

استفاده از سیستم حفاظت کاتدی پالسی در خطوط لوله گاز شهری و مقایسه آن با سیستم حفاظت کاتدی معمول

محمد افشاری^۱، عبدالمجید اسلامی^{۲*}، محمدعلی گل‌عذار^۳، علی فاتحی^۴، حمید رضا گرجی^۵، مهدی احمدی^۶، امین کاویان^۷، داوود طاووسی^۸، احمد خدایی^۹

^۱ کارشناسی ارشد، ^۲ دانشیار، ^۳ استاد، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

^۴ کارشناسی ارشد، شرکت کاوش صنعت شیخ بهائی، اصفهان، ایران

^۵ و ^۶ و ^۷ و ^۸ و ^۹ کارشناسی ارشد، دکتر، شرکت گاز استان اصفهان، اصفهان، ایران

* نویسنده مسئول: m.eslami@iut.ac.ir

تاریخ ارسال: ۱۴۰۰/۱۲/۲۰ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۳/۲۰

چکیده

بهبود و بهینه کردن روش‌های حفاظت در برابر خوردگی از جمله روش حفاظت کاتدی در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه بوده است. با توجه به پیشرفت علم و فناوری و نیاز صنعت، تکنولوژی ساخت و کنترل یکسوکنده‌ها نیز پیشرفت چشم‌گیری نموده است. مشخصه‌های کاری و راندمان اجزای یکسوکنده طی سالیان متمادی بهبود یافته است. بر پایه مطالعات صورت گرفته، رکتیفایر صنعتی پالسی با قابلیت تولید جریان پالسی در بازه فرکانس ۸۰۰ هرتز تا ۶۰ کیلوهرتز براساس فرکانس و سیکل کاری مورد نظر با موفقیت طراحی و ساخته شد. جهت بررسی عملکرد حفاظتی این سیستم در شرایط واقعی، رکتیفایر پالسی در کنار رکتیفایر سنتی قرار داده شد و پایش شرایط حفاظتی سیستم پالسی به‌طور مستمر در محل ایستگاه، و سه نقطه تست با فواصل مشخص و به‌ترتیب در فرکانس و سیکل کاری ۵۰ کیلوهرتز و ۷۳ درصد (A)، ۶۰ کیلوهرتز و ۷۳ درصد (B)، ۶۰ کیلوهرتز و ۵۰ درصد (C) و ۵۰ کیلوهرتز و ۵۰ درصد (D) انجام شد. نتایج نشان داد که در سیستم پالسی، مقدار ولتاژ AC نسبت به سیستم سنتی تا بیش از ۸۰٪ کاهش یافته است. به‌علاوه، مقادیر جریان مصرفی نشان داد که در سیستم پالسی مصرف جریان تا بیش از ۷۰٪ در مقادیر خاصی از فرکانس و سیکل کاری نسبت به سیستم سنتی کاهش یافته است. با توجه به این که موج پالسی در زمان خاموشی عملاً مصرف جریانی ندارد، می‌توان بیان کرد که در این حالت مصرف انرژی به‌مراتب کاهش می‌یابد که عامل بسیار مهمی در مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی محسوب می‌شود. به‌علاوه، این دستگاه عملاً نیازی به سیستم‌های خنک‌کننده رایج ندارد. بر همین اساس، می‌توان گفت که سیستم مورد نظر در مقادیر مشخصی از فرکانس و سیکل کاری عملکرد بهتری دارد و استفاده از چنین سیستم‌هایی در مناطق دارای مقاومت زیاد الکترولیت و بستر آندی را می‌توان گزینه مناسبی دانست. همچنین، در صورتی که خط لوله دارای پوشش باشد، حتی با وجود مناطق جدایش پوشش، این سیستم می‌تواند عملکرد مناسبی داشته باشد. به‌علاوه، پتانسیل حفاظتی (پتانسیل روشن) در طول مدت اندازه‌گیری و با وجود عملکرد نامناسب بستر آندی، یکنواخت‌تر شده و همچنان در محدوده حفاظت قرار داشت.

کلیدواژه: امپدانس، پوشش جداشده، حفاظت کاتدی، خط لوله فولادی، رکتیفایر پالسی.

Utilizing Pulse Cathodic Protection System in City Gas Pipelines and its Comparison with Conventional Cathodic Protection System

M. Afshari ¹, A. Eslami ^{2*}, M. A. Golazar ³, A. Fatehi ⁴, H. R. Gorji ⁵, M. Ahmadi ⁶,
A. Kavian ⁷, D. Tavousi ⁸, A. Khodaei ⁹

¹ Ms.c, ² Associate Professor, ³ Professor, Faculty of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

^{4,5} Ms.c, Sheikh Bahai Industry Research Company, Isfahan, Iran

^{6,7,8} Ms.c, ⁹ Ph.D., Isfahan Gas Company, Isfahan, Iran

* **Corresponding Author:** m.eslami@iut.ac.ir

Submission: 2022, 03, 11 **Acceptance:** 2022, 06, 10

Abstract

Improving and optimizing corrosion protection methods, including cathodic protection, has received much attention in recent years. Due to the advancement of science and technology and industry development, manufacturing and controlling rectifiers has also made significant progress. The performance characteristics and efficiency of rectifier components have improved over the years. Based on the studies, an industrial pulse rectifier that can produce pulsed current in the frequency range of 800 Hz to 60 kHz based on the desired frequency and duty cycle was successfully designed and manufactured. In order to evaluate the protection performance of this system in the field, the pulse rectifier was placed next to the conventional rectifier, and the protection conditions of the system were continuously monitored. Three test points with specified intervals were analyzed at frequency and duty cycle of 50 kHz and 73% (A), 60 kHz and 73% (B), 60 kHz and 50% (C), and 50 kHz and 50% (D), respectively. Results showed that AC voltage in the pulse system has decreased by more than 80% compared to the conventional system. In addition, the current consumption values showed that in the pulse system, the current consumption has decreased by more than 70% in certain values of frequency and duty cycle. Because the pulse wave has practically no current consumption during off time, energy consumption is greatly reduced, an important factor in energy consumption and economic costs. Also, this system has no cooling system like the conventional rectifiers. Accordingly, the system has a better performance at certain values of frequency and duty cycle. Such systems in areas with high electrolyte resistance can be considered a good option. Also, if the pipeline has a cover, the system can function properly even with the cover separation areas. Moreover, the protection potential became more uniform and remained within the protection range during the measurement period, despite the poor performance of the anode bed.

Keywords: Cathodic protection, Coating disbondment, Steel pipeline, Impedance, pulse rectifier.

