Journal of Water and Wastewater Science and Engineering (JWWSE)
Vol. 7, No. 1, PP. 62-76, Spring 2022
DOI: 10.22112/JWWSE.2021.295288.1279

نشریه علمی
علوم و مهندسی آب و فاضلاب
سال هفتم، شماره ۱، صفحات ۶۲-۷۶، بهار ۱۴۰۱

Research Paper

SCADA-Based Protection of Centrifugal and Submersible Electric Pumps in the Water Industry

Reza Khalaji[1] and Mohsen Jannati[1*]
1- Department of Electrical Engineering, Shahreza Campus, University of Isfahan, Iran.
*Corresponding Author, Email: m.jannati@shr.ui.ac.ir

Received: 19/07/2021
Revised: 17/10/2021
Accepted: 10/11/2021
© IWWA

Abstract

Global water shortages and droughts, on the one hand, and population growth, dispersion of water and sewage facilities, and the growing need for drinking water, on the other hand, highlight the need for an efficient management of drinking water supply and distribution. Electro pumps, which are a kind of power system in the water industry, have a major role in extracting water as well as pumping and transferring it from one reservoir to another. One of the major challenges in this system is the protection of electro pumps against the overcurrent. The protection of electro pumps is traditionally based on the use of bimetallic relays, load control or overcurrent relays. However, in some cases, the malfunction of relays, the end of their useful life and their deviation from the specified current range result in the lack of a reliable and fast protection, which will eventually lead to burnout and social problems. On the other hand, the use of SCADA system has been considered as an undeniable necessity in the water industry to provide a safe and continuous supply of urban and rural drinking water, as well as its optimal distribution in terms of quality and quantity. Therefore, in this paper a SCADA-based method is proposed to protect surface/submersible electro pumps against the overcurrent and other faults. Examination of the practical results obtained from the implementation of the proposed method in Chaharmahal and Bakhtiari Water and Wastewater Company shows that the proposed protection method can significantly stop deviation of water industry electro pumps from the drinking water extraction cycle, and thus prevent social problems and dissatisfactions resulted from the cutting off the water.

Keywords: Centrifugal and submersible electric pumps, Overcurrent protection, SCADA.

مقاله پژوهشی

حفاظت الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور در صنعت آب به کمک اسکادا

رضا خلجی[۱] و محسن جنتی*[۱]
۱- گروه مهندسی برق، مرکز آموزش عالی شهرضا، دانشگاه اصفهان، ایران
*نویسنده مسئول، ایمیل: m.jannati@shr.ui.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۸
تاریخ اصلاح: ۱۴۰۰/۰۷/۲۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۱۹
© انجمن آب و فاضلاب ایران

چکیده

کم آبی کره زمین و خشک‌سالی از یک‌سو، افزایش جمعیت، پراکندگی تأسیسات آب و فاضلاب و نیاز روز افزون به آب شرب از سوی دیگر، ضرورت رویکرد مناسب به مدیریت کارآمد تأمین و توزیع آب شرب و بهداشتی را بیشتر از پیش نمایان می‌سازد. الکتروپمپ‌ها که به‌نوعی سیستم‌های قدرت در صنعت آب و فاضلاب به‌شمار می‌روند، نقش عمده و اساسی در استحصال آب و هم‌چنین پمپاژ و انتقال آن از مخزنی به مخزن دیگر را برعهده دارند. یکی از چالش‌های بزرگ موجود در این سیستم، حفاظت الکتروپمپ‌های سطحی و شناور در برابر اضافه جریان است. حفاظت الکتروپمپ‌ها به‌شیوه سنتی مبتنی بر استفاده از انواع رله‌های بی‌متال، کنترل بار یا رله‌های کنترل جریان است. اما عدم عملکرد صحیح رله‌ها در برخی موارد، پایان عمر مفید رله و خارج شدن رله از محدوده جریان مشخص شده باعث عدم حفاظت مطمئن و به موقع الکتروپمپ‌ها در برابر اضافه جریان شده که در نهایت، سوختگی الکتروپمپ و مشکلات اجتماعی را به‌دنبال خواهد داشت. از طرف دیگر امروزه برای تأمین مطمئن و مداوم آب شرب شهری و روستایی و هم‌چنین توزیع بهینه آن از نظر کیفی و کمی و کنترل دائم پارامترهای مذکور، استفاده از سیستم اسکادا به‌عنوان یک ضرورت انکارناپذیر در صنعت آب و فاضلاب کشور موردتوجه بوده است. از همین‌رو در این مقاله یک روش حفاظتی مبتنی بر اسکادا برای حفاظت انواع الکتروپمپ‌های سطحی و شناور در برابر اضافه جریان و دیگر خطاها پیشنهاد شده است. بررسی نتایج عملی به‌دست آمده از اجرای روش پیشنهادی در آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری نشان می‌دهد که برنامه حفاظتی پیشنهادی می‌تواند کمک قابل‌توجهی درجهت جلوگیری از خارج شدن الکتروپمپ‌های صنعت آب و فاضلاب از چرخه استحصال آب شرب نموده و از مشکلات اجتماعی قطع آب مشترکین و نارضایتی‌های حاصل از آن نیز جلوگیری به‌عمل آورد.

واژه‌های کلیدی: الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور، حفاظت اضافه جریان، اسکادا

۱- مقدمه

امروزه بحران آب به یک موضوع مهم بین‌المللی تبدیل شده و بهره‌برداری بهینه از منابع موجود یک ضرورت جدی تلقی می‌شود (جهانگیری‌خواه و همکاران، ۱۴۰۰). عمده آب مورد استفاده در کشور از چاه‌های آب استحصال می‌شود و الکتروپمپ‌ها به عنوان بخشی مهم از این چرخه استحصال، نقش اساسی در تولید، پمپاژ و انتقال آب از مخزنی به مخزن دیگر بر عهده دارند. از همین‌رو حفاظت الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و الکتروپمپ‌های شناور در صنعت آب و فاضلاب بسیار حائز اهمیت بوده و همواره تلاش شده است تا درجهت کاهش هزینه‌های استحصال آب شرب، از خسارات ناشی از خرابی الکتروپمپ‌ها پیشگیری شود.

حفاظت الکتروپمپ‌های سطحی و شناور صنعت آب و فاضلاب در برابر اضافه جریان یکی از مهم‌ترین موضوعات و چالش‌های این صنعت است. در شیوه مرسوم (سنتی)، برای جلوگیری از آسیب‌دیدگی الکتروپمپ‌ها در برابر اضافه جریان و سایر خطاها تنها از انواع رله‌های بی‌متال، کنترل بار یا رله‌های کنترل جریان استفاده می‌شود. اما عدم عملکرد صحیح این رله‌ها در موارد متعدد باعث عدم حفاظت مطمئن و به موقع الکتروپمپ در برابر اضافه جریان و سایر خطاها شده و درنهایت سوختگی الکتروپمپ را به‌دنبال خواهد داشت.

از دیگر سو، با توجه به ماهیت شبکه آب‌رسانی و فاصله منابع تولید به‌ویژه چاه‌ها، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ از یکدیگر، کنترل شبکه آب‌رسانی مستلزم وجود تعداد زیادی اپراتور، هزینه‌های بالای بهره‌برداری، نگهداری، رفت و آمد، قبول خطاهای ناشی از عملکرد اشتباه و یا تأخیرات آن‌ها است. از این‌رو، استفاده از سیستم‌های تله‌متری و کنترل از راه دور چون اسکادا در تأسیسات تأمین، انتقال و توزیع آب، به بهره‌برداری بهینه از منابع آب کمک مؤثری می‌نماید.

اسکادا در یک سیستم، سبب جمع‌آوری اطلاعات و کنترل سیستم از راه دور شده و امکان ارسال دستورالعمل‌های کنترلی به سیستم را برای کاربر فراهم می‌کند. هسته اصلی این سیستم‌ها بسته‌های نرم‌افزاری حرفه‌ای هستند که بر روی سخت‌افزارهای استاندارد و مشخصی از قبیل PLC و RTU نصب می‌شوند (نخعی و همکاران، ۱۳۹۵). تکنولوژی اسکادا به بهترین شکل برای فرآیندهایی که در نواحی بزرگ پخش شده‌اند و نیاز به مداخله تکراری و منظم و یا سریع دارند مورد استفاده قرار می‌گیرد. امروزه صنایع بزرگی مانند شبکه‌های انتقال و توزیع برق، انتقال نفت و گاز، پتروشیمی، آب و آبیاری دارای تأسیساتی توزیع شده، بزرگ، پیچیده و حساس هستند که برای عملکرد درست لازم است که اطلاعات وضعیت عملکرد آن‌ها به‌طور پیوسته جمع‌آوری، مانیتور و کنترل شود (محرابیان، ۱۳۹۲؛ ایمانی و همکاران، ۱۳۹۳).

سیستم‌های اسکادا برای مانیتور یا کنترل پردازش‌های فیزیکی، شیمیایی، حمل و نقل و یا در سیستم‌های تأمین آب شهری، کنترل تولید و انتقال برق، مانیتور خطوط نفت و گاز و دیگر پردازش‌ها به‌کار گرفته می‌شوند. اسکادا به اپراتور مرکزی یک سیستم توزیع شده، مانند تأسیسات نفت، گاز، خطوط لوله، یا نیروگاه‌ها امکان تنظیم کنترلرها، باز و بسته کردن شیرها و کلیدها، نمایش آلارم‌ها و جمع‌آوری اطلاعات اندازه‌گیری شده را فراهم می‌آورد (اصفهانی، ۱۳۹۴؛ رجبی و همکاران، ۱۳۹۵). به‌طور کلی مزایای سیستم اسکادا عبارتند از (Dave et al., 2013; Gligor and Turc, 2012; Loganathan et al., 2014):

- امکان مانیتور و کنترل کردن پروسه‌های دور دست و کاهش هزینه‌های مربوط به بازدیدهای دوره‌ای؛
- امکان تنظیم کنترلرها، باز و بسته کردن شیرها، کلیدها و کلیه تجهیزات ابزار دقیق از راه دور؛
- کاهش خطاهای اپراتور به‌جهت کیفیت و دقت بالای اطلاعات؛
- نمایش اجزای تشکیل‌دهنده پروسه به‌همراه جزئیات آن به‌صورت لحظه‌ای مانند سطح مایعات، فشار و دمای مجاز در یک مخزن؛
- اعلام خطا یا آلارم؛
- محاسبه ساعت کارکرد تجهیزات؛
- تهیه گزارش‌های مدیریتی.

