و وصل دو کنتاکتور موجود در دستگاه جهت کنترل وضعیت بای‌پس اتوماتیک
- آلام صوتی جهت تعیین وضعیت عملکردی دستگاه

در شکل ۴، ورودی‌ها خروجی‌های سیستم کنترل دیجیتال به تصویر کشیده شده است. همان‌گونه که در این شکل نمایان است، سیستم کنترل دیجیتال بر اساس میکروکنترلرهای ARM ۳۲ بیتی طراحی شده است. این سیستم کنترل، علاوه بر کنترل بهینه وضعیت روشن یا خاموش شدن کلیدهای حالت جامد، وضعیت بای‌پس اتوماتیک را با تعیین فرمان تحریک کنتاکتورهای موجود در آن کنترل می‌کند و آلام‌های صوتی نشان‌دهنده وضعیت عملکردی دستگاه را نیز مدیریت می‌کند.



شکل ۴. ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم کنترل دیجیتال دستگاه SSVR پیشنهادی.

در حالت کلی، سیستم کنترل دیجیتال می‌تواند دستگاه را در دو حالت عملکردی (۱) حالت بای‌پس اتوماتیک و یا (۲) حالت MPC قرار دهد. هنگامی که سیستم کنترل مرکزی، دستگاه SSVR ۵kVA را در حالت MPC قرار می‌دهد، کنترل‌کننده MPC ولتاژ خروجی دستگاه را روی مقدار مرجع داده شده (۲۲۰ ولت مؤثر) تنظیم می‌کند. با این حال،

در اين حالت عملكردى وضعيت دستگاہ به صورت مستمر پايش و حفاظت‌هاى عملكردى بررسى مى‌شوند. انواع سيستم‌هاى حفاظتى طراحي شده براى دستگاہ در بخش «حفاظت‌هاى عملكردى» معرفى شده‌اند. در صورتى كه دستگاہ نيازمند باى پاس باشد، سيستم كنترل دييجيتال دستگاہ را در حالت «باى پس اتوماتيك» قرار مى‌دهد كه جزئيات آن در ادامه تشریح خواهد شد.

باى پس اتوماتيك دستگاہ

همان گونه كه در بخش «حالت عملكردى دو» ذكر شد، در هنگام باى پس، خروجى دستگاہ به طور مستقيم به شبكه وصل شده و بار متصل به خروجى دستگاہ به طور مستقيم از شبكه تغذيه مى‌گردد. براى قرار دادن دستگاہ در «حالت عملكردى دو»، اپراتور دستگاہ بايد اين كار را به صورت دستى و با چرخاندن كليد گردان و قرار دادن آن در وضعيت «۱» انجام دهد.

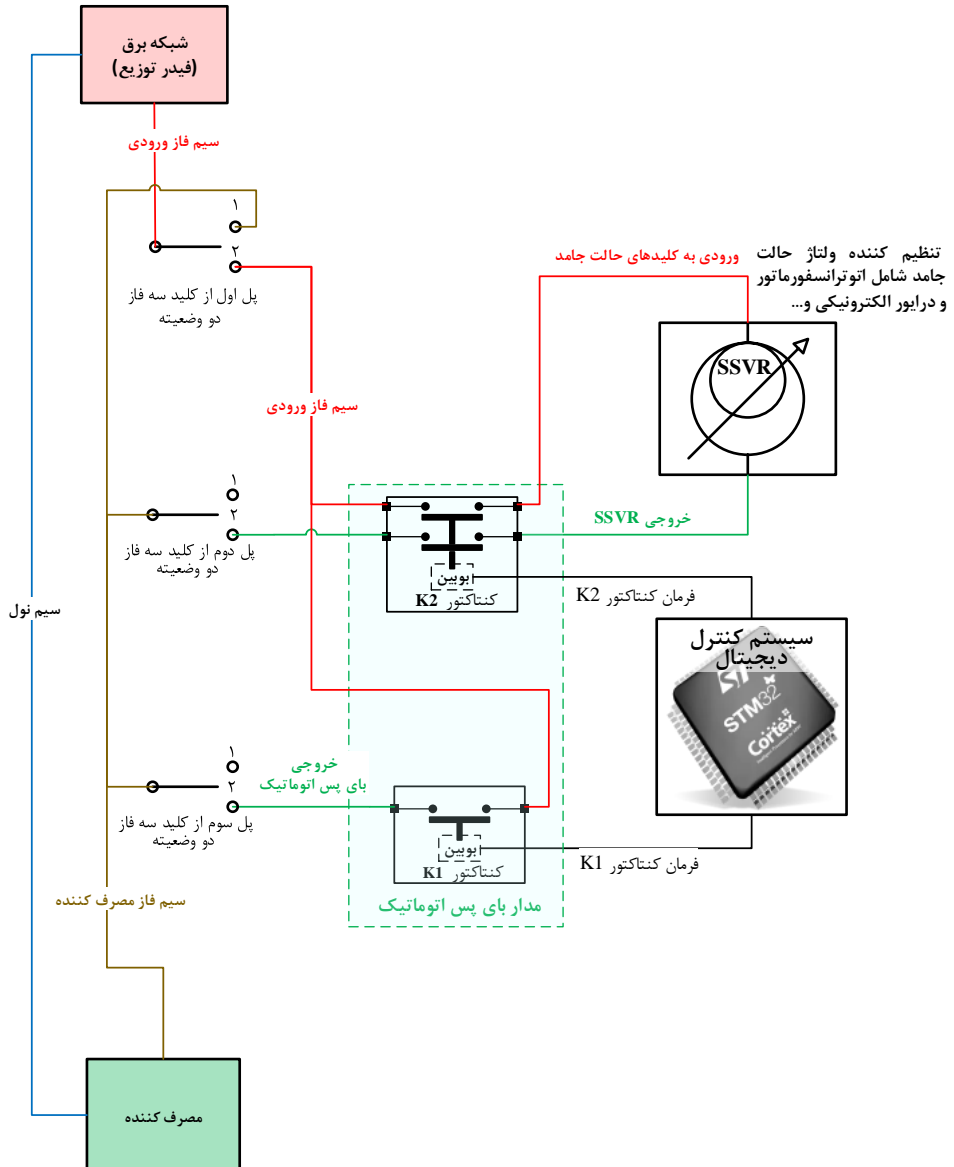
هنگامى كه دستگاہ توسط اپراتور در وضعيت عملكردى سه قرار داده شود، سيستم كنترل مركزى دستگاہ را كنترل خواهد كرد. در اين حالت، براى افزايش قابليت اطمينان دستگاہ $5kVA$ SSVR، يك حالت باى پس ديگر با نام «باى پس اتوماتيك» طراحي و ساخته شده است. مدار باى پس اتوماتيك براى حفاظت از دستگاہ SSVR و به منظور افزايش طول عمر و جلوگيرى از قطع برق مشترك طراحي شده است. سيستم كنترل مركزى با استفاده از «باى پس اتوماتيك» مى‌تواند در برخى از موارد ضرورى، مانند بيشتر شدن جريان خروجى از حد مجاز و يا آسيب ديدن درايور الكترونيكى و يا سوختن يكي از كليدهاى حالت جامد (تراياك)، دستگاہ را باى پس كند. شماتيك كللى هر سه وضعيت عملكردى سيستم و جزئيات باى پس دستى و اتوماتيك در شكل (۵) نمايش داده شده است.