۱- مقدمه

با توجه به گستردگی لوله‌های زیرزمینی در سراسر دنیا، اهمیت حفاظت از این سازه‌ها بسیار بالا است. خوردگی در سطح خارجی خط لوله شامل انواع خوردگی یکنواخت و موضعی می‌باشد [۱]. همچنین، با در نظر گرفتن خطرات ناشی از لوله‌ها (چه از لحاظ مسائل جانی و چه از بعد فنی و اقتصادی)، لازم است در مورد حفاظت از آن‌ها تدابیر لازم اتخاذ گردد. در شرایطی که پوشش و حفاظت کاتدی کامل و به‌درستی عمل کنند، خوردگی در خارج لوله اتفاق نمی‌افتد زیرا سطح فلز با خاک تماس نداشته و امکان عبور جریان وجود ندارد [۲]. بنابراین، تقریباً تمامی خطوط لوله مدفون در خاک به‌منظور جلوگیری از خوردگی دارای پوشش بوده و همزمان با آن پتانسیل حفاظتی نیز بر خط اعمال می‌شود. با این وجود، هنگامی که پوشش دچار عیب شود، حتی در حضور حفاظت کاتدی نیز امکان خوردگی در سطح خارجی وجود دارد [۳]. از جمله دلایل آسیب دیدن پوشش‌ها میزان نامناسب چسبندگی، آب‌گریزی، پتانسیل حفاظتی و تنش‌های موجود در زیر خاک می‌باشد. یکی از پیامدهای آسیب دیدن پوشش، جدایش پوشش از سطح فلز بوده که باعث می‌شود فلز به‌طور مستقیم با الکترولیت در تماس قرار گیرد. عمدتاً خوردگی سطوح خارجی لوله به‌صورت موضعی بوده و شامل خوردگی تنشی، خوردگی شیاری و حفره‌دار شدن در اثر خوردگی میکروبی و یا حضور یون‌های مخرب در محیط خورنده‌ای نظیر محیط حاوی یون کلر می‌باشند [۴]. بنابراین، یک نیاز دائم و همیشگی برای بهبود و بهینه کردن روش‌های حفاظت در برابر خوردگی از جمله روش حفاظت کاتدی احساس می‌گردد. مشخصه‌های کاری و راندمان اجزای یکسوکننده طی سالیان متمادی بهبود یافته است. در تکنولوژی جریان پالسی، رکتیفایر پالسی در یک ثانیه چندین هزار شوک الکتریکی پالسی تولید می‌کند. گستره رایج فرکانس‌ها بین ۵۰۰-۱۰۰۰ هرتز می‌باشد. زمان اعمال هر یک از این جریان‌های پالسی قابل تغییر می‌باشد و معمولاً در گستره زمان‌های ۵۰۰-۲۰۰ میکروثانیه و سیکل کاری بین

۲۵-۲ درصد می‌باشد [۵]. حفاظت کاتدی پالسی نسبت به حفاظت کاتدی معمولی از نقطه نظراتی برتری دارد که این موارد شامل ملزومات و تجهیزات کم‌تر، عمق اثر بیشتر و توزیع جریان یکنواخت‌تر می‌باشد [۹-۵]. عواملی که می‌توانند بر روی عملکرد حفاظت کاتدی پالسی تأثیرگذار باشند عبارتند از سیکل کاری، فرکانس و عوامل مرتبط با الکترولیت و پوشش اعمالی به سازه مورد نظر. رکتیفایرها و به‌خصوص رکتیفایر حفاظت کاتدی پالسی که بتواند قابلیت کارکرد در فرکانس‌های بسیار بالا را داشته باشد، یک جز بسیار مهم در این روش بشمار می‌رود [۱۰]. بومن^۱ [۵] برای مقایسه تأثیر حفاظت کاتدی پالسی و حفاظت کاتدی به روش معمول به حفاظت از لوله جداری به طول ۱۴ فوت پرداخت. در اثر اعمال حفاظت کاتدی به‌روش معمول بر روی لوله جداری، یک ناحیه آندی در انتهای لوله جداری پدیدار می‌گردد و حفاظت در انتهای لوله جداری انجام نمی‌شود، این در حالی است که در اثر اعمال جریان پالسی، سازه به‌طور کامل حفاظت می‌شد. همچنین نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که برای حفاظت کامل لوله جداری به‌واسطه سیستم حفاظت کاتدی به‌روش معمول ۴۸ آمپر نیاز است اما در روش پالسی جریان استفاده شده برای مدت‌زمان یکسان حفاظت، ۱۸ آمپر می‌باشد؛ بنابراین در حفاظت کاتدی به‌روش معمول، اتلاف جریان در فصل مشترک بین سطح لوله و الکترولیت بسیار قابل توجه بوده که این کاهش در حدود ۶۰-۳۰٪ جریان اعمال‌شده ذکر گردیده است. بنابراین، موارد ذکر شده توانایی سیستم حفاظت کاتدی پالسی را در توزیع بیشتر و یکنواخت جریان، نسبت به سیستم‌های معمول بیان می‌کند و حفاظت بهتری را در مناطقی همچون نواحی آندی که نیاز به حفاظت بیشتری دارد انجام می‌دهد. همچنین، قابل ذکر است که جریان پالسی با این که ۴۰٪ جریان کمتری نسبت به حفاظت کاتدی معمولی مصرف می‌کند، حفاظت کامل‌تری را بر روی لوله جداریها ایجاد می‌نماید.

دانینگین^۲ و همکارانش [۱۱] بر روی استفاده هم‌زمان از حفاظت کاتدی معمول و پالسی در حفاظت از خط لوله به تحقیق

1 - Bauman

2 - Doniguan

پرداختند. در ابتدا حفاظت کاتدی به روش معمول انجام گردید و رکتیفایر بر روی جریان ۲۲ آمپر تنظیم شد. اندازه گیری میزان پتانسیل در فاصله های ۰/۰۸، ۲۴/۸۴ و ۳۴/۹۱ مایل از ایستگاه حفاظت کاتدی انجام گردید. نتایج نشان داد که در فاصله ۳۴/۹۱ مایل از ایستگاه حفاظت کاتدی، جریان حفاظت کاتدی کافی به سطح خارجی خط لوله نمی رسد. برای رفع این مشکل و اعمال حفاظت بیشتر در انتهای خط لوله، رکتیفایر پالسی و بستر آندی جدید به ایستگاه حفاظت کاتدی اضافه گردید به گونه ای که جریان کافی برای حفاظت تأمین گردد. اطلاعات حاصل شده از نتایج پژوهش آن ها نشان داد که یک افزایش عمده در پتانسیل حفاظتی در نقاط انتهایی خط لوله (۳۴/۱ مایل) پدیدار می گردد که این امر به دلیل استفاده هم زمان حفاظت کاتدی معمولی و پالسی می باشد. دانگین و همکارانش در نتیجه پژوهش خود بیان کردند هنگامی که خط لوله بوسیله دو سیستم حفاظت کاتدی معمولی و پالسی مورد حفاظت قرار می گیرد، برد جریان بیشتر تا فواصل دور، کاهش پتانسیل اضافی در ابتدای فیلد و اعمال حفاظت به مراتب بهتری حاصل می شود؛ بنابراین جریان پالسی قادر است در مدت زمان کوتاهی مقدار بیشتری از یون های هیدروژن و مولکول های اکسیژن را کاهش داده و جریان حفاظت بالاتری نسبت به حفاظت معمولی ایجاد نماید [۱۱]. نجفی و همکارانش [۶] در پژوهش دیگری به بررسی تأثیر حفاظت کاتدی پالسی بر شرایط الکتروشیمیایی و خوردگی در زیر پوشش جدا شده از خطوط لوله پرداختند. نتایج نشان داد که در اثر اعمال حفاظت کاتدی به روش معمول، پتانسیل حفاظتی در فاصله ۷ سانتی متری از دهانه شیار به شدت افت می کند و به مقادیر نزدیک پتانسیل مدار باز (OCP) می رسد اما در حفاظت کاتدی به روش پالسی بخصوص در فرکانس ۱۰۰۰۰ هرتز برخلاف حفاظت کاتدی به روش معمول، هیچ گونه افت پتانسیلی در زیر پوشش جدا شده مشاهده نشد. حذف گردان پتانسیل در فرکانس یاد شده به کاهش اثر پلاریزاسیون غلظتی در دهانه پوشش جدا شده ارتباط داده شد. بررسی شرایط شیمیایی