اهداف کلی استقرار سیستم اسکادا در تأسیسات آب و فاضلاب عبارتند از:

- مدیریت تولید، انتقال و ذخیره‌سازی آب؛
- مدیریت مصرف؛
- مدیریت فشار شبکه؛
- مدیریت انرژی؛
- مدیریت کیفیت آب؛
- حفاظت فیزیکی تأسیسات.

با توجه به توضیحات ارائه شده، با نصب و راه‌اندازی سیستم تله‌متری و کنترل از راه دور می‌توان کل شبکه آب‌رسانی را هم‌زمان و با تعداد محدودی اپراتور تحت کنترل قرار داد و تصمیمات صحیح را با سرعت بالا اتخاذ کرد. ورود سیستم‌های اتوماسیون تله‌متری و کنترل از راه دور در صنعت آب و فاضلاب که از آن جمله می‌توان به سیستم هوشمند اسکادا اشاره نمود، باعث می‌شود تا کنترل ایستگاه‌های پمپاژ، چاه‌ها، مخازن و

شبکه‌های انتقال و توزیع در زمینه‌های مختلفی تحت کنترل قرار گرفته و علاوه‌بر این‌که بسیاری از هزینه‌ها را کاهش می‌دهد، باعث صرفه‌جویی در مصرف آب شود (امینی و همکاران، ۱۳۹۱؛ جمشیدی، ۱۳۹۹؛ کاظمی‌نژاد، ۱۳۹۰؛ Adrian-Lucian, 2017).

از همین‌رو در این مقاله به‌منظور حفاظت الکتروپمپ‌های سطحی و شناور صنعت آب و فاضلاب در برابر اضافه جریان یک‌روش جدید حفاظتی مبتنی بر اسکادا پیشنهاد شده است. این برنامه به‌نوعی حفاظت مکمل برای روش‌های حفاظت مرسوم الکتروپمپ‌ها بوده و درصورت عملکرد ناصحیح دستگاه‌های حفاظتی به‌روش مرسوم، به‌کمک آمده و از هرگونه تداوم شرایط غیرایمن و ایجاد آسیب‌دیدگی و خسارت احتمالی پیشگیری می‌نماید. روش پیشنهادی علاوه‌بر حفاظت الکتروپمپ در برابر اضافه جریان، حفاظت در برابر خطاهای دیگری مانند خطای ایجاد عدم تعادل در ولتاژ ورودی و خطای خارج شدن الکتروپمپ از حالت کار طبیعی را به‌عمل می‌آورد. طبق بررسی‌های انجام گرفته برنامه حفاظتی پیشنهادی برای اولین بار در صنعت آب و فاضلاب کشور پیشنهاد و در آب و فاضلاب شهرکرد مورد پیاده‌سازی عملی قرارگرفته است. برنامه پیشنهادی می‌تواند کمک بسیار قابل‌توجهی درجهت جلوگیری از خارج شدن الکتروپمپ‌ها از چرخه استحصال آب شرب نموده و از مشکلات اجتماعی قطع آب مشترکین و نارضایتی‌های حاصل از آن نیز پیشگیری نماید. پیکربندی این مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ اجزای و ساختار اسکادا ازنظر خواهد گذشت. اصول الکتروپمپ‌های صنعت آب و فاضلاب در بخش ۳ آورده شده است. در بخش ۴ حفاظت جامع پیشنهادی مبتنی بر اسکادا بیان می‌شود. بررسی نتایج پیاده‌سازی عملی و نتیجه‌گیری نیز به ترتیب در بخش‌های ۵ و ۶ ارائه می‌شود.

۲- اجزا و ساختار اسکادا

۲-۱- اجزای اسکادا

یک سیستم اسکادا همانند شکل ۱ شامل ۵ بخش کلی:

۱) MTU[۱]؛

۲) RTU[۲] یا PLC[۳]؛

۳) شبکه‌های HMI؛

۴) مخابرات و

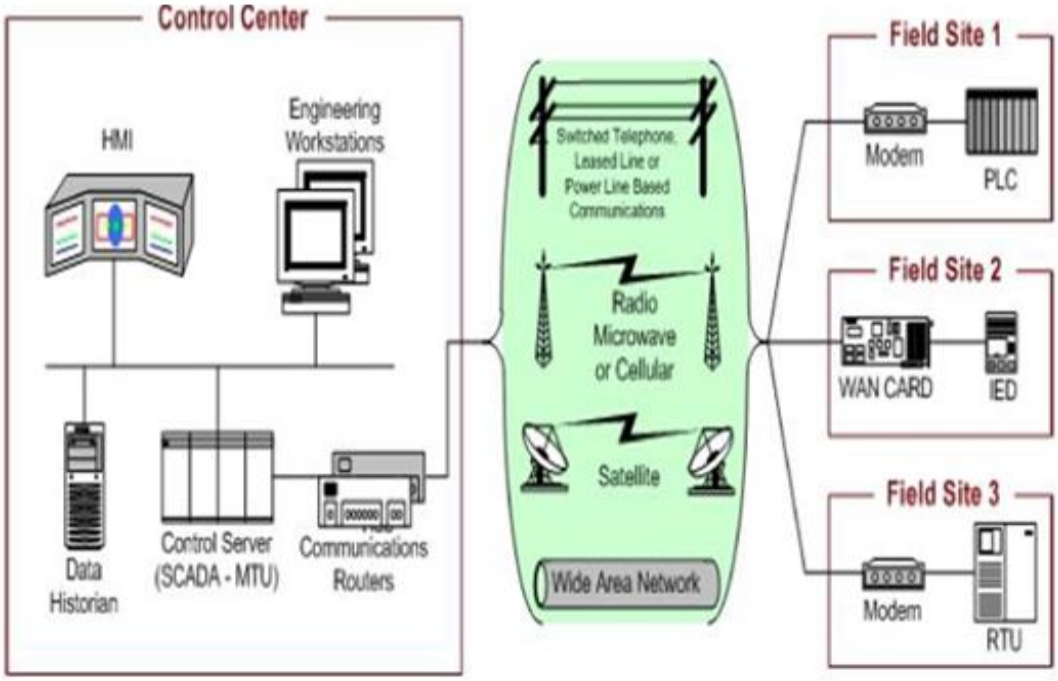
۵) نرم‌افزار.

۲-۲- ساختار اسکادا

اصولاً یک سیستم اسکادا در صنعت می‌تواند به سه صورت زیر ایجاد شود (بابایی و همکاران، ۱۳۹۳؛ ذاکر و همکاران ۱۳۹۱):

- سیستم متمرکز (یکپارچه)؛
- سیستم غیرمتمرکز (توزیع شده)؛
- سیستم شبکه‌ای.

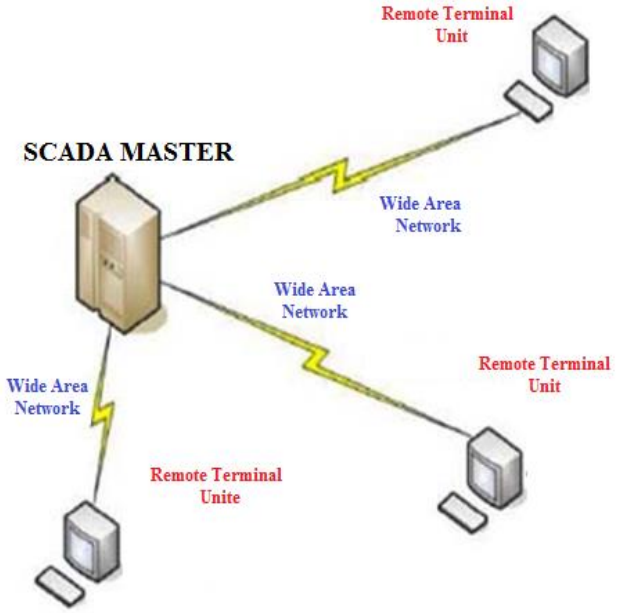
در ادامه به توضیح هر یک از این سیستم‌ها پرداخته می‌شود.