در طراحي انجام شده، سيستم كنترل مركزى در موارد زير با استفاده از قابليت «باى پس اتوماتيك» دستگاہ را باى پس مى‌كند:

- الف) تشخيص خرابى در قسمت تنظيم‌كننده ولتاژ حالت جامد دستگاہ، شامل اتوترانسفورماتور، درايور، مدارهاى ارتباطى و كليدهاى حالت جامد.
 - ب) گرم شدن بيش از حد مجاز سيم‌پيچ‌هاى اتوترانسفورماتور.
 - ج) بيشتر شدن جريان خروجى دستگاہ از حد مجاز آن (۲۳ آمپر مؤثر)
- بنابراين، در سه حالت فوق، سيستم كنترل مركزى با استفاده از قابليت باى پس اتوماتيك، سيستم تنظيم‌كننده ولتاژ حالت جامد را از مدار خارج و بار را به صورت مستقيم به شبكه وصل مى‌كند.
- براى عدم تلاقى وضعيت عملكردى دو (اتصال بار به SSVR) و حالت عملكردى سه (سيستم باى پس اتوماتيك SSVR) از دو كنتاكتور $K1$ و $K2$ با عملكرد غير هم‌زمان اجبارى استفاده شده است كه جزئيات آن در شكل (۵) نشان داده شده است. سيم‌پيچ تحريك هر کدام از اين كنتاكتورهاى $K1$ و $K2$ توسط سيستم كنترل دييجيتال مركزى و متناسب با وضعيت عملكردى دستگاہ تنظيم‌كننده ولتاژ حالت جامد كنترل مى‌شود. مشاهده مى‌شود كه كنتاكت باز $K2$ بر روى خروجى SSVR قرار گرفته است علت اين موضوع آن است كه در هنگام باى پس شدن اتوماتيك سيستم، هم ورودى و هم خروجى SSVR بدون برق شود چرا كه خروجى SSVR مستقيم به كليدهاى حالت جامد وصل است و اگر بدون برق نشود احتمال عملكرد خارج از پيش بينى اين كليدها وجود دارد.
- محاسن اصلى مدار باى پس اتوماتيك كه در دستگاہ تنظيم‌كننده ولتاژ حالت جامد پياده‌سازى شده است به شرح زير مى‌باشد:

حفاظت از سيستم تنظيم‌كننده ولتاژ حالت جامد در برابر اضافه دما، اضافه جريان و خرابى كليدهاى حالت جامد عدم ايجاد وقفه در تغذيه بار مشترك در هنگام خروج سيستم تنظيم‌كننده ولتاژ از سرويس.

لازم به ذکر است، مدت زمانی که دستگاه در حالت بای پس قرار می‌گیرد قابل تنظیم بنابراین، سیستم کنترل مرکزی متناسب با وضعیت عملکردی دستگاه می‌تواند آن را برای یک زمان مشخص در حالت بای پس قرار دهد.



شکل ۵. شماتیک نحوه تغییر مد عملکردی و بای پس اتوماتیک SSVR پیشنهادی.

سيستم کنترل ديگيتال

سيستم کنترل ديگيتال با استفاده از کنترل کننده MPC ولتاژ خروجی دستگاه را در مقدار مرجع تنظيم می کند. متغير کنترلی تعيين شده در اینجا، شماره تپ اتوترانسفورماتور است. در حقيقت کنترلر MPC بهترين تپ را متناسب با اندازه ولتاژ ورودی دستگاه تنظيم کننده ولتاژ حالت جامد محاسبه و اقدامات کنترلی لازم را جهت وارد مدار شدن آن تپ اعمال می کند. برای تشریح بهتر چگونگی عملکرد کنترل کننده MPC، فلوچارت آن در شکل (۶) نشان داده شده است. در این شکل:

Vg: مقدار مؤثر ولتاژ شبکه بر حسب ولت هست که توسط سيستم کنترل اندازه گیری شده است.