و الکتروشیمیایی ایجاد شده در زیر پوشش جدا شده نشان داد که با افزایش فرکانس پالسی اعمال شده، محیط زیر پوشش جدا شده از توزیع پتانسیل، pH و مقاومت محلول یکنواخت تری در مقایسه با حفاظت کاتدی به روش معمول برخوردار می باشد. هدف از این پژوهش، بررسی عملکرد حفاظتی سیستم پالسی و رکتیفایر ساخته شده در شرایط واقعی بود. رکتیفایر پالسی در کنار رکتیفایر سنتی قرار داده شد و پایش شرایط حفاظتی سیستم پالسی به طور مستمر در محل ایستگاه، و سه نقطه تست با فواصل مشخص و به ترتیب در فرکانس و سیکل کاری ۵۰ کیلوهرتز و ۷۳ درصد (A)، ۶۰ کیلوهرتز و ۷۳ درصد (B)، ۶۰ کیلوهرتز و ۵۰ درصد (C) و ۵۰ کیلوهرتز و ۵۰ درصد (D) انجام شد. نتایج نشان داد که در سیستم پالسی، مقدار ولتاژ AC نسبت به سیستم سنتی کاهش قابل توجهی پیدا کرده است. به علاوه، جریان خروجی نیز کاهش محسوسی داشت. با این حال، پتانسیل حفاظتی (پتانسیل روشن) در طول مدت اندازه گیری و با وجود عملکرد نامناسب بستر آندی، یکنواخت تر شده و همچنان در محدوده حفاظت قرار داشت.

۲- مواد و روش تحقیق

پس از ساخت دستگاه حفاظت کاتدی پالسی، دستگاه مورد نظر در محل مناسبی نصب شد. بدیهی است پیش از اجرای آزمون-های میدانی در محل مشخص شده، دستگاه مورد آزمایش قرار گرفت. با تعویض رکتیفایر معمولی با پالسی، پارامترهای موثر از جمله پتانسیل در حالت روشن و ارتباط آن ها با یکدیگر مورد بررسی قرار گرفت. دستگاه رکتیفایر ساخته شده دارای شکل موج مربعی است. بازه فرکانس قابل اعمال، توان دستگاه، جریان و پتانسیل آن در جدول ۱ قابل مشاهده است. شکل ۱ بدنه رکتیفایر پالسی و کنترل دیجیتالی دستگاه را نشان می دهد که توسط آن می توان پارامترهای مختلف را مشخص نمود و شرایط دستگاه را بررسی کرد.

جدول ۱ - پارامترهای رکتیفایر پالسی ساخته شده.

پارامتر دستگاه	مقدار
فرکانس	$6000-800 \text{ Hz}$
توان	1500 W
جریان	15 A
حداکثر پتانسیل قابل اعمال	100 V



شکل ۱. تصاویر بدنه و کنترل رکتیفایر پالسی.

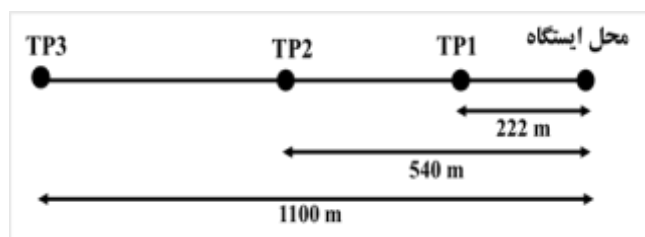
در قدم اول، شرایط رکتیفایر سنتی مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۲ قابل مشاهده است.

پایش شرایط حفاظتی سیستم پالسی به طور مستمر در محل ایستگاه، و سه نقطه تست با فواصل مشخص انجام شد. قبل از اتصال سیستم پالسی پارامترهای حفاظتی مطابق جدول ۳ بود. جهت پایش دقیق پتانسیل های DC و AC در نقطه تزریق و سه نقطه تست دیگر، ولتاژ تزریق برابر با مقدار $1/4 V_{CSE}$ قرار داده شد. پس از اطمینان از صحت کارکرد سیستم، مقادیر پتانسیل حفاظتی در نقاط مذکور در روزهای مختلف ثبت شد. سیستم پالسی در چهار حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفت که در جدول ۴ قابل مشاهده است.

۲ - ۱ - نصب رکتیفایر پالسی و بررسی پارامترهای دستگاه

رکتیفایر سنتی جهت حفاظت از خط لوله در محل ایستگاه حفاظت کاتدی مورد استفاده قرار گرفته است. شکل ۲ موقعیت ایستگاه و نقاط آزمون را نشان می دهد. نوع ترانس در این ایستگاه از نوع سنتی رگاولتی بود.

در این مرحله، رکتیفایر پالسی در کنار رکتیفایر سنتی قرار داده شد و پس از اطمینان از جمع آوری اطلاعات و پارامترهای مربوط به دستگاه سنتی، سیستم پالسی جایگزین آن شد. شکل ۳ محل نصب رکتیفایر پالسی را نشان می دهد.



شکل ۲ - موقعیت ایستگاه و محل تست پوینت‌ها (فاصله نقاط صرفاً خطی فرض شده است و به معنای طول خط لوله نیست).



شکل ۳ - تصویر رکتیفایر سستی و پالسی در کنار یکدیگر در محل ایستگاه حفاظت کاتدی.

جدول ۲ - شرایط کلی رکتیفایر سستی ایستگاه حفاظت کاتدی.

ولتاژ نامی (V)	جریان نامی (A)	ولتاژ تزریق (V_{CSE})	فرکانس (Hz)	جریان DC (A)
۷۵	۲۵	-۱/۴	۱۰۰	۱۲

جدول ۳ - پتانسیل‌های حفاظتی (پتانسیل روشن) سیستم سستی بلافاصله قبل از اتصال رکتیفایر پالسی.

سیستم	سستی		
فرکانس (Hz)	۱۰۰		
شماره TP	۱	۲	۳
نوع پوشش	عایق قیر سرد/عایق گرم (بر پایه نفت)		
مقاومت خاک	۸۰۰۰-۱۰۰۰۰ اهم سانتی‌متر		
ولتاژ DC (V_{SCE})	-۱/۳۶	-۱/۲۶	-۱/۰۸
ولتاژ AC (V)	۱/۷۳	۰/۹۲	۰/۲۸
$V_{Drain}(V_{CSE})$	-۱/۴		

جدول ۴ - حالت‌های مختلف سیستم پالسی.

