

علت‌یابی سوختن برق‌گیرهای اکسید فلزی در مناطق کوهستانی استان خوزستان؛ تجربیات مهندسی از تحلیل نتایج میدانی در یک شبکه ۳۳ کیلوولت بسیار گسترده

الهه مشهور و سید حمیدرضا آل محمد

ناشی از صاعقه و کلیدزنی می‌باشند [۱]. به منظور محدود کردن اضافه ولتاژهای موقی در سیستم‌های قدرت از برق‌گیرها استفاده می‌گردد. اگرچه به طور طبیعی، برق‌گیرها در برابر اضافه ولتاژهای فرکانس ۵۰ هرتز از خود واکنشی نشان نمی‌دهند، اما این اضافه ولتاژها به دلیل ایجاد گرمایش در قرص‌های وارستورها، ممکن است عملکرد برق‌گیر را تحت تأثیر قرار دهند. علاوه بر آن، تأثیر شرایط محیطی منطقه مورد بهره‌برداری (رطوبت و آلودگی) نیز بر عملکرد برق‌گیر قابل چشم‌پوشی نیست. لذا انتخاب صحیح مشخصات برق‌گیرها و عملکرد مناسب آنها نقش بسیار ارزنده‌ای در حفظ پایداری ایزولاسیون تجهیزات سیستم قدرت دارد [۲]. برای انتخاب برق‌گیرهای اکسید فلزی برای یک شبکه، شش کمیت اصلی تعیین می‌شوند که شامل حداکثر ولتاژ کار دائم، ولتاژ نامی، فاصله خزشی مقرر، جریان تخلیه نامی، سطح حفاظت برق‌گیر و کلاس تخلیه برق‌گیر می‌باشد [۳]. سه کمیت اول مربوط به جریان فرکانس ۵۰ هرتز و سه کمیت دیگر مربوط به جریان‌های موقی می‌باشند. این انتخاب برای هر شبکه باید با در نظر گرفتن شرایط الکتریکی و محیطی صورت گیرد تا بتوان از عملکرد برق‌گیر اطمینان حاصل نمود.

سوختن مکرر برق‌گیرها در مناطق کوهستانی استان خوزستان یکی از مشکلات اساسی در بهره‌برداری از شبکه‌های برق این ناحیه می‌باشد که علت‌یابی آن به یکی از دغدغه‌های اصلی بهره‌برداران شبکه تبدیل شده است.

۱-۱ پیشینه موضوع

مرور مقالات گذشته نشان می‌دهد که سوختن برق‌گیرها در شبکه‌های فشارمتوسط توزیع، پدیده جدیدی نیست و در این زمینه تجربه‌های مختلفی وجود دارد و مطالعات مختلفی در خصوص بررسی علت‌های سوختن برق‌گیرها یا پیشگیری از سوختن آنها و سایر جنبه‌های مرتبط با عملکرد برق‌گیرها انجام گردیده است که در ادامه، تعدادی از آنها مرور شده‌اند:

مرجع [۴] به دنبال وقوع طوفان‌های صاعقه در جزیره استان^۳ و خرابی‌های مکرر تجهیزات، عملکرد برق‌گیرهای اکسید فلزی و برق‌گیرهای سیلیکون کارباید را در سیستم برق این ناحیه مورد بررسی قرار داده است. سیستم توزیع این ناحیه دارای زمین ضعیف با ویژگی‌های منحصر به فرد بوده است که از آن جمله می‌توان به ساختار ایزوله، وجود مسیرهای حلقوی، وجود مسیرهای ترکیبی از خط هوایی، کابل هوایی و