Vmin و Vmax: حداقل و حداکثر ولتاژ مؤثر شبکه هستند که دستگاه قادر است در محدوده [Vmin, Vmax]

ولتاژ خروجی را در مقدار مرجع ۲۲۰ ولت حفظ کند. در دستگاه ΔkVA ساخته شده Vmin و Vmax به ترتیب برابر ۱۵۵ و ۲۴۰ ولت مؤثر هستند.

i: اندیس تپ اتوترانسفورماتور است که از ۱ تا ۱۵ قابل تنظيم هست. به عنوان مثال اگر $i=10$ باشد بدان معناست که تپ ۱۰م اتوترانسفورماتور روشن شده و سایر تپها خاموش هستند. لازم به ذکر است که $i=0$ بدان معناست که هیچ کدام از تپهای شماره ۱ تا ۱۵ روشن نیستند.

ic: نشان دهنده استپ فعلی دستگاه هست. در واقع ic نشان میدهد که در حال حاضر کدام تپ اتوترانسفورماتور روشن است.

ib: بهترین تپ تعيين شده توسط کنترل کننده MPC است.

Ci: تابع هدف متناظر با تپ i ام هست.

Cb: کوچکترین تابع هدف در میان تمام تپها.

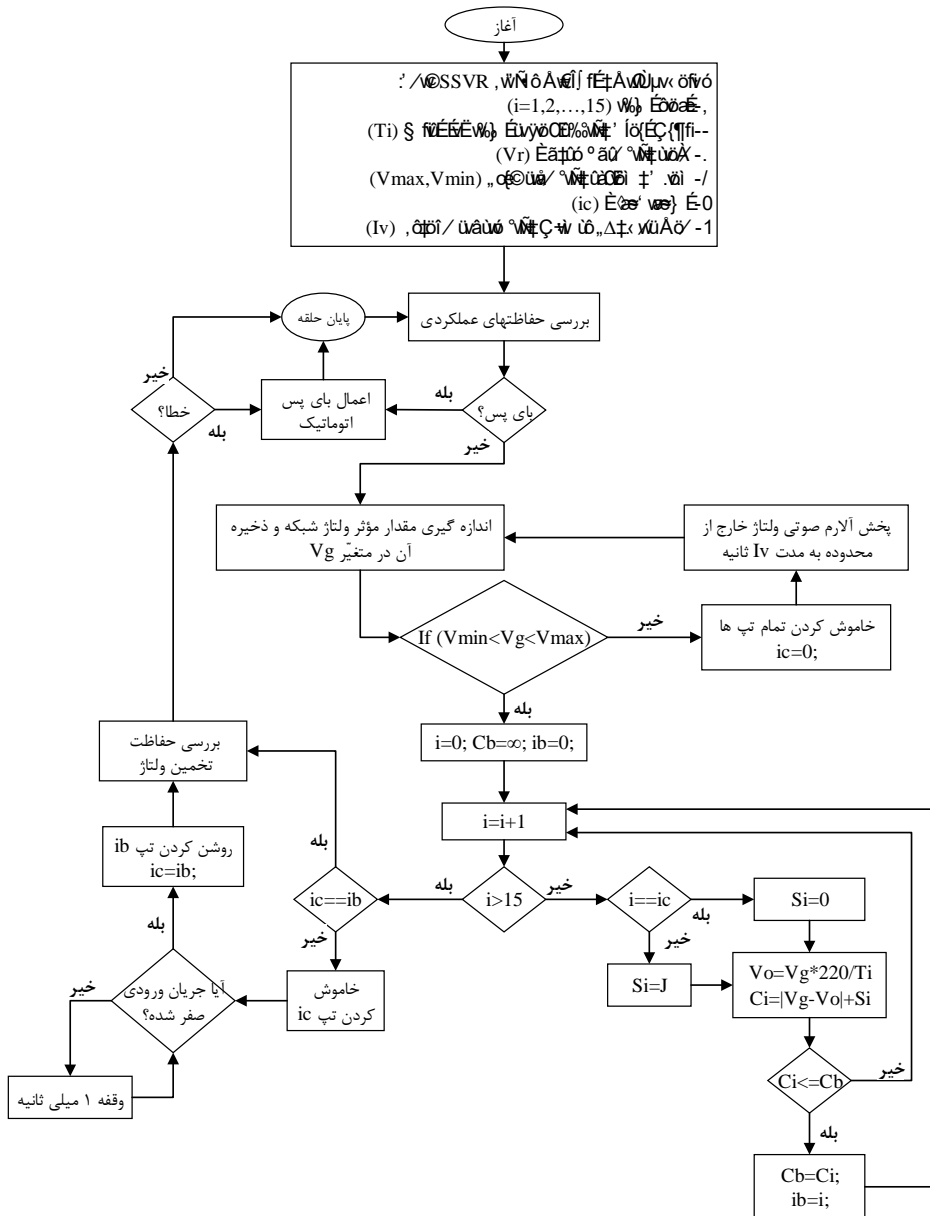
Si: میزان جریمه تغییر تپ برای رفتن به تپ i ام.

J: جریمه تغییر تپ. این جریمه برای جلوگیری از تغییرات مداوم تپ در نظر گرفته شده است و با ایجاد یک حاشیه امن در اطراف هر تپ مانع از تغییرات پیوسته تپ می گردد.

Vo: مقدار مؤثر ولتاژ خروجی تخمین زده شده بر حسب ولت است.

Vr: مقدار ولتاژ مرجع بر حسب ولت مؤثر.

Iv: مدت زمان وقفه بر حسب ثانیه در حالتی که ولتاژ شبکه در خارج از محدوده مجاز قرار دارد.



شکل ۶. فلوچارت کنترل‌کننده MPC طراحی شده.