حالت سیستم	سیکل کاری	فرکانس
حالت A	۷۳ درصد	۵۰ کیلوهرتز
حالت B	۷۳ درصد	۶۰ کیلوهرتز
حالت C	۵۰ درصد	۶۰ کیلوهرتز
حالت D	۵۰ درصد	۵۰ کیلوهرتز

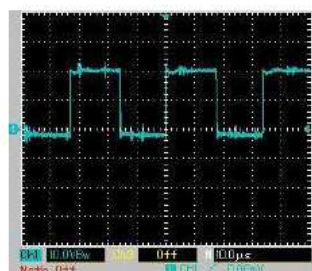
۳- نتایج و بحث

۳-۱ - صحت‌سنجی عملکرد رکتیفایر پالسی

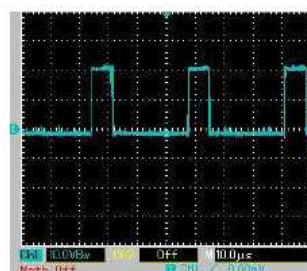
جهت بررسی شرایط سیستم حفاظت کاتدی، ابتدا عملکرد رکتیفایر پالسی مورد بررسی قرار گرفت. پس از آن سیستم پالسی نصب شده و عملکرد حفاظتی سیستم پالسی بر اساس مقادیر اندازه‌گیری شده ارزیابی شد. به‌طور کلی، فارغ از مکانیزم تغییر ولتاژ و فرکانس در بخش‌های مختلف مدار، از قسمت صفحه نمایش کنترل دستگاه، پارامترهای مذکور قابل تغییر است. با ایجاد تنظیمات مختلف می‌توان انواع شکل

موج خروجی را بر اساس نیاز ایجاد نمود. مطابق شکل ۴ چندین نمونه از انواع حالت‌ها و شکل موج‌های مختلف را مشاهده می‌کنیم که با استفاده از کنترل دیجیتالی دستگاه قابل تنظیم است.

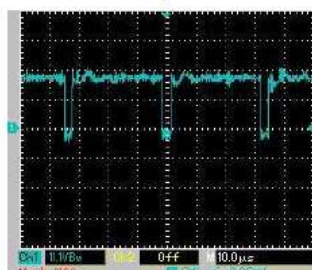
پس از بررسی شکل موج‌های مختلف، پارامترهای جزئی‌تر از جمله ولتاژ اعمالی (V_{set})، جریان خروجی (I_{out})، ولتاژ خروجی (V_{out})، سیکل کاری و فرکانس‌های مختلف بررسی و ثبت شد. جدول ۵ تا جدول ۷، بخشی از پارامترهای مورد ارزیابی و مقادیر هر کدام را نشان می‌دهد.



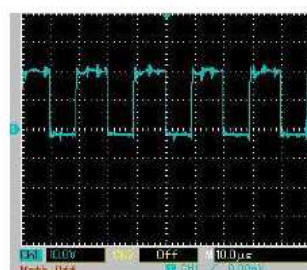
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۴ - صحت‌سنجی شکل موج رکتیفایر پالسی. الف) سیکل کاری ۲۰٪، فرکانس ۳۰۰۰۰؛ ب) سیکل کاری ۵۰٪، فرکانس ۳۰۰۰۰؛ ج) سیکل کاری ۵۰٪، فرکانس ۵۰۰۰۰؛ د) سیکل کاری ۹۰٪، فرکانس ۳۰۰۰۰.

جدول ۵ - مقادیر جریان و ولتاژ خروجی در فرکانس ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ هرتز برای ولتاژ اعمالی ۵۰ ولت و سیکل کاری ۲۰ درصد.

f (Hz)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	D	V _{set} (V)
۱۰۰۰	۱۰/۲	۳/۸۲	٪۲۰	۵۰
۱۰۰۰۰	۱۰/۲	۴/۴۹		
۲۰۰۰۰	۱۰/۲	۴/۴۵		
۳۰۰۰۰	۱۰/۲	۴/۵۹		
۴۰۰۰۰	۱۰/۲	۵/۰۷		
۵۰۰۰۰	۱۰/۲	۴/۸۲		
۶۰۰۰۰	۱۰/۲	۴/۸۴		

جدول ۶ - مقادیر جریان و ولتاژ خروجی در فرکانس ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ هرتز برای ولتاژ اعمالی ۵۰ ولت و چرخه کاری ۵۰ درصد.

f (Hz)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	D	V _{set} (V)
۱۰۰۰	۲۵/۲	۵/۲۳	٪۵۰	۵۰
۱۰۰۰۰	۲۵/۲	۷/۸۰		
۲۰۰۰۰	۲۵/۲	۷/۵۷		
۳۰۰۰۰	۲۵/۲	۸/۱۱		
۴۰۰۰۰	۲۵/۲	۸/۱۷		
۵۰۰۰۰	۲۵/۲	۸/۳		
۶۰۰۰۰	۲۵/۲	۱۲/۴۲		

جدول ۷ - مقادیر جریان و ولتاژ خروجی در فرکانس ۱۰۰۰ تا ۶۰۰۰۰ هرتز برای ولتاژ اعمالی ۵۰ ولت و چرخه کاری ۹۰ درصد.

f (Hz)	V _{out} (V)	I _{out} (A)	D	V _{set} (V)
۱۰۰۰	۴۳/۸	۱۳/۴۴	٪۹۰	۵۰
۱۰۰۰۰	۴۵/۹	۱۴/۵		
۲۰۰۰۰	۴۶	۱۴/۲۱		
۳۰۰۰۰	۴۵	۱۴/۴		
۴۰۰۰۰	۴۵/۳	۱۴/۳۵		
۵۰۰۰۰	۴۳/۷	۱۴		
۶۰۰۰۰	۴۵/۵	۱۴/۴۶		

شکل (۵) پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت در مدت زمان‌های مختلف در حالت A، با سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و حالت B با سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۶۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی در حالت A به‌وضوح مشخص است. با توجه به مشکلات بستر آندی از جمله تجمع گازهای احیا شده در بستر، مقاومت بالای ایجاد شده در این ناحیه و متعاقباً کاهش برد بستر آندی، با گذشت زمان ولتاژ نقطه تزریق افت کرد اما پتانسیل همچنان در محدوده حفاظت قرار داشت. با توجه به شرایط حاکم بر سیستم مذکور، مشکلات مربوط به عایق و وجود تداخل جریان در ایستگاه و در کل شبکه را نیز می‌توان از جمله عوامل موثر در کاهش ولتاژ تزریق دانست. به عبارت دیگر، جهت رسیدن نقطه تست ۳ به پتانسیل V_{CSE}

شکل ۶ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

۱/۲- در سیستم سنتی نیاز است که پتانسیل نقطه تزریق برابر $V_{CSE} - 1/4$ تنظیم شود اما در سیستم پالسی این شرایط با پتانسیل $V_{CSE} - 1/2$ در نقطه تزریق نیز حاصل می‌شود. لازم به ذکر است که با توجه به وابسته بودن عملکرد سیستم پالسی به مقادیر سیکل کاری و فرکانس، پاسخ سیستم در روزهای خاصی مورد نظر قرار گرفت.