چکیده: این مقاله، یافته‌های یک تحقیق عملی را جهت آشکارسازی عوامل تخریب برق‌گیرهای اکسید فلزی در یک شبکه توزیع فشارمتوسط هوایی در منطقه کوهستانی ایذه در استان خوزستان ارائه می‌دهد که از نظر آب و هوایی، سالانه دو دوره گرم و معتدل را تجربه می‌کند. برق‌گیرها در هر دو دوره که شرایط بهره‌برداری شبکه و شرایط جوی کاملاً متفاوت هستند، معیوب شده‌اند و تغییر شکل ظاهری آنها در این دوره‌ها با هم متفاوت است. در این مقاله با شبیه‌سازی شبکه مورد مطالعه، رفتار حالت دائم و گذرای شبکه تحلیل می‌شود و بر اساس نتایج حاصل و شرایط محیطی منطقه، مشخصات برق‌گیر مناسب برای شبکه محاسبه و با مشخصات برق‌گیرهای موجود مقایسه می‌شود. سپس با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای مقاومت زمین برق‌گیرها، تغییرات انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیرها ارزیابی می‌شود و نتایج حاصل با نتایج واقعی دریافت‌شده در شبکه در نتیجه کاهش عملی مقاومت زمین تعدادی از برق‌گیرها مقایسه می‌شود. به علاوه با افزودن تعدادی برق‌گیر به شبکه، تغییرات جذب انرژی برق‌گیرها بررسی می‌شود. بر اساس یافته‌های پژوهش، علل معیوب شدن برق‌گیرها در دوره‌های گرم و معتدل بررسی شده و اعتبار یافته‌های این تحقیق از طریق مقایسه نتایج حاصل با رخدادهای میدانی صحه‌گذاری می‌شود و راهکارهای رفع مشکل ارائه می‌گردد.

کلیدواژه: اضافه ولتاژ حالت دائم، اضافه ولتاژ ناشی از صاعقه، برق‌گیر، قابلیت جذب انرژی، سیستم زمین.

۱- مقدمه

یکی از مسایل مهم در طراحی و بهره‌برداری هر شبکه الکتریکی، حفاظت شبکه و تجهیزات آن می‌باشد. حفاظت، جنبه‌های مختلفی دارد که یکی از مهم‌ترین آنها حفاظت عایقی است که به عنوان حفاظتی برای ایزولاسیون داخلی تجهیزات شناخته می‌شود. عمده‌ترین عواملی که ایزولاسیون تجهیزات را تهدید می‌کنند، اضافه ولتاژهای شبکه، شامل اضافه ولتاژهای کوتاه‌مدت یا موقتی^۱ (TOV) و اضافه ولتاژهای بلندمدت یا دائم^۲ (COV) فرکانس ۵۰ هرتز و همچنین اضافه ولتاژهای موقی

این مقاله در تاریخ ۱۹ شهریور ماه ۱۴۰۰ دریافت و در تاریخ ۲۹ آبان ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

الهه مشهور (نویسنده مسئول)، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، (email: e.mashhour@scu.ac.ir).

سید حمیدرضا آل محمد، گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران، (email: shm.alemohammad@yahoo.com).

1. Temporary over Voltage
2. Continuous over Voltage

تابعی از چگالی احتمال وقوع اضافه ولتاژ و احتمال تخلیه مخرب^۵ تعریف شده است. روش پیشنهادی به صورت یک مسأله بهینه‌سازی نامقید، فرمول‌بندی و با روش‌های عددی حل شده است. مرجع [۹]، یک روش بهینه‌سازی مبتنی بر الگوریتم ژنتیک را جهت تعیین مکان بهینه برق‌گیرها در یک شبکه قدرت با هدف کمینه‌سازی احتمال سوختن برق‌گیر در نتیجه تخلیه انرژی و همچنین ریسک تخریب ایزولاسیون انجام داده و در آن هزینه‌های خروج خط ناشی از عوامل فوق را نیز در نظر گرفته است. برای ارزیابی ریسک تخریب‌های ایزولاسیون‌ها و برق‌گیرها در اثر صاعقه، از روش‌های آماری استفاده شده است. در [۱۰]، مکان‌یابی بهینه برق‌گیرها برای شبکه توزیع با هدف ایجاد سطح قابل قبول حفاظت در برابر صاعقه با حداقل هزینه سرمایه‌گذاری با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام شده و به منظور ارزیابی سطح حفاظت شبکه در هر کروموزوم از نرم‌افزار ATP^۶ استفاده گردیده است.