شکل ۱- اجزای یک سیستم اسکادا

۲-۲-۱- سیستم متمرکز (یکپارچه)

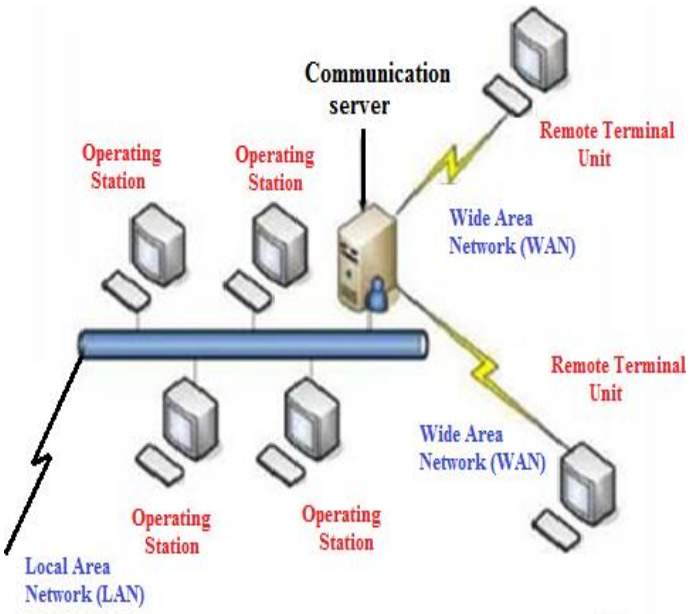
سیستم‌های متمرکز برای شبکه‌های کوچک مناسب هستند و دارای مزایایی بوده که از جمله آن‌ها می‌توان به بهره‌برداری بهتر از سایت کامپیوتری، تعمیرات و نگهداری راحت‌تر و تهیه آسان پشتیبان از بانک‌های اطلاعاتی آن اشاره نمود. اما از آن‌جایی که این سیستم متمرکز است و همه اطلاعات تجهیزات به‌یک مرکز مخابره می‌شود، بنابراین علاوه بر نیاز به ظرفیت بالای تجهیزات مرکزی سبب می‌شود که درصورت از دست رفتن کامپیوترهای آن، اطلاعات کل سیستم از دست برود. شکل ۲ یک نوع سیستم متمرکز را نشان می‌دهد.



شکل ۲- سیستم متمرکز در اسکادا

۲-۲-۲- سیستم غیرمتمرکز (توزیع شده)

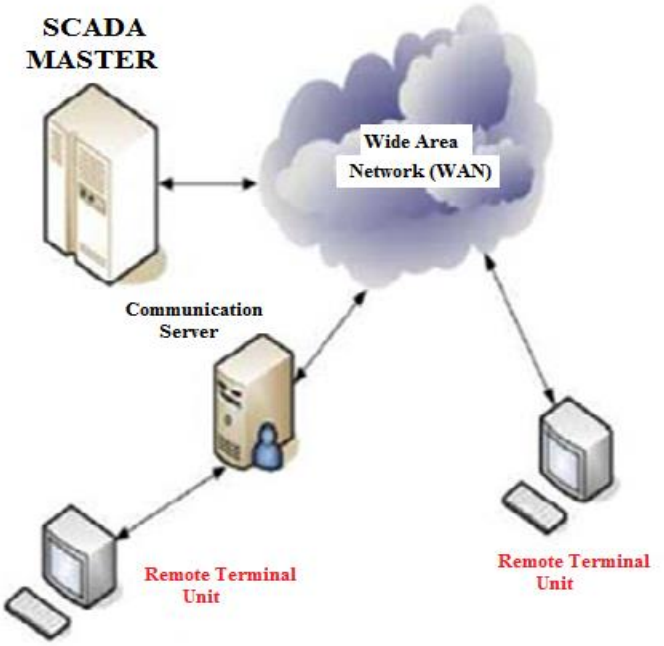
سیستم غیرمتمرکز سیستمی است که کامپیوترهای جمع‌آوری اطلاعات آن در یک سطح جغرافیایی پخش شده‌اند. این نوع ساختار دارای مزایایی است که از جمله آن‌ها می‌توان به استفاده از کامپیوترهای با ظرفیت کمتر برای تشکیل یک سیستم بزرگ، نیازهای کم مخابراتی و کم شدن میزان از دست رفتن اطلاعات اشاره کرد. یکی از معایب این نوع ساختارها استفاده از بانک اطلاعاتی چندگانه است که نیاز به مدیریت سیستم پایگاه داده دارند. شکل ۳ یک سیستم غیرمتمرکز را نشان می‌دهد.



شکل ۳- سیستم غیرمتمرکز در اسکادا

۲-۲-۳- سیستم شبکه‌ای

نسل فعلی معماری اسکادا مبتنی بر ایستگاه اصلی محور است که از نزدیک به ساختار توزیع شده متصل شده است. با این تفاوت که از معماری سیستم باز Open System Architecture به‌جای یک کنترل اختصاصی Vendor Controlled استفاده می‌کند. شکل ۴ شمای کلی این ساختار را نمایش می‌دهد. در این مقاله از سیستم شبکه‌ای در اسکادا برای حفاظت الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور صنعت آب و فاضلاب استفاده شده است.



شکل ۴- سیستم شبکه‌ای در اسکادا

۳- الکتروپمپ‌های صنعت آب و فاضلاب

همان‌گونه که اشاره شد الکتروپمپ‌ها که به‌نوعی سیستم‌های قدرت در صنعت آب و فاضلاب به‌شمار می‌روند، نقش عمده و اساسی در استحصال، پمپاژ و انتقال آب از مخزنی به مخزن دیگر برعهده دارند. لذا سیستم اسکادا در این صنعت نیز فعالیت‌های زیادی را درجهت تحت کنترل قرار دادن این الکتروپمپ‌ها به‌کار گرفته است. شکل ۵ یک نمونه از الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور مورد استفاده در صنعت آب و فاضلاب را نشان می‌دهد.

شکل ۵- نمونه‌ای از الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور مورد استفاده در صنعت آب و فاضلاب

در انواع کاربرد الکتروپمپ‌ها، حداقل توان مورد نیاز وابسته به عوامل مختلفی است. روش استاندارد محاسبه توان الکتروپمپ براساس عوامل مختلف به‌صورت زیر است:

$$P_N = P_{BHP} \times \frac{F_S \times F_A \times F_T}{\eta T} \quad (۱)$$

که PN: حداقل توان مورد نیاز الکتروموتور برحسب کیلووات؛ P_{BHP}: توان جذبی پمپ برای شرایط کاری برحسب کیلووات؛ F_S: ضریب ایمنی در توان جذبی؛ F_A: فاکتور تأثیر ارتفاع از سطح دریا، F_T: فاکتور تأثیر دمای محیط و ηT: بازده کوپلینگ یا گیربکس هستند.

برای شرایط خاص عوامل دیگری مانند رطوبت هوا، گرد و غبار و عملکرد غیردائم الکتروموتور ممکن است تأثیرگذار باشد.

هم‌چنین P_{BHP} از رابطه (۲) محاسبه می‌شود:

$$P_{BHP} = \frac{9.81 \times S.G \times Capacity \times Total\ head}{Pump\ Efficiency} \quad (۲)$$

که $S.G$: وزن مخصوص سیّال پمپ شونده، *Capacity*: دبی پمپاژ بر حسب مترمکعب بر ثانیه، *Total head*: ارتفاع پمپاژ برحسب متر و *Pump efficiency*: بازده پمپ هستند.

اکثر شرکت‌های سازنده الکتروپمپ برای محصولات خود جداول و نمودارهای مخصوصی ارائه می‌نمایند که این موضوع باعث شده تا انتخاب الکتروپمپ مناسب، به سهولت و سادگی انجام شود. جدول ۱ نمونه جدول انتخاب الکتروپمپ موردنظر در این مقاله که یک الکتروپمپ شناور با قدرت ۵۵ کیلووات است را نمایش می‌دهد.

جدول ۱- جدول انتخاب الکتروپمپ

موتور + پمپ	تعداد طبقات	توان نامی		جریان	قطر چاه	قطر لوله	وزن	ارتفاع	طول کلی	قطر نامی سوپاپ
		کیلووات	اسب بخار	آمپر	اینچ	اینچ	کیلوگرم	متر	میلی‌متر	
۷ A ۱۵۳/۲ + ۳۸۴/۲	۲	۱۵	۲۰	۳۲	۱۰	۵	۱۴۸	۵۵	۱۷۵۰	رزوه‌ای ۵ اینچ
۷ A ۱۸۳/۲ + ۳۸۴/۳	۳	۱۸/۵	۲۵	۴۰	۱۰	۵	۱۷۳	۷۰	۱۹۶۰	
۷ A ۲۴۳/۲ + ۳۸۴/۳	۳	۲۴/۵	۳۳	۵۱	۱۲	۵	۲۲۹	۸۲	۲۲۲۶	
۹ A ۳۰۳/۲ + ۳۸۴/۴	۴	۳۰	۴۱	۶۵	۱۲	۵	۲۷۹	۱۰۱	۲۲۷۶	
۹ A ۳۷۳/۲ + ۳۸۴/۴	۴	۳۰	۴۱	۶۵	۱۲	۵	۲۸۳	۱۱۰	۲۲۷۶	
۹ A ۳۷۳/۲ + ۳۸۴/۵	۵	۳۷	۵۰	۸۰	۱۲	۵	۳۱۶	۱۳۷	۲۵۰۶	
۹ A ۴۵۳/۲ + ۳۸۴/۶	۶	۴۵/۵	۶۲	۹۶	۱۲	۵	۳۵۰	۱۶۵	۲۷۳۷	
۹ A ۵۵۳/۲ + ۳۸۴/۷	۷	۵۵	۷۵	۱۱۵	۱۲	۵	۳۸۰	۱۹۲	۲۹۳۶	
۹ A ۶۲۳/۲ + ۳۸۴/۸	۸	۶۲/۵	۸۵	۱۳۲	۱۲	۵	۴۱۱	۲۲۰	۳۱۴۶	
۹ A ۷۳۳/۲ + ۳۸۴/۹	۹	۷۳/۵	۱۰۰	۱۵۵	۱۲	۵	۴۴۶	۲۴۷	۳۴۱۶	
۹ A ۷۳۳/۲ + ۳۸۴/۱۰	۱۰	۷۳/۵	۱۰۰	۱۵۵	۱۲	۵	۴۵۷	۲۷۴	۳۵۴۶	

۳-۱- بررسی علل آسیب دیدگی الکتروپمپ‌ها

متداول‌ترین علل آسیب‌دیدگی الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور در صنعت آب و فاضلاب که بیشترین خسارات را به‌بار می‌آورند به سه دسته خطای کلّی تقسیم می‌شوند:

- خطای ایجاد عدم تعادل در ولتاژ ورودی (PCF[۴])؛
- خطای خروج الکتروپمپ از حالت کار طبیعی (GF[۵])؛
- خطای اضافه جریان (OCF[۶]).