جهت بررسی سیکل کاری در مقادیر پایین‌تر، مقدار سیکل کاری از ۷۳ درصد به ۵۰ درصد کاهش یافت و فرکانس نیز برابر با ۶۰ و ۵۰ کیلوهرتز تنظیم شد (حالت C و D).

شکل ۷ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۸ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۹ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۰ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۱ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۲ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۳ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۴ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۵ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

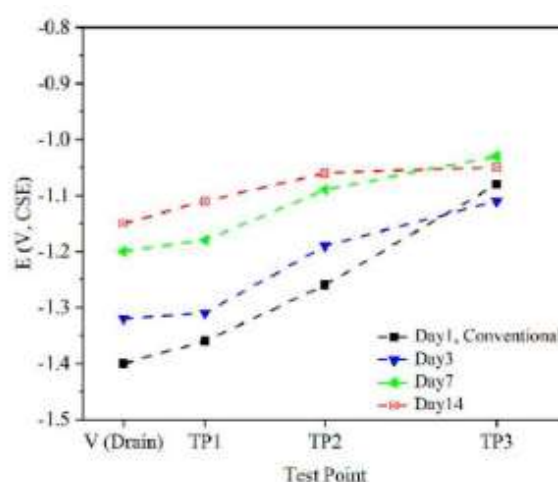
شکل ۱۶ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۷ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۸ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

شکل ۱۹ پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت را در روزهای مختلف نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی به‌وضوح مشخص است.

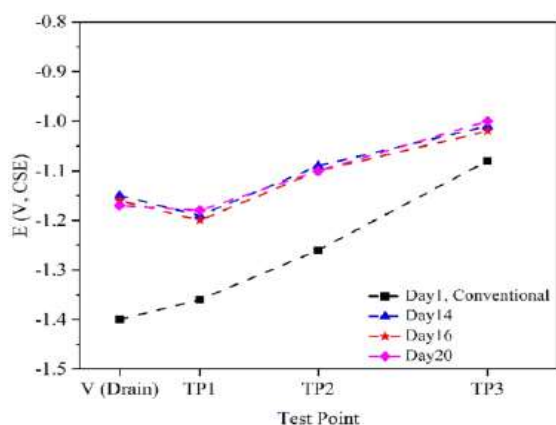
شکل (۵) پتانسیل حفاظتی در نقطه تزریق و سه تست پوینت در مدت زمان‌های مختلف در حالت A، با سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و حالت B با سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۶۰ کیلوهرتز را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، یکنواختی پتانسیل پس از نصب رکتیفایر پالسی در حالت A به‌وضوح مشخص است. با توجه به مشکلات بستر آندی از جمله تجمع گازهای احیا شده در بستر، مقاومت بالای ایجاد شده در این ناحیه و متعاقباً کاهش برد بستر آندی، با گذشت زمان ولتاژ نقطه تزریق افت کرد اما پتانسیل همچنان در محدوده حفاظت قرار داشت. با توجه به شرایط حاکم بر سیستم مذکور، مشکلات مربوط به عایق و وجود تداخل جریان در ایستگاه و در کل شبکه را نیز می‌توان از جمله عوامل موثر در کاهش ولتاژ تزریق دانست. به عبارت دیگر، جهت رسیدن نقطه تست ۳ به پتانسیل V_{CSE}



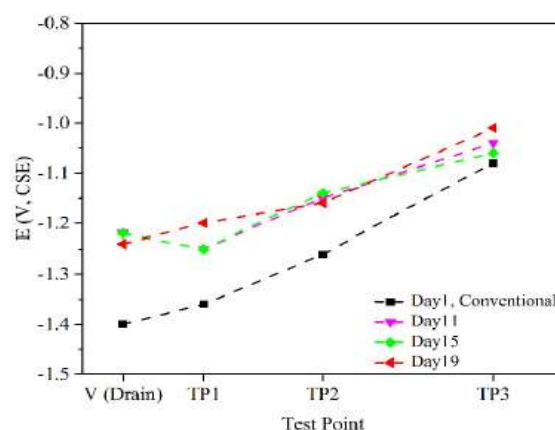
(ب)

(الف)

شکل ۵- شرایط حفاظت کاتدی در دو حالت معمول (Conventional) و پالسی (الف) حالت A با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و سیکل کاری ۷۳ درصد در روز سوم، هفتم و چهاردهم، (ب) حالت B با فرکانس ۶۰ کیلوهرتز و سیکل کاری ۷۳ درصد در روز هفتم، دوازدهم و بیستم.



(ب)



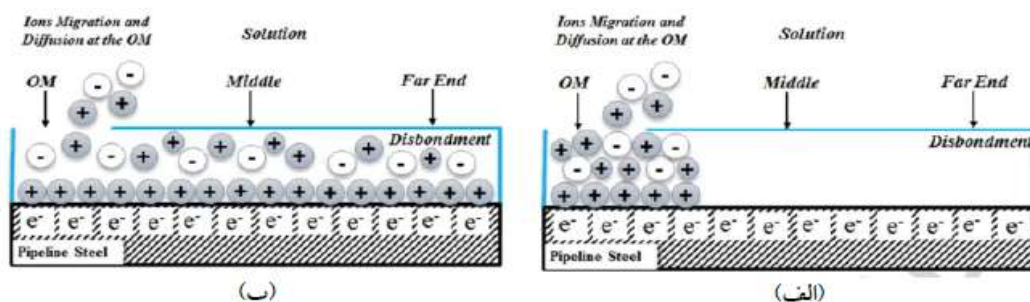
(الف)

شکل ۶- شرایط حفاظت کاتدی در دو حالت معمول (Conventional) و پالسی (الف) حالت C با فرکانس ۶۰ کیلوهرتز و سیکل کاری ۵۰ درصد در روز یازدهم، پانزدهم و نوزدهم، (ب) حالت D با فرکانس ۵۰ کیلوهرتز و سیکل کاری ۵۰ درصد در روز چهاردهم، شانزدهم و بیستم.

حاصل از اعمال حفاظت کاتدی، منجر به ایجاد پلاریزاسیون غلظتی در دهانه در ناحیه جدایش پوشش می‌شود. در این شرایط، جریان حفاظت کاتدی قادر به رسیدن به سطح کاتد نیست و نهایتاً پتانسیل خط لوله با افت مواجه خواهد شد. این در حالی است که با اعمال حفاظت کاتدی پالسی که دارای زمان خاموشی و روشنی است شرایط متفاوت است. موج پالسی به شکل مربعی اعمال می‌شود و دارای زمان ton و toff می‌باشد. در نهایت این امر باعث می‌شود که بار مثبت بیشتری نزدیک به سطح فلز تجمع نماید. با رسیدن به زمان روشنی، کاتیون‌ها روی سطح فولاد تجمع می‌کنند، پلاریزاسیون غلظتی رخ داده و کاتیون‌ها از سطح دور نمی‌شوند. در زمان خاموشی، حفاظت کاتدی قطع شده و کاتیون‌هایی که با نیروی محرکه ایجاد شده در هنگام اعمال حفاظت، روی سطح فولاد تجمع کرده بودند از سطح دور می‌شوند و سطح دپلاریزه خواهد شد و در درون شیار قابلیت نفوذ پیدا می‌کنند. این دو پدیده به شکل یک خازن عمل می‌کنند که در زمان روشنی در حال شارژ شدن، و در زمان خاموشی در حال دشارژ شدن است. این پدیده سبب یک افت در مقاومت پلاریزاسیون شده و عمق نفوذ حفاظت کاتدی در نواحی دارای مقاومت بالا مانند زیر پوشش را افزایش می‌دهد (شکل ۷).