در [۱۱]، یک روش کاربردی و بدون انجام بهینه‌سازی ریاضی برای تعیین حفاظت یک شبکه توزیع روستایی (با مشخصات معین) در برابر صاعقه با ارزیابی انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیرها ارائه شده است. تحلیل‌های حالت گذرا با استفاده از ابزار شبیه‌سازی ATPDraw^۷ صورت گرفته است. در [۱۲] به منظور یافتن یک راه حل مؤثر (شامل استفاده از محافظ^۸ و برق‌گیر) برای حفاظت خطوط توزیع در اثر برخورد صاعقه، یک شبکه توزیع ۲۴ kV در کشور تایلند، تحت سناریوهای مختلفی از فواصل زمین‌شدن محافظ، مقادیر مختلف مقاومت زمین و موقعیت برخورد صاعقه مورد ارزیابی قرار گرفته است. شاخص ارزیابی، ولتاژ دو سر ایزولاسیون و انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیر بوده است. در [۱۳]، اثربخشی روش‌های مختلف جلوگیری از سوختن برق‌گیرهای شبکه توزیع فشارمتوسط در اثر برخورد صاعقه (شامل استفاده از یک یا دو محافظ و همچنین تغییر مقاومت زمین) با تحلیل حالت گذرای شبکه به کمک نرم‌افزار EMTP^۹ مورد بررسی قرار گرفته است. در [۱۴]، یک روش تحلیلی همراه با آنالیز حساسیت جهت ارزیابی احتمال سوختن برق‌گیرهای سیستم انتقال با در نظر گرفتن مقاومت زمین و فاصله آنها ارائه شده است.

نتایج مطالعات محققین نشان می‌دهد که یکی از مهم‌ترین عوامل سوختن برق‌گیرها، عدم تناسب مشخصات برق‌گیر (مشخصات حوزه فرکانس ۵۰ هرتز یا مشخصات موجی) با شرایط بهره‌برداری شبکه می‌باشد. این شرایط تحت تأثیر ساختار و آرایش شبکه، نحوه زمین‌شدن نقطه صفر ترانسفورماتورها و همچنین شرایط محیطی، از یک شبکه به شبکه دیگر متفاوت است. لذا دستورالعمل‌های مفید برای محاسبه مشخصات برق‌گیرها [۳] و [۱۵] که در بسیاری از شبکه‌ها کارآمد هستند، در شبکه‌های الکتریکی با ویژگی‌های خاص ممکن است ناکافی باشند. تحت این شرایط، مطالعات اختصاصی آن شبکه، یک موضوع کلیدی در انتخاب مشخصات برق‌گیرها می‌باشد. یکی از این شبکه‌های خاص، یک شبکه توزیع کوهستانی در استان خوزستان است که آمار بالایی از سوختن برق‌گیرها را به خود اختصاص داده است.

کابل زیرزمینی با خاصیت خازنی بالا و امکان برگشت توان از قسمت ولتاژ پایین به قسمت ولتاژ بالای شبکه اشاره نمود. بررسی‌ها نشان می‌دهد با وجود این که برق‌گیرهای اکسید فلزی در مقایسه با برق‌گیرهای سیلیکون کارباید^۱، سطح حفاظت بهتری برای تجهیزات سیستم فراهم می‌کنند، اما حساسیت بسیار بیشتری به شرایط اضافه ولتاژهای دائمی و موقت سیستم دارند و بیشتر مستعد عملکرد نادرست می‌باشند. این مرجع نشان می‌دهد که در نظر گرفتن دو عامل متداول تنظیم ولتاژ و افزایش ولتاژ فازهای سالم در شرایط خطای تک‌فاز به زمین، به تنهایی برای تعیین اضافه ولتاژهای موقت سیستم و انتخاب برق‌گیر کافی نمی‌باشد و می‌تواند منجر به عملکرد ناصحیح یا سوختن برق‌گیر شود. برای این منظور مدل‌سازی شبکه و محاسبات دقیق اتصال کوتاه برای شبکه‌هایی با ویژگی‌های خاص برای تعیین اضافه ولتاژهای موقت فرکانس ۵۰ هرتز راهگشا می‌باشد.