در ادامه عوامل ایجاد هر خطا و سپس نحوه حفاظت به‌روش مرسوم در برابر آن خطاها تشریح می‌شود.

۳-۱-۱- خطای ایجاد عدم تعادل در ولتاژ ورودی

این خطا در مواردی رخ می‌دهد که به‌هر عنوان میزان ولتاژ ورودی در حالت سه‌فاز از اندازه نرمال خود خارج شده و یک افزایش و یا کاهش ولتاژ را سبب شود. این امر می‌تواند به‌علت نوسانات ایجاد شده در شبکه توزیع برق و یا وارد و خارج شدن یک مصرف‌کننده بزرگ در سیستم توزیع باشد. هم‌چنین در

مواردی قطع یک، دو و یا سه‌فاز از ورودی به‌علت قطع فیدر و یا خارج شدن فیوز cut out مربوط به هر فاز به‌علت هرگونه اتصال کوتاه اتفاق می‌افتد. فیوز cut out یکی از وسایلی است که در سیستم‌های توزیع انرژی الکتریکی برای جداکردن سریع بخش‌هایی که دچار خطا شده‌اند از سایر بخش‌های سیستم استفاده می‌شود. ترانسفورماتورهای توزیع غالباً ازطریق این فیوز به خطوط اولیه متصل می‌شوند. دستگاهی که چنین خطاهایی را تشخیص داده و در برابر آن‌ها عکس‌العمل نشان می‌دهد کنترل فاز نام دارد.

۳-۱-۲- خطای خروج الکتروپمپ از حالت کار طبیعی

معمولاً روش راه‌اندازی الکتروپمپ‌ها در صنعت به‌روش ستاره-مثلث است. در این‌روش با عملیات استارت، الکتروپمپ به‌حالت ستاره راه‌اندازی شده و پس از رسیدن به دور مورد نظر به‌حالت مثلث تغییر وضعیت می‌دهد. در واقع حالت مثلث وضعیت کار دائمی و طبیعی الکتروپمپ است. در حالت ایجاد خطای GF، الکتروپمپ به‌نوعی از حالت کار دائم که همان وضعیت مثلث است خارج شده که این امر موجب آسیب دیدگی الکتروموتور می‌شود. یکی از علت‌های این رخداد قطع شدن کنتاکتور حالت مثلث در حین کار است. این مسئله معمولاً به‌علت خرابی بوبین کنتاکتور یا ایجاد مشکلی در مدار فرمان اتفاق می‌افتد.

۳-۱-۳- خطای اضافه جریان

معمولاً ایجاد اضافه جریان در الکتروپمپ می‌تواند دلایل مختلفی داشته باشد. اما عمده‌ترین و شاخص‌ترین علت در الکتروپمپ‌های گریز از مرکز، بالارفتن اصطکاک در یاتاقان‌ها و بلبرینگ‌های دو سرالکتروموتور یا پمپ که در اثر عدم روان‌کاری به موقع یا مستهلک شدن آن‌ها به‌وجود می‌آید. هم‌چنین در الکتروپمپ‌های شناور خرابی کف‌گرد انتهای پمپ شناور، باعث بالارفتن جریان کاری شده و این امر باعث ایجاد صدمه به سیم پیچ الکتروموتور می‌شود. تجهیز حفاظتی مرسوم برای پایش اضافه جریان در تابلوهای راه‌انداز، "رله بی‌متال" است. رله بی‌متال که یک عنصر مکانیکی-الکترونیکی است، با گذشت زمان حساسیت خود را از دست داده و ممکن است به‌درستی عمل نکند. با توجه به این‌که بی‌متال‌ها براساس تغییرات دما کار می‌کنند، تغییر دمای محیط می‌تواند روی عملکرد دقیق آن‌ها تأثیر داشته باشد و عملکرد آن‌را با خطا مواجه کند. به‌همین علت در برنامه اسکادا و نگارش طرح حفاظتی در IsaGraf از یک بازه جریان برای فازهای R، S و T استفاده شده تا در زمان ایجاد اضافه جریان و تجاوز از محدوده مشخص شده سیستم اسکادا اقدام به خاموش کردن الکتروپمپ نماید.

۴- حفاظت جامع پیشنهادی مبتنی بر اسکادا

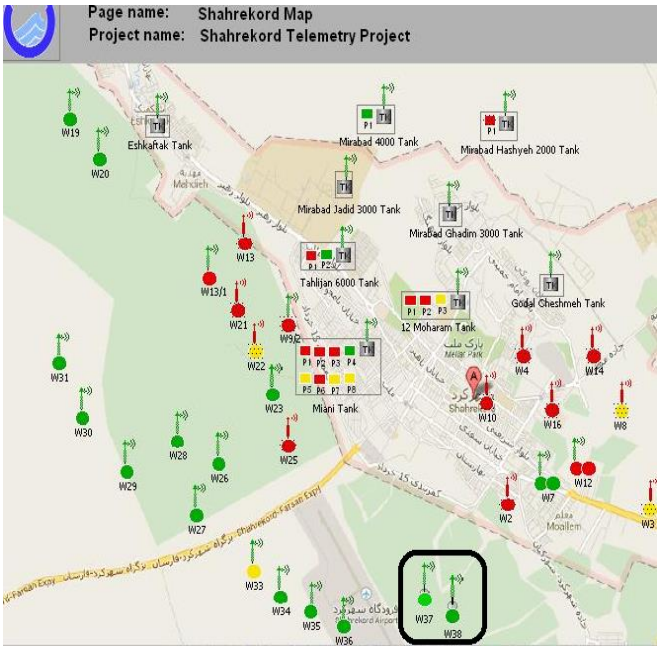
سیستم تله‌متری و کنترل از راه دور توسط اسکادا، یکی از به‌روزترین و کامل‌ترین سیستم‌های موجود برای کنترل و مانیتورینگ در صنعت آب و فاضلاب است. لذا احساس نیاز و لزوم استفاده از آن برای به‌دست آوردن راندمان بالاتر و خدمات‌رسانی با کیفیت‌تر باعث شده تا اکثر شرکت‌های آب و فاضلاب کشور به‌سمت به‌کارگیری سیستم مذکور در تأسیسات خود سوق داده شوند. روش حفاظت پیشنهادی در این مقاله برای حفاظت الکتروپمپ‌های شناور و سطحی از طریق سیستم اسکادا (که تنها بخشی از قابلیت‌های بالای این سیستم است)، نوعی حفاظت مکمل برای روش‌های حفاظتی مرسوم است. بدین صورت که درصورت عدم عملکرد صحیح هر یک از دستگاه‌های حفاظتی چون رله کنترل فاز، رله کنترل بار یا رله بی‌متال اقدام به توقف کار دستگاه در کمترین زمان ممکن می‌نماید.

به‌منظور بررسی عملکرد صحیح روش، روش پیشنهادی به‌طور عملی بر روی دو حلقه چاه شماره ۳۷ و ۳۸ شهرستان شهرکرد که در سال‌های اخیر احداث و مورد بهره‌برداری قرارگرفته‌اند پیاده‌سازی شده است. این چاه‌ها هرکدام با یک دستگاه الکتروپمپ شناور با توان ۵۵ کیلووات راه‌اندازی و بهره‌برداری شده‌اند. هم‌چنین این دو حلقه چاه از طریق سیستم اسکادا به شبکه دیگر چاه‌ها و مخازن پیوسته و از طریق مانیتورینگ اتاق کنترل توسط اپراتور راهبری می‌شوند. شکل ۶ شمای کلّی سیستم تله‌متری چاه‌ها، مخازن و ایستگاه‌های پمپاژ شهرکرد و چاه‌های شماره ۳۷ و ۳۸ را نشان می‌دهد. شکل ۷ نیز نمای بیرونی چاه‌های شماره ۳۷ و ۳۸ شهر شهرکرد را نشان می‌دهد.

شایان ذکر است که روند تأمین هزینه‌های خرید انواع سخت‌افزارهای اصلی شامل RTU، UPS[۷] و تابلوهای مربوط به هر کدام، Power Meter و دیگر لوازم با همکاری معاونت بهره‌برداری آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری صورت‌گرفته است. شکل ۸ تابلوهای مورد نیاز نصب شده و RTU و متعلقات آن در چاه‌های ۳۷ و ۳۸ شهرکرد را به تصویر می‌کشد.

روش حفاظت جامع پیشنهادی در این مقاله بدین صورت است که درصورت به‌وجود آمدن عدم تعادل در ولتاژ ورودی، سیستم اسکادا که در حال قرائت مقادیر ولتاژ ورودی است، خطای ایجاد عدم تعادل ولتاژ را تشخیص داده و با ثبت خطای کنترل

فاز در برنامه نوشته شده، اقدام به خارج کردن الکتروپمپ از مدار می‌نماید. سپس در کادر مربوط به Pump-Status حالت On به Off تبدیل شده و در چراغ سیگنال CP Fault با رنگ قرمز روشن شده و چراغ سیگنال Run که به رنگ سبز بود خاموش می‌شود. در این وضعیت اپراتور بلافاصله متوجه رخداد مربوطه می‌شود.