۳-۲- تحلیل الکتروشیمیایی سیستم پالسی

بر اساس مطالعات صورت گرفته و نتایج بررسی‌های سیستم سنتی و پالسی، افت پتانسیل و متعاقباً خوردگی، در حضور سیستم پالسی کمتر است و این موضوع در نواحی که پوشش جدا شده و مقاومت بیشتر داشته باشیم محسوس‌تر خواهد بود. نکته حائز اهمیت دیگر این است که تعیین مقدار فرکانس، سیکل کاری و سایر پارامترهای موثر بر سیستم حفاظت کاتدی، بایستی بر اساس شرایط سازه تحت حفاظت و الکترولیت مورد نظر مشخص شود. به عبارت دیگر، شرایط بهینه سیستم حفاظت کاتدی پالسی باید بر اساس شرایط حاکم بر سیستم مشخص شود. پلاریزاسیون سطح کاتد به عوامل مختلفی بستگی دارد از جمله پلاریزاسیون غلظتی که به دلیل تجمع یون‌ها در اطراف سطح ایجاد می‌شود، پلاریزاسیون اکتیواسیون و مقاومت اهمی ایجاد شده ناشی از الکترولیت. بر اساس موارد مطرح شده، هنگامی که حفاظت کاتدی معمول به سیستم اعمال می‌شود، نرخ واکنش‌های کاتدی در نواحی که جریان قادر به رسیدن به سطح کاتد نیست، مانند ناحیه جدا شده پوشش، به دلیل چگالی جریان بالا افزایش می‌یابد. تجمع یون‌های تولید شده در دهانه محل جدایش پوشش و همچنین تمایل یون‌های موجود در بالک محلول به مهاجرت به درون شیار به دلیل نیروی محرکه



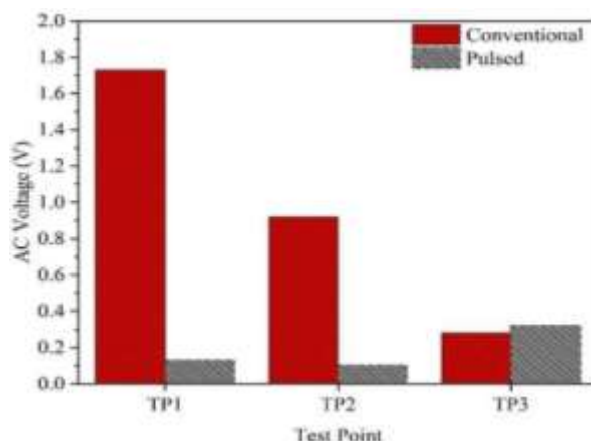
شکل ۷- نمایی از توزیع جریان زیر پوشش جداشده با اعمال حفاظت کاتدی پالسی. (الف) در زمان روشنی؛ (ب) در زمان خاموشی [۶].

سیستم می‌باشد. در نیمه منفی موج، جریان ترکیبی AC و DC منجر به احیای گونه‌های قابل احیای شده و سبب تشکیل هیدروژن و/یا یون‌های هیدروکسیل که در تماس با فلز هستند می‌گردند. در نیمه مثبت موج، جریان ممکن است سبب تغییر در لایه دوگانه الکتریکی شده و امکان اکسیداسیون هیدروژن و محصولات احیاشده و اکسیداسیون فلز وجود دارد که به معنی خوردگی فلز خط لوله است. پارامترهای گوناگون دیگری نیز بر این فرآیند موثر هستند؛ در میان این پارامترها مهم‌ترین عوامل، سطح CP و ترکیب شیمیایی خاک است [۴]. نتایج اندازه‌گیری‌های حالت A دارای سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز نشان می‌دهد که در سیستم پالسی، مقدار ولتاژ AC نسبت به سیستم سنتی کاهش قابل توجهی پیدا کرده است و در تست پوینت‌های ۱، ۲ و ۳ به ترتیب از مقدار ۱/۷۳، ۰/۹۲ و ۰/۲۸ به ۰/۱۳، ۰/۱۰ و ۰/۳۲ رسیده است (شکل ۸).

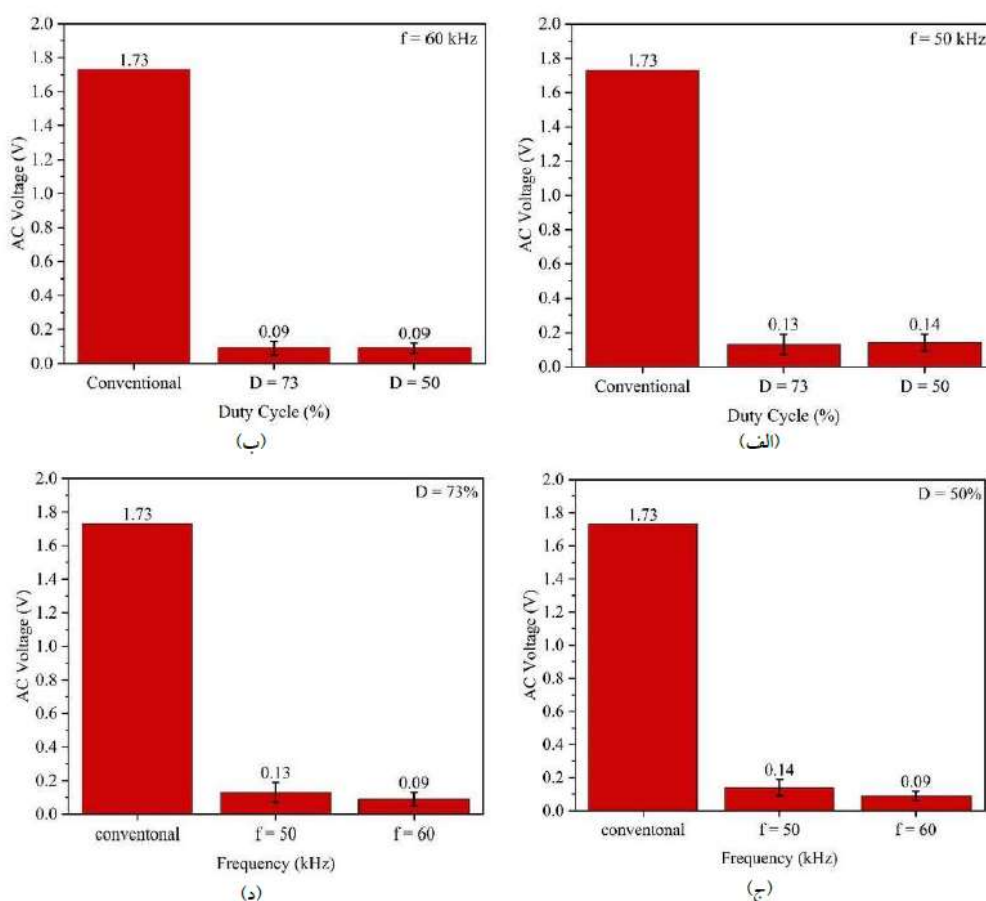
جهت بررسی بهتر عملکرد سیستم پالسی در مقایسه با سیستم معمول، تغییرات در مقدار ولتاژ AC در چهار حالت A، B، C و D در تست پوینت اول هر حالت، در مقادیر مختلف سیکل کاری و فرکانس به‌طور گرافیکی رسم شد. شکل ۹ نمودار روند تغییرات در این شرایط را نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر ولتاژ AC، مشاهده می‌شود که مقدار این پارامتر در سیستم پالسی تا بیش از ۸۰٪ کاهش یافته است. همانطور که مشاهده می‌شود، در مقادیر ثابت سیکل کاری، در فرکانس ۵۰ کیلوهرتز شاهد ولتاژ AC بیشتری نسبت به فرکانس ۶۰ کیلوهرتز هستیم. همچنین، در مقادیر ثابت فرکانس، مشاهده می‌شود که در فرکانس ثابت ۶۰ کیلوهرتز، ولتاژ AC کمتر است. علت این امر را می‌توان به ترکیب دو پارامتر سیکل کاری و فرکانس و تاثیر آن‌ها بر شرایط سیستم نسبت داد.