بررسی‌های نویسندگان در [۵] نشان می‌دهد که علت سوختن برق‌گیرهای مربوط به شرکت برق UPPCO^۲ واقع در ایالت میشیگان آمریکا پدیده فرورزونانس بوده است که به واسطه تغذیه مشتری‌ها با ترانسفورماتورهای تک‌فاز خط به خط (بدون سیم نول) که در کنار سایر عوامل یک پیکربندی مستعد فرورزونانس می‌باشد، رخ داده است. این مقاله برای جلوگیری از وقوع فرورزونانس و سوختن برق‌گیرها پیشنهاد می‌دهد که کلیدها، فیوزها و ریکلوزرهای تک‌فاز با کلیدها، فیوزها و ریکلوزرهای سه‌فاز جایگزین گردند.

مرجع [۶] علاوه بر منشأ خرابی‌های شناخته‌شده برق‌گیر (مانند اصابت مستقیم یا نزدیک صاعقه به محل برق‌گیر)، عامل دیگری را برای خرابی برق‌گیرها مطرح نموده است. این مقاله نشان می‌دهد که وقتی سازه مشترکین برق، مورد برخورد صاعقه قرار می‌گیرد، بخشی از جریان‌های صاعقه وارد خطوط توزیع شده (جریان برگشت صاعقه) و موجب خرابی برق‌گیرها می‌شود. این مقاله جریان برگشت صاعقه را به صورت تحلیلی و عملی بررسی می‌نماید و شواهدی برای منتسب کردن برخی از خرابی برق‌گیرها به آن ارائه می‌کند. در منطقه نمونه بررسی‌شده (ژاپن) تقریباً نیمی از خرابی برق‌گیرها به واسطه جریان‌های برگشتی صاعقه بوده است. در حضور DG^۳ در سیستم‌های توزیع و در شرایط کم‌باری شبکه، وقوع خطای دائم فاز به زمین در سمت فشارمتوسط ترانسفورماتورهای Dy می‌تواند منجر به اضافه ولتاژ موقت فرکانس خط در فازهای سالم و سوختن برق‌گیر فازهای مذکور شود. در [۷]، روشی مبتنی بر امپدانس معادل تونن برای مدل‌سازی شبکه و تخمین دامنه اضافه ولتاژ فازهای سالم در سمت فشارمتوسط ترانسفورماتورهای Dy ناشی از وقوع خطاهای دائم فاز به زمین در همان سمت ارائه شده که قادر است سطح ظرفیت قابل قبول DG برای نصب در شبکه، پیش از رسیدن به حد آستانه اضافه ولتاژ را تخمین بزند.

تعیین مکان بهینه برق‌گیرها به منظور دستیابی به یک حفاظت مطلوب در برابر صاعقه (با تمرکز بر مشخصات موجی برق‌گیر) نیز مورد توجه محققین بوده است. در این راستا در [۸]، مکان‌یابی بهینه برق‌گیرها برای یک شبکه قدرت بر مبنای تحلیل آماری از صاعقه و تکنیک‌های ریاضی برای دستیابی به حداقل ریسک شکست^۴ ارائه گردیده و ریسک به صورت

5. Disruptive Discharge
6. Alternative Transient Program
7. Alternative Transient Program Draw
8. Shield
9. Electromagnetic Transients Program