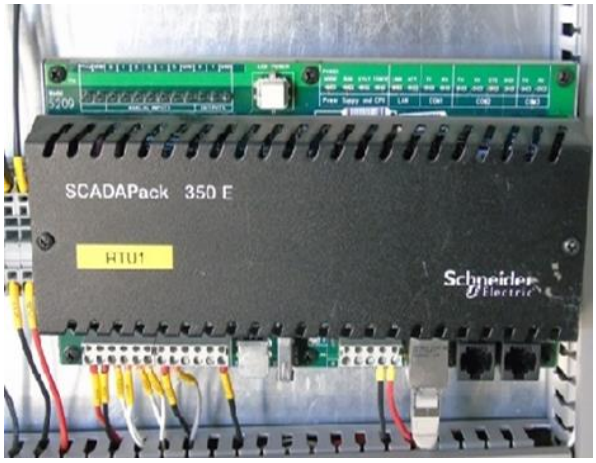


شکل ۶- شمای کلّی تله‌متری شهرکرد و محل قرارگیری چاه‌های شماره ۳۷ و ۳۸

شکل ۷- نمای بیرونی چاه‌های شماره ۳۷ و ۳۸ شهر شهرکرد

(الف)

(ب)

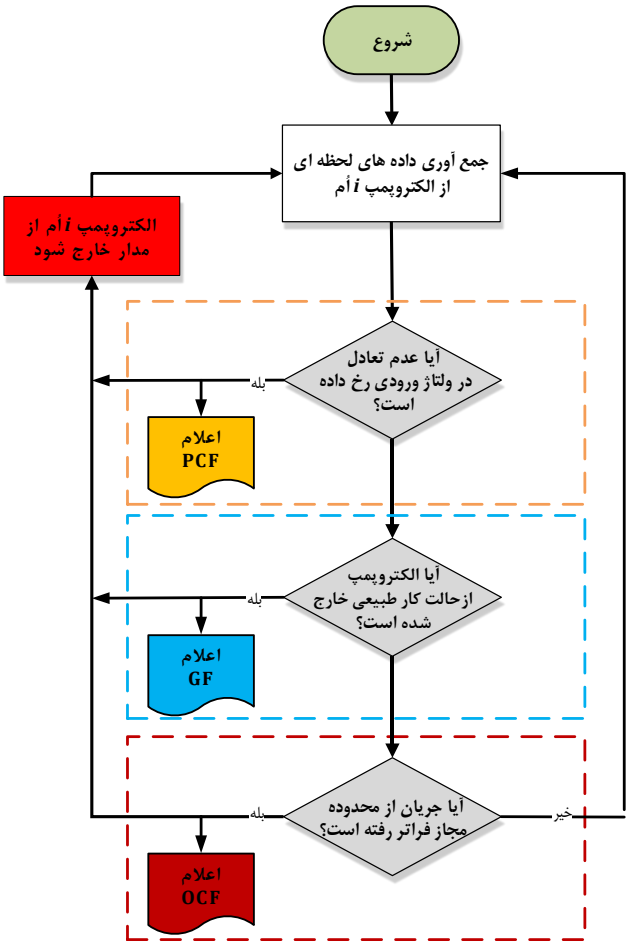


(ج)

شکل ۸- الف) تابلوهای نصب شده؛ ب) RTU و متعلقات نصب شده؛ و ج) RTU نصب شده در چاه‌های ۳۷ و ۳۸ شهرکرد

درصورت خطای خروج الکتروپمپ از حالت کار طبیعی، روش پیشنهادی از یک کنتاکت Normal Open در کنتاکتور مثلث که در زمان کار دائم به حالت بسته تبدیل می‌شود استفاده می‌شود. به‌این شکل که در حالت کار الکتروپمپ کنتاکت موردنظر باز شده و الکتروپمپ را از مدار خارج می‌نماید. هم‌چنین این خطا را نمایش داده و اپراتور را از اتفاق بوجود آمده مطلع می‌سازد.

درصورت رخداد خطای اضافه جریان، در برنامه اسکادا محدوده جریان مصرفی در هر فاز اندازه‌گیری شده و این مقادیر به مقایسه‌گرهایی که در برنامه IsaGraf وجود دارد داده می‌شود. با بالارفتن مقادیر جریان از محدوه تعریف شده، سیستم عمل کرده و الکتروپمپ را بدون وقفه از مدار خارج خواهد کرد. روندنمای روش حفاظت پیشنهادی در این مقاله در برابر خطاهای مختلف در شکل ۹ نشان داده شده است.

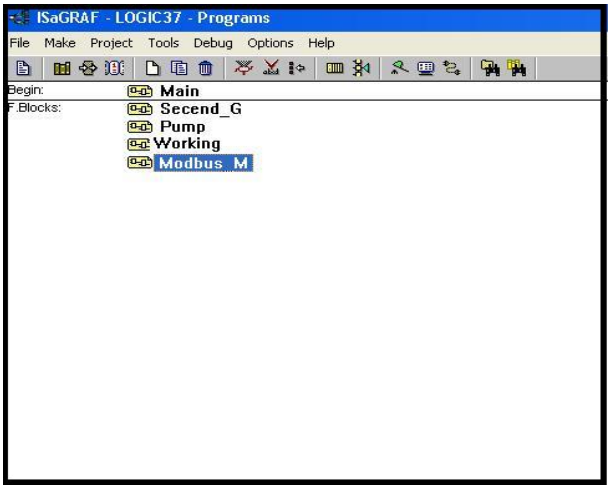


شکل ۹- روندنمای روش حفاظت پیشنهادی مبتنی بر اسکادا

در ادامه بخش‌های برنامه‌نویسی روش پیشنهادی در محیط اسکادا تشریح می‌شود.

۴-۱- بخش‌های برنامه

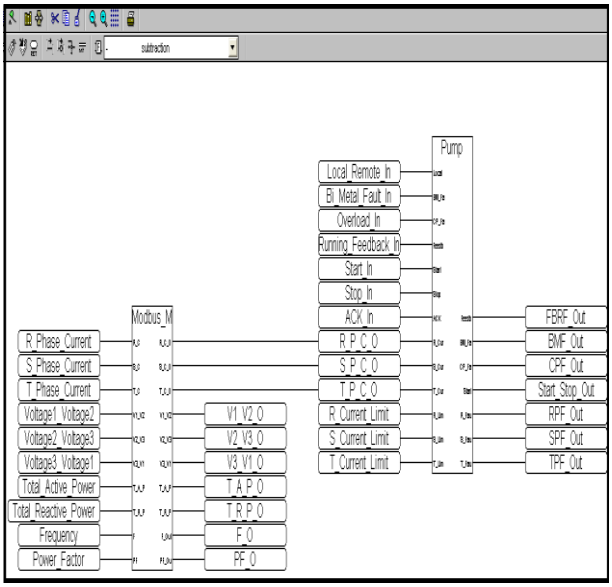
برنامه‌نویسی در IsaGraf بر مبنای گرافیک و از طریق FBD انجام می‌شود. برنامه از دو بخش کلی تشکیل می‌شود. بخش اول در واقع بخش اصلی (Main) برنامه را دربر می‌گیرد و بخش دوم برنامه (Function Block) است. بخش دوم نیز شامل چهار زیرمجموعه: Second G، Pump، Working و Modbus است. در هر بخش از برنامه نیازهای سیستم براساس برنامه حفاظتی و مواردی که باید تحت کنترل و پایش قرارگیرند مورد بررسی قرار می‌گیرد تا به‌ازای هر تحلیل و با استفاده از بلوک‌هایی که در کتابخانه IsaGraf موجود هستند چیدمان برنامه دلخواه به نگارش در آورده شود. شکل ۱۰ ایجاد Logic برنامه حفاظت برای یک الکتروپمپ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۰- ایجاد Logic برنامه حفاظت یک الکتروپمپ

۴-۱-۱- بخش Main

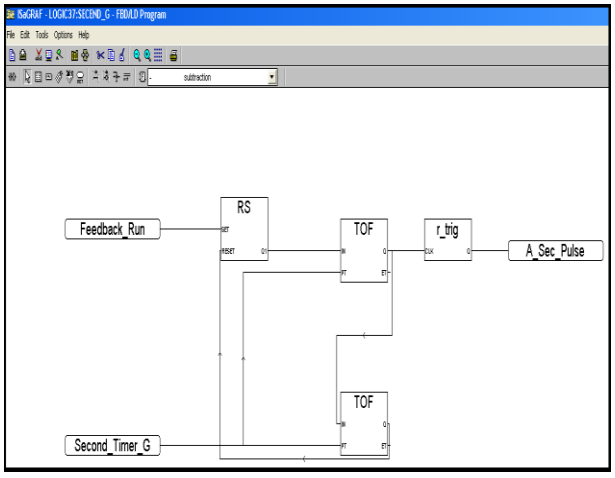
بخش اصلی برنامه حاوی سه خط برنامه‌نویسی است که در خط اول آن دو بلوک اصلی Modbus Mapping و Pump ایجاد شده است. در بلوک Modbus Mapping دستگاه Power Meter تمام پارامترهای اندازه‌گیری شده را روی یک‌سری رجیستر کد به‌عنوان خروجی تحویل می‌دهد. بلوک Modbus مقادیر جریان فازهای R، S و T هم‌چنین مقادیر ولتاژ بین آن‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو، فرکانس و ضریب قدرت را که توسط دستگاه Power Meter قرائت می‌شود ازطریق RTU و پروتکل Modbus جمع‌آوری می‌نماید. مطابق شکل ۱۱ گروهی از این مقادیر که نیاز به مقایسه و آنالیز برنامه دارند به بلوک Pump منتقل می‌شوند تا با مقادیر تعریف شده برای Pump مقایسه شده و درصورت ایجاد مغایرت با آن‌چه که تعیین شده خطای موردنظر را مشخص کند.



شکل ۱۱- برنامه در بخش Main از نرم‌افزار IsaGraf

۴-۱-۲- بخش Function Block

مطابق شکل ۱۲ با ورود الکتروپمپ به حالت Feedback-Run که همان حالت کار دائم است نیاز به آغاز شمارش و ثبت زمان براساس ثانیه است. به‌همین منظور از یک بلوک Second Generator و دو بلوک TOF که زمان‌ها را به‌ازای هر روز و هر ۲۴ ساعت Off یا On می‌کند و یک بلوک حساس به لبه بالارونده که پس از راه‌اندازی الکتروپمپ عمل می‌کند و فرمان شروع ثبت را صادر می‌نماید استفاده شده است. بلوک RS که به‌عنوان یک Set و Reset کننده ایفای نقش می‌کند، در حالت کار الکتروپمپ شمارنده ثانیه و TOF را به مدار وارد و عمل Set را انجام و در حالت خاموش‌شدن الکتروپمپ عمل Reset و خارج کردن را برعهده دارد.