۳-۳- تاثیر حفاظت کاتدی پالسی بر ولتاژ AC

ولتاژ AC در واقع بر روی ولتاژ DC سوار شده و منجر به مثبت‌تر شدن آن می‌شود، بنابراین میزان ولتاژ AC باید در کمترین حالت ممکن قرار داشته باشد. اثر AC در مراجع علمی و فنی به سه عامل خازنی، القایی و مقاومتی ارتباط داده می‌شود. در روش خازنی هنگامی که یک هادی جریان برق به وسیله ولتاژ دارای انرژی می‌شود یک میدان الکتریکی قوی تولید می‌کند که این ولتاژ به هادی دوم نیز منتقل می‌شود. در این حالت دفن کردن لوله در محیط خاک باعث حذف شدن اثر خازنی می‌گردد. روش القایی ناشی از ایجاد میدان مغناطیسی در اطراف سیم هادی جریان الکتریسته است که بر سازه‌های فلزی اثر می‌گذارد. بر خلاف حالت قبلی که تنها خطوط روزمینی را تحت تأثیر قرار می‌دهد این روش هم خطوط روزمینی و هم خطوط زیرزمینی را شامل می‌شود. روش مقاومتی به عنوان حالتی گذرا و موقت شناخته می‌شود. همین اثر موقت که عموماً کمتر از یک ثانیه طول می‌کشد می‌تواند جریان بسیار زیادی به لوله دفن‌شده در مجاورت خط انتقال برق وارد نماید (مانند برخورد صاعقه). در این حالت سازه‌های فلزی که درون خاک مدفون هستند دارای جریان شده و اگر این سازه‌ها دارای پوشش عایق باشند ممکن است پتانسیل متناوب در سرتاسر پوشش آن‌ها گسترش یابد. لازم به ذکر است که خوردگی AC روی خطوط لوله دارای پوشش با مقاومت بالا (مثلاً پلی‌اتیلن سه‌لایه) احتمال وقوع بیشتری از خطوط لوله دارای انواع پوشش قیری قدیمی دارد [۴]. هنگامی که ولتاژ AC روی خط لوله تحت حفاظت کاتدی و عیوب موجود روی پوشش اعمال می‌شود، یک جریان AC در طول فصل مشترک فلز/خاک گسیل می‌شود. این جریان وابسته به امپدانس



شکل ۸ - روند کاهش ولتاژ AC حالت A در دو حالت معمول و پالسی با سیکل کاری ۷۳ درصد و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز در روز اول این سیستم.

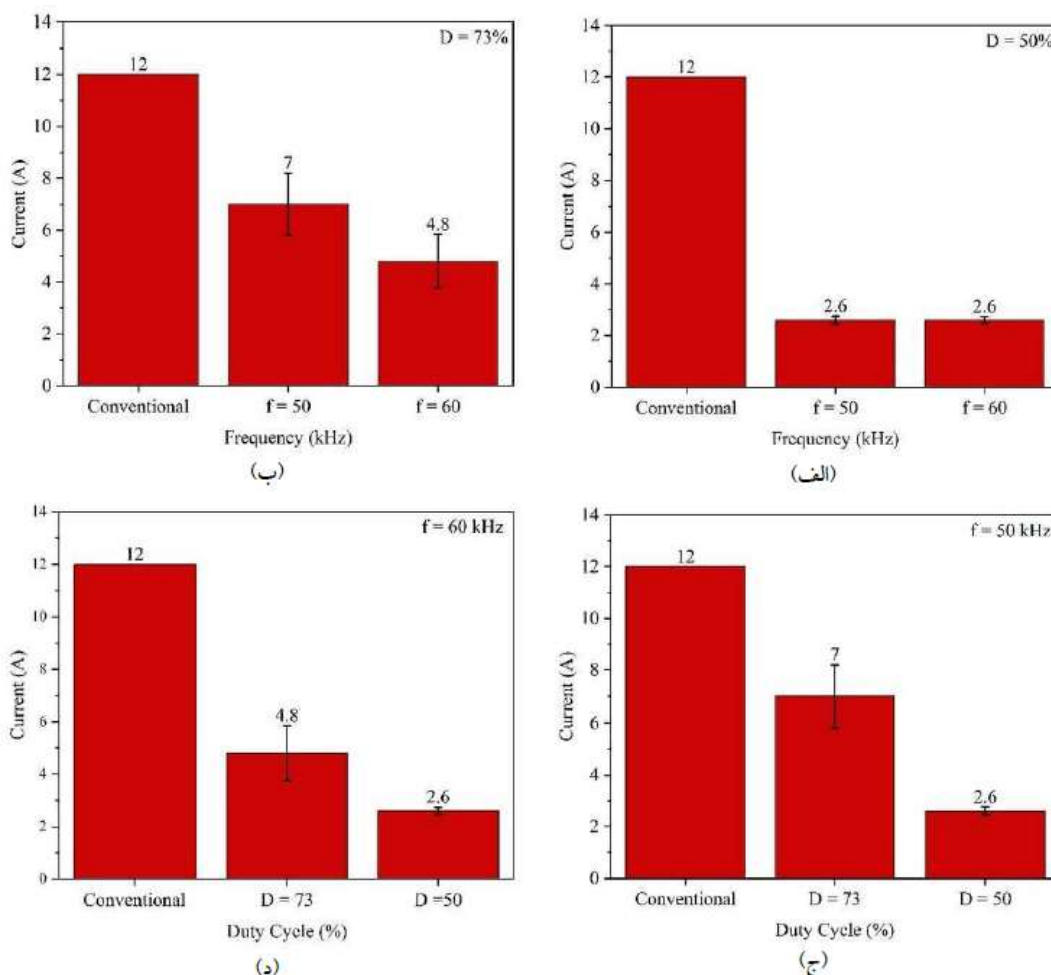


شکل ۹ - تغییرات در مقدار ولتاژ AC در چهار سیستم A، B، C و D در تست پوینت اول هر حالت در مقادیر مختلف سیکل کاری و فرکانس؛ الف و ب) تاثیر سیکل کاری در فرکانس ۵۰ و ۶۰ کیلوهرتز، ج و د) تاثیر فرکانس در سیکل کاری ۷۳ و ۵۰ درصد.