1. Silicon Carbide Arresters
2. Upper Peninsula Power Company
3. Distributed Generation
4. Failure Risk

می‌گیرد و بر اساس نتایج حاصل و با توجه به شرایط منطقه، مشخصات برق‌گیر مناسب برای منطقه مورد مطالعه (به غیر از کلاس تخلیه) محاسبه و با مشخصات برق‌گیرهای موجود مقایسه می‌شود. ذکر این نکته لازم است که محاسبه کلاس تخلیه برق‌گیر نیازمند محاسبه قابلیت جذب انرژی توسط برق‌گیر است که با مطالعات حالت گذرا تعیین می‌شود و وابسته به مشخصات شبکه، ولتاژ موجی و اطلاع از ولتاژ پسماند برق‌گیر است که بر اساس اطلاعات سازنده برق‌گیر مشخص می‌شود [۳]. با توجه به این که دامنه اضافه ولتاژهای گذرای کلیدزنی و احتمال بروز آنها در ولتاژهای نامی پایین (مانند شبکه توزیع) بسیار محدود است و برای شبکه خطرآفرین محسوب نمی‌شود [۱۷]، مطالعات حالت گذرا برای صاعقه انجام می‌شود. لذا به منظور ارزیابی عملکرد برق‌گیرهای موجود در قبال اضافه ولتاژهای موجی ناشی از صاعقه، شبکه مورد مطالعه با در نظر گرفتن مشخصات برق‌گیرهای فعلی در محیط نرم‌افزار EMTP۴.۰ [۱۸] مدل‌سازی می‌گردد. با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف برای مقاومت زمین برق‌گیرها (مطابق با واقعیت‌های منطقه مورد مطالعه) تغییرات انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیرها با تغییر میزان مقاومت زمین ارزیابی و تحلیل می‌شود و نتایج حاصل با نتایج واقعی دریافت‌شده در شبکه در نتیجه کاهش عملی مقاومت زمین تعدادی از برق‌گیرها مقایسه می‌شود. به علاوه با افزودن تعدادی برق‌گیر به شبکه مورد مطالعه، تغییرات جذب انرژی برق‌گیرها با تحلیل حالت گذرای شبکه، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت بر اساس نتایج حاصل از کلیه مطالعات، تناسب مشخصات برق‌گیرهای فعلی موجود با مشخصات مطلوب، مورد بررسی قرار می‌گیرد و علت‌های معیوب‌شدن برق‌گیرها بیان می‌گردد و اعتبار یافته‌های این تحقیق از طریق مقایسه با رخدادهای میدانی، صحنه‌گذاری و در انتها راهکارهای رفع مشکل ارائه می‌شود.

ترتیب ادامه مقاله به این صورت می‌باشد: در بخش دوم شبکه مورد مطالعه معرفی گردیده است. در بخش سوم مطالعات حالت دایم شبکه شامل پخش بار و اتصال کوتاه انجام شده است. بر اساس نتایج حاصل در بخش چهارم، مشخصات مناسب برای برق‌گیرها جهت به کارگیری در منطقه مورد مطالعه، تعیین و علت سوختن برق‌گیرها در دوره گرم سال تشریح شده است. در بخش پنجم مطالعات حالت گذرای شبکه مورد مطالعه با تمرکز بر قابلیت جذب انرژی برق‌گیرها در برابر اضافه ولتاژهای موجی ناشی از صاعقه ارائه گردیده و همچنین علت اصلی سوختن برق‌گیرها در دوره معتدل بررسی شده است. در بخش ششم راهکارهایی جهت جلوگیری از سوختن برق‌گیرها و در انتها نتیجه‌گیری کلی مقاله در بخش هفتم ارائه شده است.