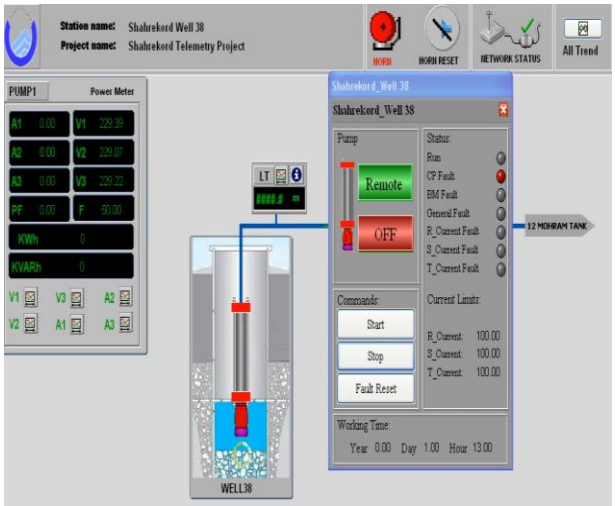


شکل ۱۲- بخش Second G در نرم‌افزار IsaGraf

۵- نتایج پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی

۵-۱- بررسی خطای ایجاد عدم تعادل در ولتاژ ورودی

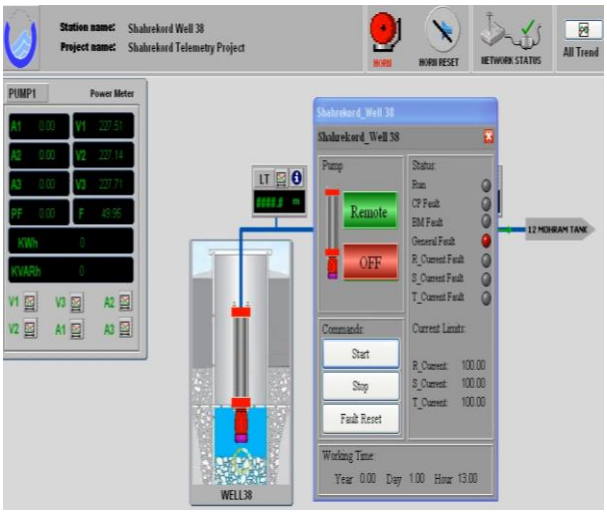
برای بررسی این خطا و هم‌چنین صحت عملکرد برنامه باید یک نوع عدم تعادل در ولتاژ ورودی ایجاد نمود. به‌همین علت در هنگام کار دائم، الکتروپمپ اقدام به قطع‌کردن یکی از فیوزهای سه‌فاز ورودی به دستگاه کنترل فاز در تابلو مدار فرمان نموده و در واقع یک عدم تعادل واقعی برای کنترل فاز ایجاد می‌شود. در این‌صورت با خواندن مقادیر ولتاژ از طریق برنامه نگارش‌شده و سنجش میزان ولتاژ ورودی با دریافت سیگنال‌های ارسالی توسط RTU به سیستم اسکادای مرکزی، عمل حفاظت در برابر عدم تعادل ولتاژ به‌صورت مستقل از دستگاه کنترل فاز انجام می‌گیرد. برنامه پیشنهادی در این‌خصوص طبق برنامه‌ریزی انجام شده عمل می‌نماید و بلافاصله با رسیدن پیغام خطای کنترل فاز اقدام به خارج کردن الکتروپمپ از مدار نموده و در کادر مربوط به Pump-Status حالت On به Off تبدیل شده و در چراغ سیگنال CP Fault با رنگ قرمز روشن شده و چراغ سیگنال Run که به‌رنگ سبز بود خاموش می‌شود. در کادر Pump-Power Meter نیز مقادیر جریان مصرفی به صفر تغییر مقدار می‌دهند. شکل ۱۳ حالت حفاظت در برابر خطای ایجاد عدم تعادل ولتاژ را نمایش می‌دهد.



شکل ۱۳- حفاظت در برابر ایجاد خطای عدم تعادل ولتاژ ورودی

۵-۲- بررسی خطای خارج شدن الکتروپمپ از حالت کار نرمال

خطای خارج شدن از حالت کار نرمال زمانی رخ خواهد داد که به هر نحوی کنتاکتور حالت اتصال مثلث در تابلو مدار فرمان الکتروپمپ از مدار خارج شود. برای ایجاد این خطا و مشاهده نتایج، از یک کنتاکت Normal Open در کنتاکتور مثلث که در زمان کار دائم به‌حالت بسته تبدیل می‌شود استفاده می‌شود. به‌این شکل که در حالت کار الکتروپمپ کنتاکت موردنظر باز شده و در این حالت، برنامه مطابق انتظار عمل کرده و همانند شکل ۱۴ الکتروپمپ را از مدار خارج می‌نماید.



شکل ۱۴- حفاظت در برابر خطای خارج شدن از حالت کار نرمال

۵-۳- بررسی خطای اضافه جریان

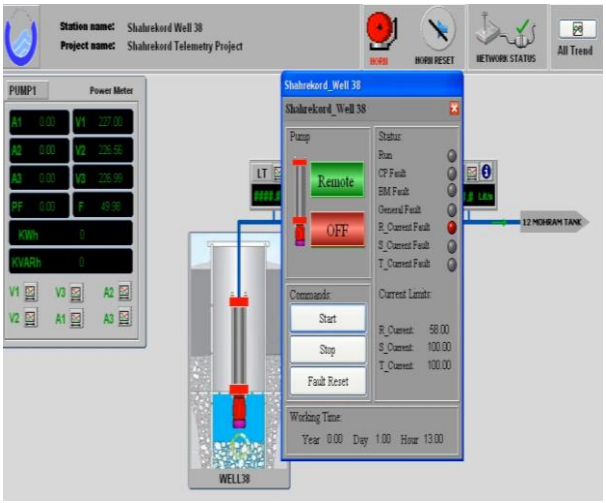
برای ایجاد حالت حفاظت در برابر اضافه جریان براساس برنامه نوشته شده دو حالت برای آزمون عملکرد صحیح سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. حالت اول یک نوع شبیه‌سازی اضافه جریان تحت عنوان Simulation Mode و حالت دوم که حالت واقعی است تحت‌عنوان Reality Mode است در ادامه توضیح داده خواهد شد.

Simulation Mode -۱-۳-۵

در این روش با استفاده از امکانی که در برنامه‌نویسی برای معرفی محدوده جریان به‌وجود آمده است براساس جریان مصرفی الکتروپمپ، جریانی کوچکتر از میزان جریان مصرفی الکتروپمپ برای یکی از فازهای R، S و T تعیین می‌شود. با این‌کار و به‌محض این‌که مقدار جریان تعیین شده در برنامه ثبت شود، سیستم به‌علت این‌که جریان مصرفی از جریان معرفی شده بالاتر است، عمل حفاظت در برابر اضافه جریان را انجام داده و الکتروپمپ را خاموش می‌کند.

از آن‌جایی‌که جریان مصرفی طبق کادر Pump-Power Meter در بازه ۵۹ تا ۶۰ آمپر است تا زمانی‌که محدوده جریان تعیین شده در سیستم ثبت نشده باشد سیستم به‌کار خود ادامه خواهد داد. اما بلافاصله پس از ثبت جریان ۵۸ آمپر در برنامه،

حفاظت در برابر اضافه جریان صورت خواهدگرفت. به‌علت این‌که میزان جریان مصرفی بالاتر از میزان تعریف شده است سیستم، این روند را یک نوع اضافه جریان به‌حساب آورده و در برابر آن عکس‌العمل نشان می‌دهد. در کادر Pump چراغ سیگنال R- Current Fault به رنگ قرمز درآمده و الکتروپمپ از مدار خارج می‌شود. شکل ۱۵ چگونگی عملکرد سیستم حفاظت در برابر ایجاد خطای اضافه جریان در حالت Simulation Mode را نمایش می‌دهد.