مقادیر جریان مصرفی نشان می‌دهد که در سیستم پالسی مصرف جریان تا بیش از ۷۰٪ در مقادیر خاصی از فرکانس و سیکل کاری نسبت به سیستم سنتی کاهش یافته است. کاهش بیشتر جریان در سیکل کاری ۵۰ درصد را می‌توان به مدت زمان بیشتر خاموشی در این حالت نسبت به حالت دارای سیکل کاری ۷۳ درصد دانست. با توجه به این که موج پالسی در زمان خاموشی عملاً مصرف جریانی ندارد، می‌توان بیان کرد که در این حالت مصرف انرژی به مراتب کاهش می‌یابد که عامل بسیار مهمی در مصرف انرژی و هزینه‌های اقتصادی محسوب می‌شود.

۳-۴- تاثیر حفاظت کاتدی پالسی بر مصرف جریان

بررسی‌های انجام شده بر روی عملکرد دو سیستم سنتی و پالسی نشان می‌دهد که سیستم پالسی جریان بسیار کمتری را مصرف می‌کند به طوری که جریان DC خروجی تا حدود ۲ آمپر در روز اول بررسی سیستم در حالت A کاهش پیدا کرد. این در حالی است که ولتاژ نقطه تزریق همچنان در حدود $V_{CSE} - 1/4$ قرار داشت. با بررسی روند کلی مصرف جریان در دو سیستم سنتی و پالسی، کاهش جریان مصرفی در نقطه تزریق در حالت‌های A، B، C و D به وضوح مشخص است. شکل ۱۰ این روند را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰ - میزان جریان مصرفی در سیستم سنتی و سیستم‌های پالسی A، B، C و D و مشاهده اثر فرکانس و سیکل کاری بر جریان مصرفی.

نتیجه گیری

- بر اساس اندازه گیری های انجام شده، می توان مشاهده نمود که در همه شرایط، سیستم پالسی، ولتاژ AC را تا حد قابل ملاحظه ای کاهش می دهد. منبع این ولتاژ را می توان رکتیفایر سنتی یا منابع دیگر در اطراف ناحیه حفاظتی دانست. علاوه بر این، پتانسیل حفاظتی بسته به شرایط سیستم و پارامترهای فرکانس و سیکل کاری در مجموع یکنواخت تر از سیستم سنتی بود.
- در حالت D با سیکل کاری برابر ۵۰ درصد و فرکانس ۵۰ کیلوهرتز بهترین حالت توزیع پتانسیل مشاهده می شود. این موضوع نشان دهنده این مطلب است که در حالت D، سیستم پالسی شرایط بهتری دارد. طبق نتایج مشاهده شده، در هر سیستم باید مقدار پارامترهای سیکل کاری و فرکانس بر اساس شرایط حاکم بر آن مشخص شود.
- نتایج نشان می دهد که در سیستم پالسی، مقدار ولتاژ AC نسبت به سیستم سیستم پالسی تا بیش از ۸۰٪ کاهش یافته است. به علاوه، مقادیر جریان مصرفی نشان می دهد که در سیستم پالسی مصرف جریان تا بیش از ۷۰٪ در مقادیر خاصی از فرکانس و سیکل کاری نسبت به سیستم سنتی کاهش یافته است. با توجه به این که موج پالسی در زمان خاموشی عملاً مصرف جریانی ندارد، می توان بیان کرد که در این حالت مصرف انرژی به مراتب کاهش می یابد که عامل بسیار مهمی در مصرف انرژی و هزینه های اقتصادی محسوب می شود.
- با وجود تاثیر گذاری پارامترهای متعددی چون، مقاومت خاک، شرایط پوشش، جریان های سرگردان و غیره که به طور کلی نیاز به بررسی های دقیق تر و جداگانه دارند، بر اساس مطالب مطرح شده از دو منظر الکتروشیمیایی و الکتریکی، می توان نتیجه گرفت که سیستم مورد نظر بر اساس شرایط حاکم، در مقادیر مشخصی از فرکانس و سیکل کاری عملکرد بهتری دارد. بنابراین، استفاده از چنین سیستم هایی در مناطق دارای مقاومت زیاد الکترولیت و بستر آندی را می توان گزینه مناسبی دانست. همچنین، در صورتی که خط لوله دارای پوشش باشد، حتی با وجود مناطق جدایش پوشش، این سیستم پتانسیل را در محدوده حفاظت و با یکنواختی بیشتری اعمال می کند.

مراجع

- [1] J. A. Beavers, N. G. Thompson, "External corrosion of oil and natural gas pipelines," ASM Handbook, Vol. 13, 2006, Pp. 1015-1025.
- [2] A.W. Peabody, "Peabody's control of pipeline corrosion", second edition., NACE International, Houston, 2001.
- [3] B. G. Ackland, K. P. Dylejko, "Critical questions and answers about cathodic protection", Corrosion Engineering Science Technology, Vol. 54, 2019, Pp. 688-697.
- [4] T. J. A. Richardson et al., "Shreir's corrosion", Vol. 53, Cambridge University Press, Pp. 4000, 2010.
- [5] J. Bauman, S. E. Calgary "Well casing cathodic protection utilizing pulse current technology", Corrosion 2004, Pp. 1-4, 2004.
- [6] H. Najafi, A. Eslami, M. A. Golozar, A. Kavian, M. Ahmadi, "Effect of pulse cathodic protection on corrosion mitigation and electrochemical conditions under a simulated coating disbondment on pipeline steel", Materials and Corrosion.
- [7] I. A. Metwally, A. H. Al-Badi, "Analysis of different factors affecting cathodic protection for deep well casings", Materials and Corrosion, Vol. 61, 2010, Pp. 245-251.
- [8] D. A. Diakow, G. J. Van Boven, M. J. Wilmott, "Polarization beneath disbonded coatings: A comparison between conventional and pulsed cathodic protection", NACE International, 1997.
- [9] T. M. Doniguian, "The pulse rectifier", American Gas Association Operating Section Proceedings, Pp. T44-49, 1982.
- [10] B. Chance, Waveforms, Boston Technical Publishers, 1949.
- [11] T.D. Doniguian, R.C. Robinson, "Corrosion measuring techniques confirm effectiveness of pulse cathodic protection for buried steel pipeline", NACE International, Houston, TX (United States), 1999.