۲- معرفی شبکه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه توسط دو فیدر شعاعی ۳۳ kV منشعب از یک پست برق ۱۳۲/۳۳ kV تغذیه می‌شود. شکل ۲، دیاگرام تک‌خطی مختصر این شبکه را نشان می‌دهد. در ماه‌های معتدل سال بار کل منطقه مورد مطالعه شامل حوزه‌های شهری و روستایی توسط فیدر شماره ۱ که از ترانسفورماتور T_1 پست برق اصلی منشعب می‌گردد، تغذیه می‌شود. در این شرایط کلیدهای CB.۱ و CB.۲ در وضعیت بسته و کلید CB.۳ در وضعیت باز قرار دارد. طول انشعاب اصلی فیدر شماره ۱ حدود ۱۰۰ کیلومتر و طول کل این فیدر شامل انشعاب اصلی و انشعابات فرعی آن حدود ۳۳۰ کیلومتر می‌باشد. در ماه‌های گرم سال بار حوزه روستایی از فیدر شماره ۱ جدا گشته و به فیدر شماره ۲ که از ترانسفورماتور T_2 پست برق اصلی منشعب می‌گردد، انتقال می‌یابد. در این شرایط کلیدهای CB.۲

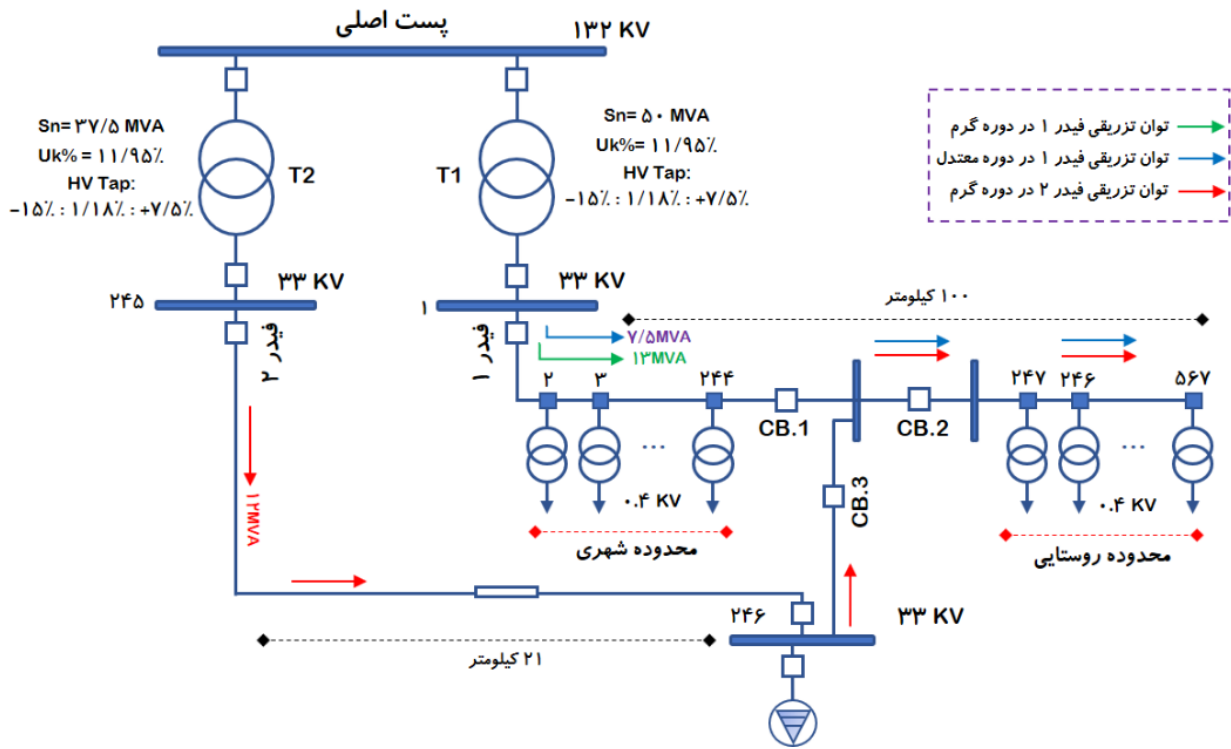


شکل ۱: دو نمونه برق‌گیر معیوب با علامت قوس روی بدنه برق‌گیر.