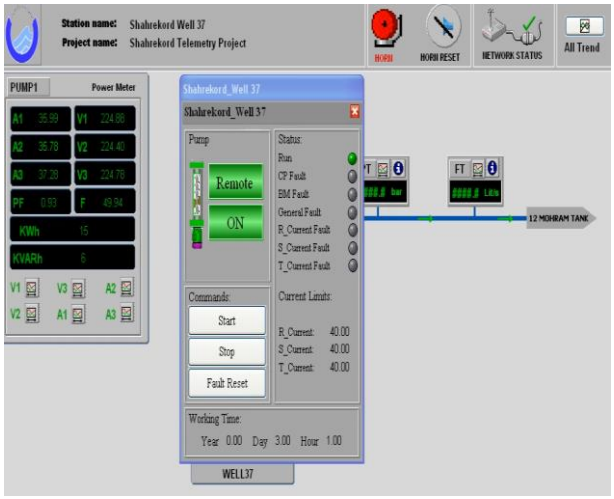


شکل ۱۵- خطای اضافه جریان در Simulation Mode

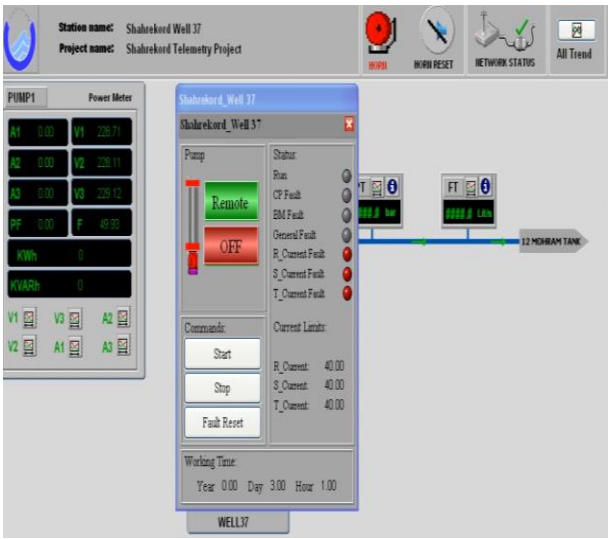
Reality Mode -۲-۳-۵

در حالت خطای واقعی اضافه جریان و بررسی صحت عملکرد الگوریتم پیشنهادی، باید روشی به‌کار برده شود تا بتوان از طریق آن یک نوع خطای واقعی ایجاد کرد و با تغییرات جریان، واکنش سیستم را نسبت به آن مشاهده کرد. به‌همین دلیل اقدام به تغییرات آب دهی الکتروپمپ ازطریق ایجاد تغییرات در شیر خروجی الکتروپمپ شد. با کم‌کردن شیر خروجی و کم کردن دبی چاه، میزان جریان مصرفی را به زیر ۴۰ آمپر کاهش داده و در کادر مربوط به تعیین محدوده جریان‌ها، حداکثر جریان مصرفی در محدوده ۴۰ آمپر قرار داده شد. در این‌حالت الکتروپمپ با کاهش آب‌دهی میزان جریان مصرفی کمتری داشته و چون در محدوده کمتر از محدوده تعیین‌شده است هم‌چنان به‌کار خود ادامه خواهد داد. شکل ۱۶ میزان مصارف جریان الکتروپمپ در کادرPump- Power Meter و محدوده جریان تعریف شده برای فازهای R، S و T در کادر Status را نمایش می‌دهد.

در ادامه و برای ایجاد یک اضافه جریان و بررسی عملکرد سیستم پیشنهادی، اقدام به بازکردن شیر خروجی الکتروپمپ نموده که به‌تدریج و با بازشدن هرچه بیشتر شیر میزان آب‌دهی بیشتر شده و درنتیجه جریان‌های مصرفی هم شروع به افزایش می‌کند. این عملیات تا جایی ادامه می‌یابد تا جریان‌های مصرفی به‌میزان تعیین شده برای فازهای R، S و T در کادر Status برسد. با رسیدن مقادیر به میزان جریان ۴۰ آمپر تعیین شده، سیستم عمل حفاظت در برابر اضافه جریان را انجام داده و از ادامه کار الکتروپمپ جلوگیری به‌عمل می‌آورد. در این وضعیت، الکتروپمپ از حالت On به Off تغییر حالت داده، جریان‌های مصرفی صفر شده و چراغ‌های سیگنال به رنگ قرمز مربوط به خطای ایجاد شده در کادر Status چاه که شامل R-Current Fault، S- Current Fault و T-Current Fault است روشن خواهد شد. شکل ۱۷ نحوه حفاظت و عملکرد سیستم در حالت Reality Mode را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- تعریف محدوده جریان در Reality Mode



شکل ۱۷- عملکرد حفاظتی سیستم اسکادا در حالت Reality Mode

در پایان باید اشاره کرد که اگرچه برنامه حفاظت طراحی شده پیشنهادی ازنظر عملکرد مشابه با رله‌های حفاظتی مرسوم عمل

می‌نماید، اما در روش پیشنهادی شناسایی خطا از طریق عملکرد رله‌ها نبوده و برنامه نوشته شده در محیط IsaGraf نوع خطای رخ داده را تشخیص داده و عکس‌العمل مناسب را از خود نشان می‌دهد. با وجود یکسان بودن اساس عملکرد هر دو روش، مشکلات موجود در سخت‌افزارهای حفاظتی مرسوم هم‌چون کاهش حساسیت، پایان عمر مفید و یا خطاهای عملکرد باعث شده که سیستم حفاظتی مبتنی بر اسکادا برتری قابل‌توجهی نسبت به‌روش‌های حفاظتی مرسوم از خود به نمایش بگذارد.

نکته مهم دیگر آن‌که با وجود پیاده‌سازی برنامه حفاظتی از طریق اسکادا، دستگاه‌های حفاظتی و کنترل‌های محلی به‌روش مرسوم در محل تابلوهای ستاره، مثلث نصب بوده و به‌هیچ عنوان حفاظت محلی (حفاظت مرسوم) از مدار خارج نمی‌شود. در واقع همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد حفاظت از طریق اسکادا نقش یک مکمل حفاظتی را ایفا کرده و سایر دستگاه‌های حفاظتی اشاره شده چون کنترل فاز، کنترل بار و یا رله بی‌متال در تأسیسات موجود بوده و وظایف حفاظتی خود را انجام می‌دهند.

بهره‌مندی از سرعت بالا، دقت و حساسیت بیشتر و بالاتر بودن قابلیت اطمینان در حفاظت الکتروپمپ‌ها از مزایای ویژه روش حفاظت پیشنهادی مبتنی بر اسکادا نسبت به‌روش‌های مرسوم است.

۵-۴- بررسی جنبه اقتصادی روش پیشنهادی

در گذشته و به‌علت گستردگی تأسیسات آب و فاضلاب و نبود سیستم‌های مدرن امروزی، فعالیت‌های شرکت‌های آب و فاضلاب که به‌نوعی آب‌رسانی به مردم است، با مشکلات فراوانی همراه بوده است. اما با اجرای این سیستم‌ها تقریباً بخش عمده‌ای از این مشکلات رفع شده است. به‌عنوان مثال برای پایش حجم آب موجود در مخزن برای پیشگیری از به کف رسیدن یا جلوگیری از سرریز، مخزن مربوطه باید ساعت به ساعت توسط نگهبان بررسی و نتایج گزارش می‌شد. چنان‌چه حجم آب مخزن کاهش یا افزایش می‌یافت، مسئول سرکشی و کنترل چاه‌ها باید به محل چاه که معمولاً کیلومترها از مخزن و منطقه شهری فاصله دارد اعزام و اقدام به روشن یا خاموش کردن چاه می‌نمود. از طرف دیگر بروز مشکلاتی هم‌چون بدی آب و هوا، بارش‌های سنگین برف و باران و قطع مکرر شبکه توزیع برق، گاهی باعث عدم امکان دسترسی به محل چاه و عدم راه‌اندازی آن و در نتیجه کمبود آب در مخزن می‌شد. در حقیقت نیازهای اساسی هم‌چون موارد زیر نیاز به تله‌متری و کنترل از راه دور تأسیسات آب و فاضلاب را بیش از پیش نمایان ساخته است:

- راه‌اندازی از راه دور الکتروپمپ چاه‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ به‌علت بُعد مسافت؛
- کنترل سطح و حجم آب موجود در مخازن؛
- سنجش میزان فلوی آب ورودی و خروجی به مخازن و شبکه توزیع آب؛
- کنترل فشارهای شبکه در راستای پیشگیری از شکستگی‌های شبکه توزیع و هدررفت آب؛
- باز و بسته نمودن والوهای اصلی شبکه از طریق عملگرها؛
- سنجش میزان کلر باقی‌مانده در مخزن و شبکه توزیع.

از همین‌روی با پیاده‌سازی سیستم‌های تله‌متری و کنترل از راه دور از طریق اسکادا، آیتم‌های فراوانی هم‌چون موارد ذکر شده و موارد دیگری مانند میزان دقیق ولتاژها و جریان‌ها، توان‌های اکتیو و راکتیو، فرکانس و ضریب توان الکتروپمپ‌ها مورد پایش لحظه‌ای قرار می‌گیرد. با این‌حال، اگرچه اجرای زیرساخت‌های اولیه برای راه‌اندازی سیستم اسکادا هزینه‌های بالایی را در بردارد، اما با کنترل تمامی فاکتورهای ذکر شده، کاهش هزینه‌های تردد، پیشگیری از ایجاد خسارات در تأسیسات استحصال و انتقال، ذخیره‌سازی و توزیع آب و هم‌چنین برنامه حفاظت تدوین شده که بخشی از قابلیت‌های این سیستم است، علاوه‌بر این‌که صرفه‌جویی‌های اقتصادی فراوانی ایجاد می‌شود، با گذشت زمان بازگشت سرمایه قابل‌توجهی نیز به‌دست خواهد آمد. در نتیجه سیستم تله‌متری و کنترل از راه دور، رضایت‌مندی مشترکین در آبرسانی بدون وقفه، کنترل کیفیت آب، پیشگیری از بالارفتن فشار در شبکه و جلوگیری از شکستگی‌ها و عدم‌قطع و هدررفت آب را نیز حاصل خواهد نمود. شایان ذکر است که گزارش‌های ارائه شده از سوی شرکت‌های آب و فاضلاب کشور که از این سیستم‌های تله‌متری در تأسیسات خود استفاده نموده‌اند بیانگر اثربخشی استفاده از اسکادا در مدیریت بحران و کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری و افزایش میزان رضایت‌مندی مشترکین در این صنعت بوده است (کلانتری و همکاران، ۱۳۹۳).