در SSVR، پیشنهادی، سیستم کنترل ولتاژ با سیستم‌های حفاظتی اضافه دما، اضافه جریان، صحت عملکرد و ولتاژ خارج از محدوده به گونه‌ای هماهنگ ادغام شده‌اند. این سیستم کنترل که فلوچارت کلی آن در شکل ۶ ترسیم شده است، حالت بای پس دستگاه و وضعیت کلیدزنی ترایاک‌ها را کنترل می‌کند. متغیر خروجی سیستم کنترل، متغیر i

است که شماره ترايکي را نشان می‌دهد که باید روشن شود. نکته مهم این است که یک ترايک زمانی می‌تواند روشن شود که تمامی ترايک‌های دیگر خاموش شده باشند. سیستم کنترل MPC برای SSVR پیشنهادی را می‌توان به صورت زیر تشریح کرد:

- گام (۱) آغاز
- گام (۲) خواندن اطلاعات و تنظیمات دستگاه SSVR. رفتن به گام سوم.
- گام (۳) بررسی حفاظت‌های عملکردی دستگاه و رفتن به گام چهارم. لازم به ذکر است که کلیه حفاظت‌های عملکردی دستگاه در ادامه تشریح خواهند شد.
- گام (۴) اگر نیاز به بای‌پس باشد گام هفدهم و در غیر این صورت گام پنجم اجرا شود.
- گام (۵) اندازه‌گیری مقدار مؤثر ولتاژ شبکه و ذخیره نمودن آن در متغیر Vg و رفتن به گام ششم.
- گام (۶) اگر ولتاژ شبکه در محدوده مجاز $[V_{min}, V_{max}]$ قرار داشته باشد گام نهم و در غیر این صورت گام هفتم اجرا شود.
- گام (۷) خاموش کردن تمامی تپ‌های ۱۵ گانه دستگاه، تنظیم $i_c=0$ و رفتن به گام هشتم.
- گام (۸) پخش آلارم صوتی متناظر با خطای «ولتاژ خارج از محدوده‌ی مجاز» به اندازه Iv ثانیه و پس از آن رفتن به گام پنجم.
- گام (۹) تنظیم $i_b=0$ ، $i_c=0$ و رفتن به گام دهم.
- گام (۱۰) $i=i+1$ و رفتن به گام یازدهم.
- گام (۱۱) اگر i (تپ) بزرگتر از ۱۵ باشد باید گام دوازدهم و در غیر این صورت باید گام چهاردهم اجرا شود.
- گام (۱۲) اگر بهترین تپ تعیین شده (i_b) برابر با تپ فعلی (i_c) باشد، تغییر تپی صورت نمی‌گیرد و گام سیزدهم اجرا می‌شود. در غیر این صورت گام چهاردهم اجرا می‌شود.
- گام (۱۳) در صورتی که اختلاف میان ولتاژ تخمین زده شده با ولتاژ واقعی بیشتر از ۶ ولت باشد، وقوع خطا اعلام می‌گردد و گام شانزدهم اجرا می‌شود. در غیر این صورت گام پنجم اجرا می‌شود.
- گام (۱۴) اگر تپ i برابر i_c باشد میزان جریمه تغییر تپ S_i برابر صفر و در غیر این صورت برابر J می‌شود و گام پانزدهم اجرا می‌گردد.
- گام (۱۵) ولتاژ خروجی دستگاه در تپ i ام با رابطه $V_o=V_g*220/T_i$ محاسبه و تابع هدف متناظر با تپ i با رابطه $C_i=|V_o-V_g|+S_i$ محاسبه می‌گردد. سپس گام شانزدهم اجرا می‌گردد.
- گام (۱۶) اگر تابع هدف متناظر با تپ i (یعنی C_i) کوچکتر از بهترین تابع هدف یافت شده یعنی C_b باشد، آنگاه $i_b=i$ و $C_b=C_i$ تنظیم می‌گردد. پس از آن گام دهم اجرا می‌گردد.
- گام (۱۷) قرار دادن دستگاه در حالت بای پس اتوماتیک و اجرای گام هجدهم.
- گام (۱۸) پایان (رفتن به گام سه)

از آنجایی که SSVR یک تجهیز دائم کار است، لذا فلوچارت کنترل کننده دارای یک حلقه عملکردی دائم است و بعد از گام هجدهم باید روند اجرای برنامه مجدداً به گام سوم ارجاع داده شود تا حلقه کنترلی حالت دائم تشکیل شود. با این حال، برای درک بهتر سیستم کنترل، گام هجدهم به عنوان پایان چرخه یک حلقه کنترل نامگذاری شده که به معنای توقف حلقه کنترلی در پیاده‌سازی عملی نیست.

ولتاژ خروجی دستگاه در متغیر V_o ذخیره می‌شود. در صورتی که این ولتاژ با مقدار اندازه‌گیری شده توسط سنسور ولتاژ خروجی تفاوت زیادی (بیشتر از ۲ ولت) داشته باشد، سیستم حفاظت صحت عملکرد دستگاه، SSVR را وارد حالت بای پس می‌کند. بنابراین، در صورت اتصال کوتاه شدن اتوترانس و یا سوختن کلیدهای حالت جامد، دستگاه توسط

سیستم بای پس هوشمند پیشنهاد شده در شکل ۶ از مدار خارج می‌شود و خروجی دستگاه به صورت مستقیم به شبکه متصل می‌شود. این استراتژی کنترلی با خارج کردن قسمت معیوب از مدار مانع انتشار خطا در سطح شبکه توزیع شده و با اتصال خروجی SSVR به شبکه مانع ایجاد خاموشی در سمت مشترکین می‌شوند.

حفاظت‌های SSVR

در دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد، سیستم‌های حفاظتی زیر در نظر گرفته شده است:

- ۱- سیستم حفاظت اضافه دمای سیم پیچ‌های اتوترانسفورماتور
- ۲- سیستم حفاظت کلیدهای حالت جامد
- ۳- سیستم حفاظت اضافه جریان
- ۴- سیستم حفاظت عدم تناسب ولتاژ ورودی و خروجی
- ۵- سیستم حفاظت ولتاژ خارج از محدوده مجاز

طراحی دستگاه به گونه‌ای انجام شده است که سیستم‌های حفاظتی شماره ۱ الی ۵، می‌توانند دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد را با استفاده از مدار بای پس اتوماتیک، برای یک مدت زمان مشخص بای پس نمایند. در ادامه، چگونگی پیاده‌سازی حفاظت‌های ذکر شده تشریح می‌گردد.

