بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران

تمیزکاری مقرّه‌های خطوط انتقال برق (شیشه‌ای و سرامیکی) با استفاده از کندگی لیزری و پایش هم‌زمان به روش واقطبش نور

علی رحمت پناهی، علی بوالی*، فاطمه احمدی نوری، مرضیه امانی، ملیکا افشار ، محمد سلطانی نژاد

دانشکده مهندسی انرژی و فیزیک، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

*نویسنده مسئول: alibavali@aut.ac.ir

چکیده- پایش و پاکسازی سطح مقره‌های انتقال برق یکی از ضروریات حفاظت از خطوط انتقال برق قدرت است. روش‌های مختلفی برای حفاظت و نگهداری مناسب از مقره‌ها موجود است. برای تمیزکاری مقره‌های خطوط برق از شیوه‌های د ستی(خطوط سرد) و یا ا ستفاده از ابزاری همچون بالگرد یا و سیله‌های حمل و نقل بدون سرنشین (خطوط گرم) استفاده می‌شود. در این پژوهش با استفاده از لیزر نئودیوم-یاگ و روش واقطبش نور سامانه‌ای نوین طراحی و برپا شده ا ست که افزون بر تمیزکاری مقره‌های خطوط انتقال برق بدون حـ ضور نیروی انسانی و با استفاده از فناوری روبوتیک، قابلیت پایش لحظه‌ای آلودگی مقره به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی سطح در حین پاکسازی به این سامانه افزوده شده است.

کلید واژه- لیزر نئودیوم-یاگ، کندگی لیزری، تکنیک واقطبش ، تمیزکاری مقره‌های خطوط برق.

Optical system for cleaning and inspection of electric power line insulators (glass and ceramic) using laser ablation and depolarization technique

Ali Rahmatpanahi, Ali Bavali, Fatemeh Ahmadinouri, Marziye Amani, Melika Afshar, Mohammad Soltaninezhad

Department of Electrical Engineering and Physics, Amirkabir University of Technology (AUT), Tehran, Iran

Abstract- Inspection and maintenance of electric power line insulators is one of the necessities of maintenance of electric power line network. Different methods are used for proper maintenance of insulators i. e. manual (cold line) or using some devices such as unmanned helicopter and vehicles (hot line). In this work, a new method is proposed for removing contamination of electric power line insulators using laser and depolarization technique. In this method, cleaning insulator's contamination can be performed by using Nd: YAG laser to ablate contaminations. Moreover, in order to prevent insulator damage during cleaning, depolarization technique is proposed supported by a robotic system.

Keywords: Nd: YAG laser, Depolarization technique, Cleaning Power Line Insulators cleaning.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