مسئله قابل‌تأمل دیگر آن‌که با پیشرفت تکنولوژی و ساخت دستگاه‌های مدرن در راه‌اندازی انواع الکتروپمپ مانند سافت استارترها و درایوها، بسیاری از مشکلات درخصوص راه‌اندازی، حفاظت و پیشگیری از آسیب‌دیدگی و خسارات حل‌شده و می‌توان با بهره‌گیری از این دستگاه‌ها در بسیاری از هزینه‌ها صرفه‌جویی نمود. اما باتوجه به‌وجود تعداد بالای الکتروپمپ‌های شناور و گریز از مرکز در صنعت آب و فاضلاب، نصب چنین دستگاه‌هایی هزینه‌های زیادی را بر شرکت‌ها تحمیل می‌نماید. علاوه‌بر آن، راه‌اندازی با دستگاه‌های راه‌انداز نرم هم‌چون سافت

استارترها یا درایوها در برخی مکان‌ها مانند ایستگاه‌های پمپاژ (که در آن گاهی چندین پمپ سانتریفیوژ برای انتقال آب از یک مخزن بین راهی به‌یک مخزن ذخیره درحال کار هستند)، منجر به نصب حدود ۸ تا ۱۰ سافت استارتر یا درایو می‌شود. این مسئله باعث بالارفتن هزینه‌های بهره‌برداری می‌شود. از طرفی به‌کارگیری این راه‌اندازها نیز شرایط نگهداری خاص خود را می‌طلبد. لذا باتوجه به‌وجود زیرساخت اجرا شده از طریق اسکادا، نصب سافت استارترها در کنار سیستم اسکادای موجود توجیه اقتصادی مناسبی ندارد. از همین‌روی، تدوین و پیاده‌سازی برنامه حفاظتی پیشنهادی در یک شرکت آب و فاضلاب که زیرساخت اسکادا داشته باشد، هزینه و بار مالی چندانی ایجاد نکرده و می‌تواند با کمترین هزینه بسیاری از فاکتورهایی که یک دستگاه راه‌انداز نرم کنترل می‌کند را مورد پایش قرار دهد. می‌توان تنها برتری راه‌انداز نرم در مقایسه با راه‌اندازهای مرسوم که تابلوهای ستاره مثلث هستند را عدم وجود ضربه تبدیل از حالت ستاره به مثلث در الکتروپمپ عنوان کرد. در واقع راه‌انداز نرم تنها خدمات مطلوبی در جهت راه‌اندازی الکتروپمپ و کنترل مقادیر مربوط به همان فرآیند را انجام می‌دهد و در این‌صورت سایر امکاناتی که از طریق اسکادا در حال ارائه است در دسترس نخواهد بود. البته باید اشاره کرد که استفاده از راه‌اندازهای نرم در برخی روستاها یا شهرهایی که فاقد سیستم اجرا شده از طریق اسکادا بوده و تعداد چاه‌ها یا ایستگاه‌های پمپاژ آن‌ها به تعداد محدودی باشد، مقرون به‌صرفه خواهد بود. اما در تأسیسات آب شهری که از بستر اسکادا بهره‌مند هستند و تعداد چاه‌ها و ایستگاه‌های آن‌ها زیاد است، اضافه‌کردن راه‌اندازهای نرم در کنار اسکادا چندان مقرون به‌صرفه نخواهد بود.

۶- نتیجه‌گیری

خسارات ایجاد شده در اثر عدم حفاظت صحیح و به‌موقع در جهت حفاظت الکتروپمپ‌های گریز از مرکز و شناور در صنعت آب و فاضلاب علاوه‌بر این‌که باعث ایجاد هزینه‌های زیادی از لحاظ مالی می‌شود تبعات اجتماعی فراوانی از جمله قطعی آب و نارضایتی مشترکین را نیز به‌دنبال خواهد داشت. از این‌رو در این مقاله یک روش حفاظتی مبتنی بر اسکادا برای حفاظت انواع الکتروپمپ‌های سطحی و شناور در برابر عمده خطاهایی که ممکن است بیشترین تعداد رخداد را در طول کارکرد یک الکتروپمپ به‌وجود آورده و باعث آسیب‌دیدگی آن شود پیشنهاد شد. عمده این خطاها درخصوص عدم تعادل ولتاژ ورودی، خارج شدن الکتروپمپ از حالت کار نرمال و خطای اضافه جریان بود. در این مقاله هر کدام از این خطاها به تفکیک مورد بررسی قرارگرفته و علل ایجاد هرکدام از خطاها، نحوه پیشگیری از آن‌ها و نحوه حفاظت از طریق سیستم اسکادا مورد ارزیابی قرارگرفت. بررسی نتایج عملی به‌دست آمده از اجرای روش پیشنهادی در آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری نشان می‌دهد که برنامه حفاظتی پیشنهادی می‌تواند کمک قابل‌توجهی در جهت جلوگیری از خارج‌شدن الکتروپمپ‌های صنعت آب و فاضلاب از چرخه استحصال آب شرب نموده و از مشکلات اجتماعی احتمالی ناشی از قطع آب مشترکین و نارضایتی‌های حاصل از آن نیز پیشگیری نماید. از دیگر نتایج سیستم حفاظت پیشنهادی مبتنی بر اسکادا کاهش رفت و آمدها، کاهش بازدیدهای دوره‌ای تجهیزات حفاظتی الکتروپمپ‌ها و تأسیسات، سرعت عیب‌یابی الکتروپمپ‌ها و در نتیجه سرعت عمل در بازگرداندن الکتروپمپ‌ها به مدار بهره‌برداری است.

۷- سپاسگزاری

نویسندگان مراتب تشکر و قدردانی خود را از مسئولان شرکت آب و فاضلاب استان چهارمحال و بختیاری برای فراهم‌کردن زیرساخت لازم برای پیاده‌سازی عملی روش پیشنهادی خود را به‌عمل می‌آورند.

۸- پی‌نوشت‌ها

1- Master Terminal Units (MTU)
2- Remote Terminal Unit (RTU)
3- Programmable Logic Controller (PLC)
4- Phase Controller Fault (PCF)
5- General Fault (GF)
6- Over Current Fault (OCF)
7- Uninterruptible Power Supply (UPS)

۹- مراجع

اصفهانی، ف.، (۱۳۹۴)، *تکنولوژی جمع‌آوری اطلاعات و کنترل سیستم از راه دور اسکادا*، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

امینی، ا. پیشگو، م.، و صادقی، ف.، (۱۳۹۱)، "اسکادا و کاربرد آن در شبکه‌های آبیاری"، *اولین همایش ملی بیابان (علوم، فنون و توسعه پایدار)*، تهران، ایران.

ایمانی، م.م.، خوش خلق، ا.، و میرزایی، ف.، (۱۳۹۳)، "بررسی امنیت سیستم‌های اسکادا"، *اولین کنفرانس ملی مهندسی برق دانشگاه آزاد اسلامی واحد لنگرود*، لنگرود، ایران.

بابایی، ک.، و عنایتی کلیجی، ف.، (۱۳۹۳)، "طراحی و ساخت نظاره‌گر هوشمند بر تجهیزات مخابراتی سیستم اسکادای دیسپاچینگ برق شمال کشور"، *دومین همایش منطقه‌ای دستاوردهای نوین در مهندسی برق و کامپیوتر*، جویبار، ایران.

جمشیدی، ش.، (۱۳۹۹) ،"الزامات و نقشه راه هوشمندسازی شبکه توزیع آب شهری"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۵(۴)، ۴-۱۵.

جهانگیری‌خواه، م.، هوشمند، م.، و خرم‌پناه، م.، (۱۴۰۰) "راه‌کارهای شهر هوشمند برای مقابله با بحران کمبود آب مبتنی بر پروتکل KNX"، *نشریه علمی علوم و مهندسی آب و فاضلاب*، ۶(۲)، ۱۴-۵.

ذاکر عنبرانی، ا.، و ربانی، ر.، (۱۳۹۱)، "طراحی و ساخت سیستم اسکادای دیسپاچینگ فوق توزیع و انتقال"، *نخستین کنگره اتوماسیون صنعت برق، دانشگاه فردوسی مشهد*، مشهد، ایران.

رجبی، م.، فاضلی، ج.، و فیروزیان، م.، (۱۳۹۵)، "مدیریت مصرف و نظارت انرژی در زمان پیک بار مصرفی توسط سیستم اسکادا"، *کنفرانس ملی پژوهش های نوین در علوم فنی و مهندسی*، اردبیل، ایران.

کاظمی نژاد، پ.، (۱۳۹۰)، "آشنایی با سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ داده (SCADA) و سیستم تله‌متری و تأمین آب شرب شهرهای اهواز، آبادان و خرمشهر"، *اولین همایش بین المللی بتن های ناتراوا - مخازن ذخیره آب شرب*، رشت، ایران.

کلانتری، م.، و زمانی مقدم، ا.، (۱۳۹۳)، "تعیین میزان اثربخشی استفاده از سامانه‌های اسکادا در مدیریت بحران شرکت‌های آب و فاضلاب شهری (مطالعه موردی شرکت آب و فاضلاب شهری استان البرز)"، *فصلنامه مطالعات مدیریت شهری*، ۶(۱۸)، ۹۳-۷۵.

محرابیان، ع.، (۱۳۹۲)، *بررسی سیستم‌های اسکادا*، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

نخعی، ع. صادق زاده، ح. درانی، ز.، (۱۳۹۵)، "بررسی اسکادا و کاربردهای آن در صنعت"، *کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در برق و کامپیوتر*، شیراز، ایران.

Adrian-Lucian, C., Ioana-Alina, C., and Mihaela Ivona, C., (2017), “Water wells monitoring using SCADA system for water supply network”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Romania.

Dave, P., Mokariya, K., and Patel. V., (2013), “Energy conservation in centrifugal pump with variable frequency drive including SCADA, *PLC and HMI” International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 2(5), 1461-1468.

Gligor, A., and Turc, T., (2012), “Development of a service oriented SCADA System”, *Procedia Economics and Finance*, (Elsevier), 3, 256-261.

Loganathan, V., Kanagavalli, S., Aarthi, P., and Yamuna, K., (2014) “PLC Scada based fault identification and protection for three phase induction motor”, *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, 12(8), 5766-5773.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC-BY) license.