۱-۲ شرح مسأله

شهرستان ایذه در شمال استان خوزستان واقع در جنوب غربی کشور ایران، یک منطقه کوهستانی با هوای پاک است که شامل دو بخش شهری و روستایی می‌باشد. شبکه توزیع برق بخش روستایی به همراه قسمت محدودی از حوزه شهری این شهرستان به عنوان شبکه مورد مطالعه در این مقاله مورد ارزیابی قرار گرفته است. آب و هوای این منطقه به دو دوره گرم (اردیبهشت تا آبان) و معتدل (مابقی ایام سال) تقسیم می‌شود. بررسی‌های آماری برای شبکه مذکور نشان می‌دهد که برق‌گیرها در هر دو دوره گرم و معتدل معیوب می‌شوند. البته تعداد موارد معیوب‌شدن برق‌گیرها در دوره گرم نسبت به دوره معتدل بسیار کمتر است. علاوه بر این در دوره گرم، برق‌گیرها در حوزه شهری می‌سوزند و در دوره معتدل، غالباً برق‌گیرسوزی در حوزه روستایی رخ می‌دهد. همچنین در حوزه روستایی آمار سوختن برق‌گیرها در محدوده‌های انتهایی شبکه بیشتر از حوزه‌های میانی است. تا پیش از این تحقیق، نامطلوب بودن مقاومت سیستم زمین به عنوان علت سوختن برق‌گیرها در میان بهره‌برداران این شبکه مطرح بوده است. لیکن بررسی دقیق‌تر برق‌گیرهای معیوب نشان می‌دهد که آثار سوختگی در آنها متفاوت می‌باشد. به عنوان نمونه، بررسی بعضی از برق‌گیرهای معیوب در حوزه روستایی نشان می‌دهد که آثار قوس روی مقره آنها وجود دارد و در برخی از مواقع با ترکیدن برق‌گیر نیز همراه بوده است (شکل ۱). همین بررسی در مورد تعدادی از برق‌گیرهای معیوب حوزه شهری، نشان می‌دهد که تنها سرپوش بالایی برق‌گیر (محل اتصال به فاز) متورم شده و معمولاً علامت دیگری روی بدنه آنها وجود ندارد. بنابراین به نظر می‌رسد سوختن همه برق‌گیرها در منطقه مورد مطالعه، نمی‌تواند ناشی از یک عامل باشد.

در این مقاله، به منظور یافتن علت سوختن برق‌گیرها، تطابق مشخصات حوزه فرکانس نامی (۵۰ هرتز) برق‌گیرها با شرایط بهره‌برداری حالت دایم شبکه و همچنین مشخصات ناحیه موجی آنها با شرایط بهره‌برداری حالت گذرای شبکه مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. رفتار حالت دایم شبکه با استفاده از نرم‌افزار ETAP۱۲.۶ [۱۶] مورد مطالعه قرار



شکل ۲: دیاگرام تک خطی شبکه مورد مطالعه.

توان ثابت و امیدانس ثابت، بر اساس اطلاعات بارگیری ترانسفورماتورهای توزیع که در دوره پیک بار شبکه انجام می‌شود، در نظر گرفته شده است. با توصیه دفتر نظارت بر بهره‌برداری شرکت توزیع برق خوزستان، اندازه هر بار در دوره معتدل، ثلث مقدار آن در دوره گرم در نظر گرفته شده است. ترانسفورماتورهای توزیع با نسبت تبدیل ۳۳/۰/۴ کیلوولت، دارای ۵ پله تیپ در اولیه با قابلیت +۱۰٪ تنظیم ولتاژ هستند. امیدانس درصد ترانسفورماتورهای توزیع ۴٪ و نسبت راکتانس به مقاومت آنها ۲/۴۷ می‌باشد. منحنی مغناطیس‌کنندگی ترانسفورماتورها به صورت رابطه جریان-شار مدل شده است. ارتفاع پایه‌های شبکه فشار متوسط منطقه ۱۲ متر است. بخش عمده‌ای از خط توزیع دارای طرح ۱۰۱ است که در آن هر سه فاز هم‌سطح هستند و فاصله هر دو فاز مجاور ۱۲۰ سانتی‌متر است. جنس هادی‌های شبکه در بخش‌های مختلف متفاوت است و شامل هادی‌های فاکس^۲، داگ^۳، هاین^۴، لینت^۵، لینکس^۶ و مینک^۷ می‌باشد که جزئیات مشخصات آنها در کاتالوگ‌های سازندگان موجود است.