حفاظت اضافه جریان

جریان ورودی به دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد، توسط سنسور ۵۰ آمپر اثر هال مدل ACS۷۵۸LCB ۵۰A اندازه‌گیری می‌شود و از طریق پایه‌های آنالوگ A۶ ماژول STM۳۲F۱۰۳C8 وارد میکروکنترلر ARM می‌شود. پس از تبدیل سیگنال آنالوگ به دیجیتال توسط واحد A۲D میکروکنترلر سیستم کنترل دیجیتال (یعنی STM۳۲F۱۰۳C8)، میزان RMS جریان ورودی دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد محاسبه می‌شود. چنانچه این جریان از حد مجاز تعیین شده (۲۲ آمپر مؤثر) برای مدت ۲/۵ ثانیه بیشتر باشد، سیستم کنترل دیجیتال دستگاه فرمان بای پس را صادر و دستگاه را به مدت ۶۰ ثانیه در وضعیت بای پس نگه می‌دارد. لازم به ذکر است که وقفه ۲/۵ ثانیه متناسب با زمان مورد نیاز برای راه‌اندازی بارهای موتوری مانند کولرها و یا موتور یخچال در نظر گرفته شده است تا لحظه راه‌اندازی این بارها به اشتباه به عنوان خطای اضافه جریان تشخیص داده نشود. بنابراین، سیستم کنترل در صورتی که جریان ورودی برای مدت ۲/۵ ثانیه به طور مداوم بالاتر از حد آستانه مجاز (یعنی ۲۲ آمپر مؤثر) باشد، دستگاه را بای پس می‌کند. پس از گذشت ۶۰ ثانیه، در صورتی که جریان ورودی کمتر از مقدار تعیین شده باشد، سیستم کنترل دیجیتال دستگاه را از حالت بای پس خارج می‌کند.

حفاظت اضافه دما

دمای سیم پیچ اتوترانسفورماتور به طور پیوسته توسط سنسور دما DS۱۸B۲۰ اندازه‌گیری می‌شود. این سنسور از طریق ارتباط تک سیمه و با استفاده از پایه A3 میکروکنترلر به سیستم کنترل دیجیتال متصل شده است. چنانچه دمای اندازه‌گیری شده بیشتر از ۸۰ درجه سانتیگراد باشد، سیستم کنترل دیجیتال، دستگاه تنظیم‌کننده ولتاژ حالت جامد را بای پس می‌کند و تا زمانی که دما کاهش نیابد و به زیر حد مجاز تعیین شده نرسد، آن را از بای پس خارج نمی‌کند. حفاظت اضافه دما از اتوترانسفورماتور موجود در دستگاه در برابر اضافه بار محافظت می‌کند و مانع از آسیب دیدن آن در اثر اضافه بار طولانی مدت می‌شود.

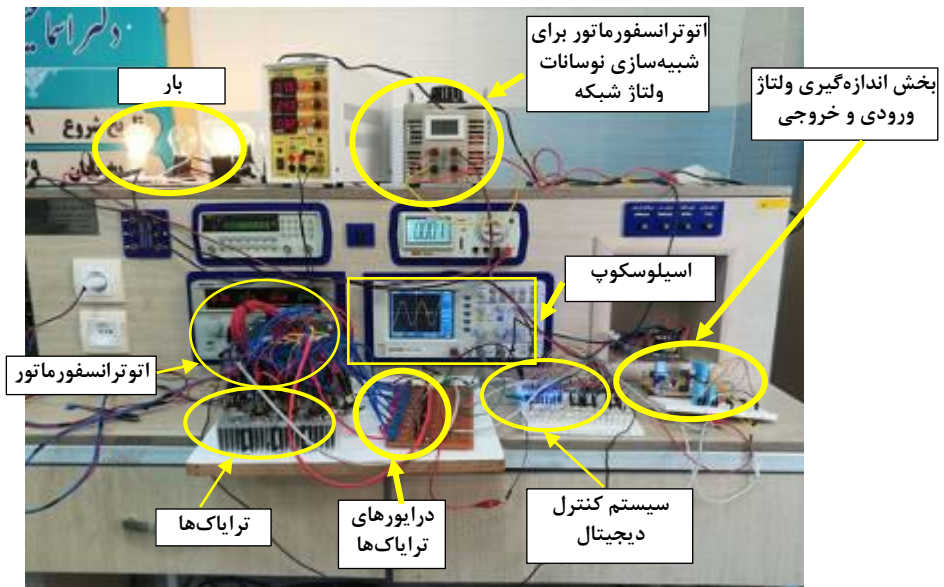
حفاظت کلیدهای حالت جامد

یکی دیگر از حفاظت‌های تعریف شده برای سیستم کنترل دیجیتال، حفاظت کلیدهای حالت جامد (ترایاک‌ها) می‌باشد. این سیستم حفاظتی در صورت بروز سوختگی در هر کدام از کلیدهای حالت جامد، دستگاه را به طور دائم وارد حالت بای پس می‌کند تا سیستم تنظیم کننده ولتاژ در اثر مسیر اتصال کوتاه احتمالی ناشی از روشن شدن هم‌زمان بیش از یک کلید الکترونیکی آسیب نبیند.

هنگام تغییر تپ اتوترانسفورماتور، اگر بعد از خاموش شدن تپ فعلی جریان و معکوس شدن پلاریته ولتاژ، ترایاک موجود در آن تپ همچنان روشن باقی بماند بدان معنا است که ترایاک اتصال کوتاه شده است. در این هنگام، سیستم کنترل دیجیتال، دستگاه را بای پس می‌کند. زیرا در صورت بای پس نشدن روشن شدن یکی دیگر از کلید الکترونیکی باعث ایجاد اتصال کوتاه در مسیر سیم‌پیچ‌های ورودی اتوترانسفورماتور می‌شود.