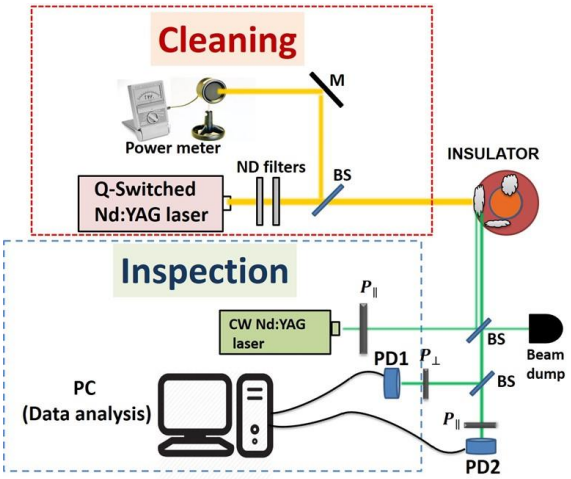
۱-مقدّمه

مقره‌ها یکی از اجزاء مهم و کاربردی در خطوط انتقال برق هستند که با توجه به سطح آلودگی و همچنین برحسب سطح ولتاژ و محیط نصب، شکل و جنس، طراحی‌های مختلفی را شامل می‌شوند. وظیفه‌ی تحمل وزن هادی‌های خطوط برق و عایق نمودن بین هادی، دکل و زمین برعهده مقره‌های خطوط انتقال است [۱-۴]. اغلب وقفه و محدودیت‌های انتقال نیرو از اختلال در عملکرد مقره‌ها ناشی می‌شود. نشان می دهد که به طور متوسط ۸۰ تا ۸۵٪ از کارافتادگی خطوط انتقال، ناشی از اختلال در عملکرد مقره‌ها است. بنابراین تعمیر و حفاظت از مقره‌های خطوط انتقال یکی از الزامات نگهداری از شبکه برق قدرت است [۵]. آلودگی مقره های خطوط برق شامل: نمک، گچ، سیمان، گردوخاک، مدفوع پرندگان، و حتی آلودگی های صنعتی و شیمیایی مانند زنگ زدگی است. در حال حاضر روش معمول برای پاکسازی مقره‌ها، شستشوی دوره‌ای و یا استفاده از گریس‌های سیلیکونی و پوشش‌های سیلیکون رابری است که این روش نیازمند تعویض دوره ای است [۹]. این رویکرد سنتی با حضور فیزیکی نیروی انسانی انجام می-شود. این در حالی است که کارایی کندگی لیزری در تمیزکاری آلودگی سطحی فلزات با استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG به اثبات رسیده است [۶]. همچنین استفاده از لیزر پالسی Nd:YAG با پالس‌های نانوثانیه در پاکسازی مقره‌های شیشه‌ای و سرامیکی در آزمایشگاه مورد مطالعه قرار گرفته است [۷]. هر چند کارایی این سامانه در پاکسازی انواع آلودگی‌ها به اثبات رسیده است، اما به دلیل نامشخص بودن زمان تابش مناسب برای پاکسازی بدون حضور مستقیم انسانی (سامانه روبوتیک حامل لیزر) امکان صدمه دیدن سطح مقره پس از لایه‌برداری وجود دارد.

در این پژوهش امکان پایش مراحل پاکسازی بطور لحظه‌ای فراهم می‌شود به نحوی که به محض زدایش آلودگی‌ها عمل تابش لیزر متوقف می‌گردد. این سامانه بر اساس تکنیک واقطبش نور (Depolarization technique) بنا شده است که کندگی لیزری توسط سامانه لیزر پالسی نئودیوم-یاگ انجام و پایش آلودگی با لیزر پیوسته کار نئودیمیوم-یاگ انجام می‌پذیرد. از مزایای این طرح نسبت به سایر روش‌های پاکسازی لیزری می‌توان به انجام عملیات شستشو با کمترین آسیب به سطح مقره‌ها به وسیله‌ی پایش آلودگی در حین تمیزکاری لیزری و ایمنی و دقت بیش‌تر اشاره کرد. لازم به ذکر است که عدم نیاز به حضور نیروی انسانی و بازرسی توسط سامانه شوینده‌ی توسعه‌یافته از مزایای قابل توجّه روش مذکور نسبت به روش‌های سنتی است.

۲-بخش تجربی

شکل۱ طرحواره آرایه آزمایشگاهی پاکسازی و پایش را نشان می‌دهد.



شکل۱: طرحواره آرایه آزمایشگاهی پاکسازی آلودگی‌های مقره و پایش آلاینده‌ها متشکل از آینه IR (M)، فتودیود (PD)، فیلتر ND، قطبنده های موازی و عمود (P)، مقسّم پرتو(BS)، لیزر Nd-YAG و سامانه آنالیز اطلاعات (PC).

در این سامانه آلودگیهای سطح مقره در اثر تابش پالس های با پهنای ۱۰ نانوثانیه لیزر کنده شده و تابش باریکه

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

قطبیده لیزر پیوسته‌کار به سطح مقره و بررسی ضریب واقطبش آن حضور آلودگی‌ها را نشان می‌دهد. به این ترتیب در حین تمیزکاری با توان تابشی به کار رفته، مدت زمان لازم برای تابش‌دهی جهت رفع کامل آلودگی (کاهش ضریب واقطبش و تطابق آن با مقدار مربوط به سطح پاک مقره) نیز تعیین می‌شود. این زمان لحظه‌ی شروع کندگی تا زمان رفع آلودگی است. در بخش پایش، باریکه لیزر پیوسته‌کار پس از عبور از قطبش‌گر خطی به سطح مقره تابیده می‌شود. پراکندگی لیزر از سطح توسط اپتیک مناسب (در سامانه پیشنهادی بهتر است از فیبر نوری نگهدارنده قطبش استفاده شود) هدایت شده و پس از عبور از مقسّم پرتو، به دو باریکه تقسیم می‌شود که این دو باریکه از دو تحلیلگر متعامد عبور و هرکدام به طور جداگانه توسط یک آشکارساز نوری شدت ثبت می‌شوند. کسر واقطبش از رابطه ی (۱) محاسبه می شود:

$$R = \frac{I_{\perp}}{I_{\parallel}} \qquad (۱)$$

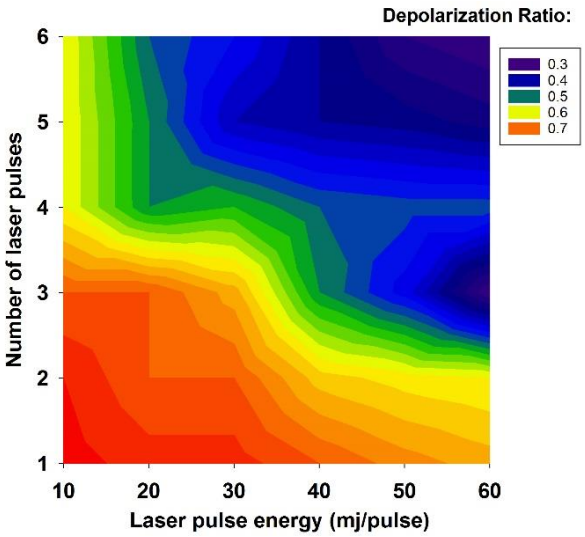
که در آن $I_{\parallel}$ و $I_{\perp}$ به ترتیب شدت مؤلفه‌های موازی و متعامد قطبش باریکه هستند. شکل ۲ نمونه مقره‌های بدون آسیب و آسیب‌دیده (تخریب مقره) را نشان می‌دهد که حاکی از اهمیت وجود بخش بازرسی (پروب فیبر نوری و طیف‌سنجی) به روش واقطبش است.



(ب) (الف)

شکل ۲: الف) عدم آسیب‌دیدگی مقره، ب) آسیب‌دیدگی سطح مقره.

در شکل ۳ تغییرات ضریب واقطبش برای بازتاب لیزر پیوسته در طول موج ۵۳۲ نانومتر از سطح مقره در حین تابش‌دهی با لیزر پالسی Q سوئیچ پاکسازی کننده، با انرژی‌های پالس از ۱۰ تا ۶۰ میلی‌ژول و زمان‌های تابش‌دهی متفاوت (از ۱ تا ۶ ثانیه) رسم شده است. در این شکل، کاهش ضریب واقطبش به معنای افزایش زدودش آلاینده‌ها است. در عدم حضور آلاینده ها، سطح شیشه یا سرامیک مقره با درجه صافی نسبتاً زیاد مانند یک بازتاباننده‌ی سطحی عمل می‌کند که نتیجه‌ی آن بازتابیدن پرتو لیزر قطبیده خطی با اندکی واقطبیدگی (ضریب واقطبش حدود ۰,۲۴±۰,۰۵ است. در حضور آلودگی‌ها که سطحی زبر شامل توده‌های نامنظم از ذرات با ابعاد میکرونی تا میلیمتری با اشکال هندسی متفاوت است، واقطبیدگی پرتو لیزر در بازتاب افزایش می‌یابد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، هر چه بر انرژی پالس و بازه زمانی تابش (تعداد پالسهای تابیده شده) افزوده شود، پالایش مؤثرتری اتفاق می‌افتد. با این وجود، به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی سطح مقرّه لازم است تا بازه زمانی و میزان انرژی تابشی بر سطح مقرّه با کمک تکنیک واقطبیدگی نور لیزر کنترل شود. برای پاکسازی گرد و خاک محلی نیاز به چگالی توان در واحد سطح بالا نبود بنابراین باریکه لیزر در آزمایش‌های مربوط به این مقاله بدون تمرکز با عدسی و با قطر لکّه حدود ۲ میلی‌متر به کار رفته است.



شکل۳: تغییرات ضریب واقطبش بر حسب زمان تابش و انرژی پالس با طول موج ۵۳۲ نانومتر.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]

در نهایت، اجزاء-سامانه پیشنهادی بر اساس نتایج ذکر شده به شرح ذیل است: (۱) نگهدارنده‌ی طبیعی مقرّه، (۲) مقرّه، (۳) لنز استوانه‌ای کوارتز، (۴) آینه‌ی IR، (۵) بازوی هدایت پرتو لیزر (حامل پروب فیبر نوری و عدسی جمع آوری کننده)، (۶) لیزر پالسی Nd:YAG، (۷) روبوت (حامل سامانه طیفسنج نوری) و (۸) چرخ‌های روبوت.