پیاده‌سازی و بررسی نتایج

چیدمان آزمایشگاهی SSVR در شکل ۷ نشان داده شده است. در این مدار بارهای اهمی برای آزمایش استفاده شده است. اندازه گیری شکل موج ولتاژ خروجی از طریق یک مقاومت شنت یک اهم انجام می‌شود که به صورت سری با سیم نول بار متصل می‌شود. پتانسیل روی دو سر این مقاومت کمتر از ۱۰ ولت است و به طور مستقیم برای اندازه‌گیری به اسیلوسکوپ متصل می‌شود. شکل موج ولتاژ دو سر مقاومت که در واقع با جریان بار برابر است، در شکل ۷ قابل مشاهده است. شکل موج به دست آمده فاقد هارمونیک‌های مزاحم و شرایط گذرا مخرب می‌باشد. شکل ۸ تصویری از تنظیم کننده ولتاژ حالت جامد ۵kVA مونتاز شده که برای نصب بر روی فیدر توزیع آماده شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۷. چیدمان آزمایشگاهی و شکل موج جریان بار در حالت عملکرد SSVR.

برای انتخاب محل نصب تجهیز ساخته شده، اطلاعات خام GIS دریافت شده از امور ۱ برق شهرستان خرم‌آباد مورد پردازش قرار گرفت و اطلاعات مورد نیاز استخراج شده‌اند. در نهایت یک سیستم ۱۳۳۷ شینه حاصل گردید. در این تحلیل هر پایه ۲۰ کیلوولت به عنوان یک شینه در نظر گرفته شد. دیاگرام تک-خطی فیدر پل بابا در شکل ۹ نشان داده شده است. این سیستم مجموع بار ۴/۱۵۶۹ مگاوات و ۲/۰۱۳۳ مگاوار را در پیک بار تغذیه می‌کند. تعداد ۱۴۱ ترانسفورماتور توزیع بارهای سیستم را تغذیه می‌کنند. علاوه بر این، در این فیدر یک ری کلوزر و دو سکسیونر فرمان‌پذیر از راه دور نصب شده است. روستای پایتخت ۳ کاکا شرف بر روی این فیدر قرار گرفته و دارای افت ولتاژ بیش از حد مجاز می‌باشد. وجود بارهای نامتعرف نیمه صنعتی سبب شده است که مشترکین انتهایی خط دچار افت ولتاژ شدیدی بشوند به نحوی که ولتاژ ۱۵۰ الی ۱۹۰ ولت را تجربه می‌کنند. SSVR سر راه یک مشترک پر مصرف با جریان ۲۵ آمپر قرار داده شد که شکل ۱۰ مکان نصب را نشان می‌دهد.

برای ارزیابی عملکرد SSVR، دو عدد کنتور فهام (با قابلیت اندازه‌گیری و ذخیره سازی پارامترهای الکتریکی) بر روی ورودی و خروجی SSVR نصب شده‌اند. برای ارزیابی دقیق و جامع، پارامترهای الکتریکی ورودی و خروجی SSVR در طول ۲۲ روز از خرداد سال ۱۴۰۱ به صورت ساعتی توسط کنتورهای فهام ذخیره‌سازی و ثبت شده‌اند که در شکل‌های ۱۱ تا ۱۳ مشاهده می‌شوند. در شکل ۱۱ دو نمودار ولتاژی با رنگ‌های قرمز و مشکی نشان داده شده است. نمودار قرمز رنگ، ولتاژ ورودی به SSVR و نمودار مشکی رنگ ولتاژ خروجی آن را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، SSVR به خوبی توانسته است ولتاژ خروجی را در محدوده مجاز ۲۲۰ ولت تنظیم کند که عملکرد بسیار خوب این تجهیز در حذف نوسانات ولتاژ شبکه را تأیید می‌کند.

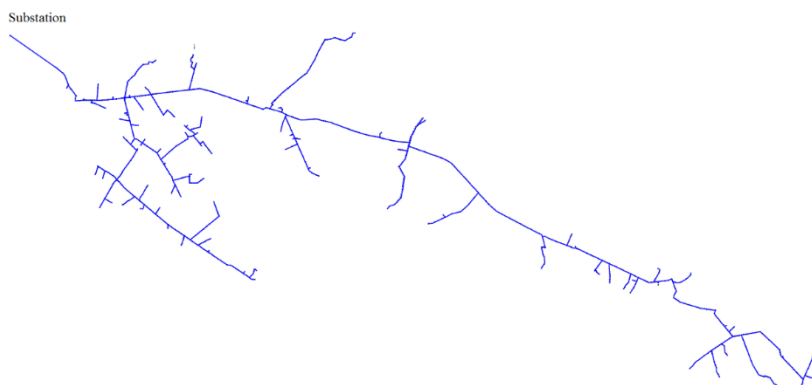
شکل‌های ۱۲ و ۱۳ جریان‌ها و ضریب توان ورودی و خروجی SSVR را نشان می‌دهند. شکل ۱۲ اختلاف زیادی بین جریان‌های ورودی و خروجی و خروجی دستگاه را نشان می‌دهد که این پدیده متأثر از تلفات دستگاه نمی‌باشد بلکه متأثر از نسبت تبدیل اتوترانسفورماتور می‌باشد. همان‌گونه که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود ولتاژ شبکه در بازه زمانی تحت بررسی کمتر از حد نرمال بوده است و اتوترانسفورماتور به‌صورت افزایشنده در مدار قرار گرفته است و ولتاژ بار را به حد دلخواه رسانده است این امر موجب شده است تا جریان سمت ثانویه اتوترانسفورماتور افزایشنده (سمت بار که عموماً از نوع توان ثابت هستند) متناسب با نسبت تبدیل سیم‌پیچ‌ها کاهش یابد. کاهش جریان سمت مصرف کننده باعث کاهش تلفات خط تغذیه بین دستگاه تا مشترکین می‌شود. ضریب توان دستگاه در سمت ورودی و خروجی با هم در شکل ۱۳ مقایسه شده‌اند. این شکل کاهش کم ضریب توان ورودی دستگاه را نشان می‌دهد که این موضوع به خاطر سلفی بودن اتوترانسفورماتور به کار رفته در SSVR پیشنهادی می‌باشد.