در این سامانه روبوت توسط چرخ‌ها روی کابل‌های برق حرکت می‌کند. پالس‌های لیزر توسط بازوی روبوت مجهز به آینه‌ی IR هدایت شده و پس از عبور از لنز مناسب روی سطح مقره می‌تابند. مقرّه به تجهیزات خطوط برق محکم شده است. پالس‌های اولیه‌ی لیزر موجب ذوب، تبخیر و یونیزاسیون ذرات سطحی آلودگی روی مقره می‌شود. بازوی روبوت مجهز به پروب فیبر نوری برای انتقال باریکه لیزر قطبیده به سطح مقره است و آشکارساز درون بدنه‌ی دستگاه روبوت جاسازی شده است. بازو همچنین تابش جمع‌آوری شده را به سامانه طیف‌سنج منتقل می‌کند. به این ترتیب ضریب واقطبش اندازه‌گیری شده نشانی از وجود یا عدم وجود آلودگی روی سطح مقره است. این بخش امکان پایش حین شستشو را فراهم می‌کند. با حرکت بازو، لکه‌ی لیزر سطح مقره را می‌روبد. مدت زمان تابش‌دهی نیز با هشدار بخش پایش و توقف دستگاه تعیین می‌شود.

از آن‌جا که در هر منطقه جغرافیایی، نوع و شدت آلودگی‌ها مشخص است، برای هر نوع آلودگی منحنی کالیبراسیون برای ضریب واقطبش در آزمایشگاه تعیین می‌شود. با این وجود استفاده از روش واقطبش همزمان با شستشو برای تشخیص دقیق و لحظه‌ای زمان مناسب توقف تابش امکان پذیر است.

۳-نتیجه‌گیری

درصد قابل توجهی از وقفه و اختلال‌ها در خطوط انتقال برق از نگهداری نادرست و عدم تمیزکاری مناسب مقره‌های خطوط انتقال قدرت ناشی می‌شود. امروزه این عملیات به روش خطوط سرد و با شستشو دوره‌ای انجام می‌پذیرد. در این پروژه، سامانه پایش و تمیزکاری خطوط انتقال برق با استفاده از لیزر نئودیوم-یاگ و روش واقطبش پیشنهاد و ساخته شده است. در این روش پیشنهادی، پالایش مقره بدون حضور انسانی صورت می‌پذیرد. علاوه بر مزیت فوق و به منظور جلوگیری از آسیب‌دیدگی سطح مقره، امکان پایش مراحل پاکسازی و اتمام زمان تمیزکاری نیز با دقت و ایمنی فراتر از روش‌های پیشین فراهم شده است.

منابع:

[۱] X. Jiang, J. Yuan, Z. Zhang, J. Hu, ‘Study on AC Artificial-Contaminated Flashover Performance of Various Types of Insulators’, *IEEE Trans. Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2567–2574, 2007.

[۲] X. Jiang., J. Yuan, Z. Zhang, J. Hu, ’Study of AC Pollution Flashover Performance of Porcelain Insulators at High Altitude Sites of 2800-4500m’, Vol. 24, No. 3 *IEEE Trans. Power Delivery*, pp. 1426-1432, 2009.

[۳] Zhang, Z., Jiang, X., Chao, Y., et al.: ‘Influence of Low Atmospheric Pressure on AC Pollution Flashover Performance of Various Types of Insulators’, *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul*., pp. 425-433, 2010.

[٤] H. Zhao, H. Lin, S. Liao,’New method for leakage current detection of insulators based on wavelet transform’, *High Vol. Eng.*, 4, pp. 34-36, 2005.

[٥] k. Masod, H. Abrosh, M. Pour Rafi Orbani:’Senescence and accidents of insulators at Mazandaran province’. *11th Conference of Power Ditribution, Mazandaran*, Iran, 2006.

[۶] Laser cleaning of metal stock, Patent No. 4898650.

[۷] E. Posada, L. Moreira, M. Arronte, L. Ponce, and T. Flores, “On the Use of Laser Ablation for Cleaning High Voltage Ceramic Insulators”, *J. Sur. Eng. Mat. Adv. Tech.*, 4, pp. 257-261, 2014.

این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-02]