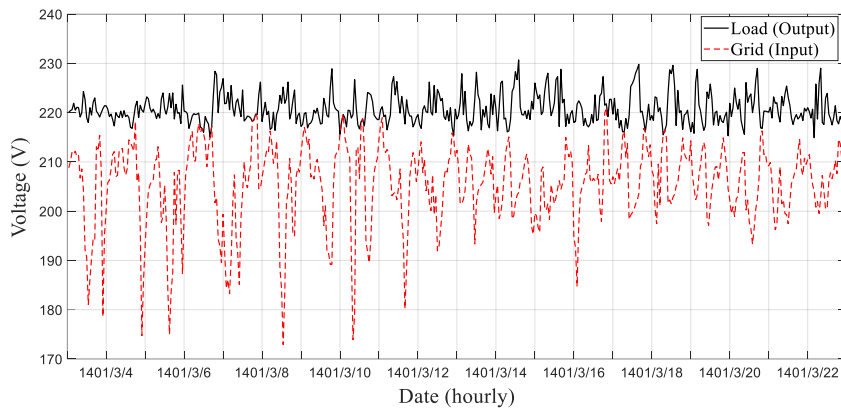
شکل ۱۰. نصب میدانی SSVR نیمه صنعتی Δ KVA در روستای پایتخت ۳ کاکاشرف خرم آباد.



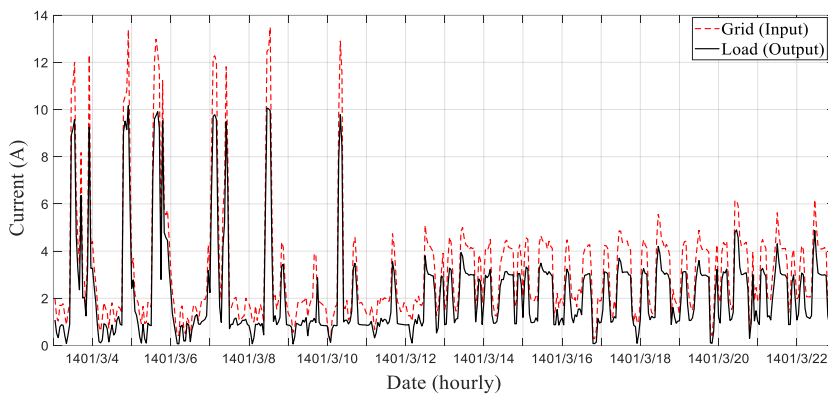
شکل ۸. تصویری از محصول SSVR Δ kVA.



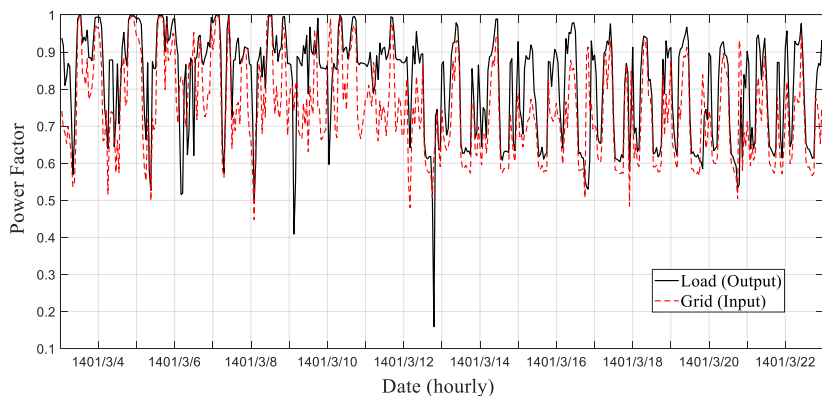
شکل ۹۰. فیدر ۲۰ کیلوولت پل بابا.



شکل ۱۱. ولتاژ ورودی و خروجی SSVR اندازه‌گیری شده در بازه خرداد ماه ۱۴۰۱.

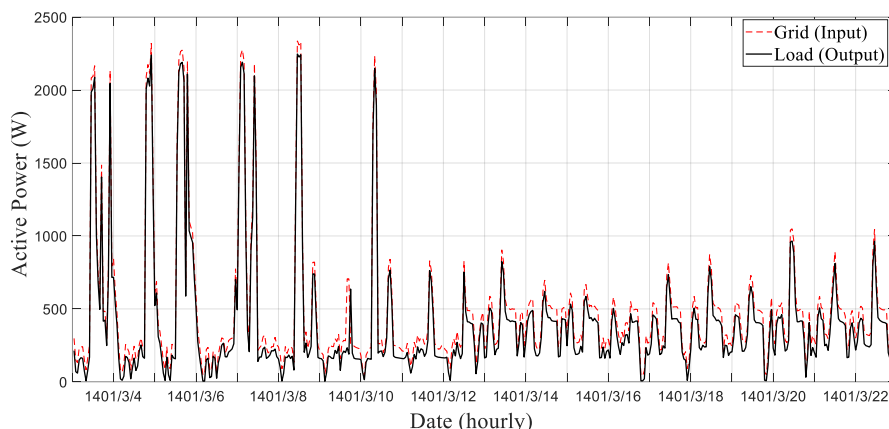


شکل ۱۲. جریان ورودی و خروجی SSVR اندازه‌گیری شده در بازه خرداد ماه ۱۴۰۱.



شکل ۱۳. ضریب توان ورودی و خروجی SSVR اندازه‌گیری شده در بازه خرداد ماه ۱۴۰۱.

توان‌های اکتیو ورودی و خروجی دستگاه SSVR در شکل ۱۴ نشان داده شده است. توان‌های ورودی از سمت شبکه به داخل SSVR با رنگ قرمز و توان‌های خروجی از سمت SSVR به سمت بار با رنگ مشکی ترسیم شده‌اند. مقایسه توان‌های اکتیو ورودی و خروجی در شکل ۱۴ نشان دهنده تلفات بسیار پایین SSVR پیشنهادی است. این نتایج، تلفات پایین SSVR پیشنهادی و عدم تأثیر آن بر روی کیفیت توان و ضریب توان شبکه به خوبی آشکار شده است.



شکل ۱۴. توان‌های اکتیو ورودی و خروجی SSVR اندازه‌گیری شده در بازه خرداد ماه ۱۴۰۱.

نتیجه‌گیری

در این مقاله طراحی و ساخت SSVR برای جبران افت ولتاژ تعدادی از مشترکین شرکت توزیع برق که دارای افت ولتاژ هستند مورد بررسی قرار گرفت. جزئیات مربوط به طراحی و ساخت نمونه آزمایشگاهی SSVR، ۵ کیلو ولت آمپر ارایه گردید. سیستم‌های کنترلی و حفاظتی دستگاه تشریح شدند. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که SSVR ساخته شده قابلیت تنظیم ولتاژ را به محدوده قابل قبول در زیر بار دارد. علاوه بر این با توجه به ماهیت سیستم کلیدزنی در نظر گرفته شده که از نوع تریاک می‌باشد، شکل موج ولتاژ یا جریان ورودی و خروجی برش داده نمی‌شود و تغییرات تپ SSVR پیشنهادی در هنگام عبور جریان از صفر صورت می‌گیرد. این موضوع، مانع ایجاد هارمونیک‌های ولتاژ در سمت خروجی دستگاه شده که کیفیت برق تحویل شده به بار را کاهش نمی‌دهد. به طور کلی نتایج به دست آمده نشان می‌دهند که تجهیز دارای کارایی بالایی در جبران سازی افت ولتاژ ناشی از فیدرهای طولانی فشارضعیف است.

تقدیر و تشکر

این پژوهش توسط شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان بر اساس قرارداد پژوهشی فی مابین دانشگاه فنی و حرفه‌ای و شرکت توزیع نیروی استان لرستان به شماره ۳۱/۲۲۷۳۲ مورد حمایت قرار گرفت. از آقایان مهندس ابراهیم شریفی‌پور مدیر دفتر تحقیقات و مهندس کمالوند کارشناس واحد تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق استان لرستان به دلیل حمایت‌های همه جانبه از پروژه فوق، تشکر به عمل می‌آید.

References

- [1] Schatz, R. A. (1966). *Electronic load tap changer systems*. (US3275929A). Google Patents <https://patents.google.com/patent/US3275929A/en>
- [2] Kandula, R. P., Chen, H., Prasai, A., Lambert, F., Schatz, J., & Divan, D. (2016, September 18-22). *Field upgradeable transformer: A fractionally-rated voltage regulator for the distribution system*. 2016 Institute of Electrical and Electronics Engineers Energy Conversion Congress and Exposition, Milwaukee, Wisconsin, United States. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855116>
- [3] Mikha-Beyranvand, M., Faiz, J., Rezaealam, B., Rezaei-Zare, A., & Jafarboland, M. (2019). Thermal analysis of power transformers under unbalanced supply voltage. *The Institution of Engineering and Technology Electric Power Applications*, 13(4), 503-512. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2018.5799>
- [4] García, S. M., Rodríguez, 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>
- [5] García, S. M., & Fernández, S. M. (2022). Effective Magnetic-Nonius Onload Tap Changer Stabilizer for High Power Medium Voltage Lines. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Transactions on Industrial Electronics*, 69(7), 6484-6496. <https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3097661>
- [6] 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>
- [7] Chen, H., Kandula, R. P., Prasai, A., Schatz, J., & Divan, D. (2016, September 18-22). *Flexible transformers for distribution grid control*. 2016 Institute of Electrical and Electronics Engineers Energy Conversion Congress and Exposition Milwaukee, Wisconsin, United States. <https://doi.org/10.1109/ECCE.2016.7855121>
- [8] 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>
- [9] 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>
- [10] 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>
- [11] Wijesooriya, P. N., Kularatna, N., & Steyn-Ross, D. A. (2020). Efficiency Enhancements to a Linear AC Voltage Regulator: Multiwinding Versus Multitransformer Design. *Institute of Electrical and Electronics Engineers Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 1(2), 192-199. <https://doi.org/10.1109/JESTIE.2020.3003350>

- [12] Nasef, A., Shaheen, A., & Khattab, H. (2022). Local and remote control of automatic voltage regulators in distribution networks with different variations and uncertainties: Practical cases study. *Electric Power Systems Research*, 205(4), 107773. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.107773>
- [13] Wang, M., Feng, M., Zhou, W., & Li, H. (2022, August 14-18). *Stabilizing Voltage in Power Distribution Networks via Multi-Agent Reinforcement Learning with Transformer*. Proceedings of the 28th ACM SIGKDD Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, Washington District of Columbia, United States of America. <https://doi.org/10.1145/3534678.3539480>
- [14] De Negreiros, G. F., Lobo, F. X., Torres, I. C., & Tiba, C. (2023). Impact on Voltage Regulation in Medium Voltage Distribution Networks Due to the Insertion of Photovoltaic Generators. *Energies*, 16(3), 1307. <https://doi.org/10.3390/en16031307>
- [15] Mikhak-Beyranvand, M., & Bastami, H. (2023). Design and manufacture of solid state voltage regulator for automatic voltage drop compensation. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 20(1), 55-75. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.335171.2053>
- [16] Astashev, M. G. (2021). Thyristor Voltage Regulators of the Transformer for Distribution Networks. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education*, 12(10), 2001-2014. <https://www.turcomat.org/index.php/turkbilmcat/article/view/4706>
- [17] 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>