۳- مطالعات حالت دایم شبکه مورد مطالعه

به منظور تعیین ویژگی‌های بهره‌برداری حالت دایم شبکه مورد مطالعه، لازم است مطالعات این حوزه شامل مطالعات پخش بار با هدف تعیین حداکثر اضافه ولتاژهای بلندمدت فرکانس ۵۰ هرتز شبکه تحت شرایط مختلف بهره‌برداری و مطالعات اتصال کوتاه با هدف تعیین حداکثر اضافه ولتاژهای موقت فرکانس ۵۰ هرتز در نتیجه وقوع اتصال کوتاه‌های فاز به زمین صورت گیرد. بر این اساس شبکه مورد مطالعه در نرم‌افزار

و CB.۳ در وضعیت بسته و کلید CB.۱ در وضعیت باز قرار دارند. شایان ذکر است که تمامی ترانسفورماتورهای توزیع در این منطقه دارای اتصال DYN با نسبت تبدیل ۳۳/۰/۴ KV هستند و بر روی همه آنها یک دسته^۱ برق‌گیر اکسید روی نصب شده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت‌گرفته، مقاومت ویژه خاک در نقاط مختلف منطقه مورد مطالعه بین $43 \Omega m$ تا $400 \Omega m$ متغیر می‌باشد. همچنین اندازه‌گیری‌های تصادفی انجام‌شده نشان می‌دهد که مقاومت سیستم زمین ترانسفورماتورها و برق‌گیرها در منطقه مورد مطالعه بین 0.46Ω تا 26Ω متغیر است، اگرچه احتمال وجود مقادیر بیشتر برای مقاومت سیستم زمین نیز وجود دارد. منطقه مورد مطالعه (به ویژه در حوزه روستایی) یک منطقه صاعقه‌خیز با عدد ایزوکرونیک ۱۰ است [۱۹]. شایان ذکر است که در منطقه مورد مطالعه، اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین دمای هوا در ماه‌های دوره معتدل و گرم سال (حدود $35^\circ C$) وجود دارد که این مسأله منجر به افزایش چشم‌گیر میزان مصرف انرژی الکتریکی در ماه‌های گرم نسبت به ماه‌های معتدل می‌گردد. علت عمده این افزایش مصرف، در مدارآمدن سیستم‌های سرمایشی با انرژی مصرفی بالا در ماه‌های گرم سال می‌باشد. مقایسه پیک بار فیدر شماره ۱ در ماه‌های معتدل سال که حدود $7/5 MVA$ است با پیک بار این فیدر در ماه‌های گرم سال که در حدود $13 MVA$ است (علی‌رغم انتقال بار حوزه روستایی به فیدر شماره ۲)، به خوبی افزایش مصرف انرژی مذکور را نشان می‌دهد. شایان ذکر است که پیک بار فیدر شماره ۲ در ماه‌های گرم سال نیز حدود $12 MVA$ می‌باشد. جریان اتصال کوتاه سه‌فاز و تک‌فاز در شینه ۱۳۲ KV ایستگاه به ترتیب معادل $6185 kA$ و $4145 kA$ بوده و نسبت راکتانس به مقاومت توالی مثبت معادل شبکه بالادست از محل شینه ۱۳۲ KV ایستگاه معادل ۶ و نسبت راکتانس به مقاومت توالی صفر از محل این شین $4/268$ می‌باشد. پیک بار گرهِای شبکه برای دوره گرم، به صورت ترکیبی از مؤلفه‌های

2. Fox
3. Dog
4. Hyena
5. Linnet
6. Lynx
7. Mink

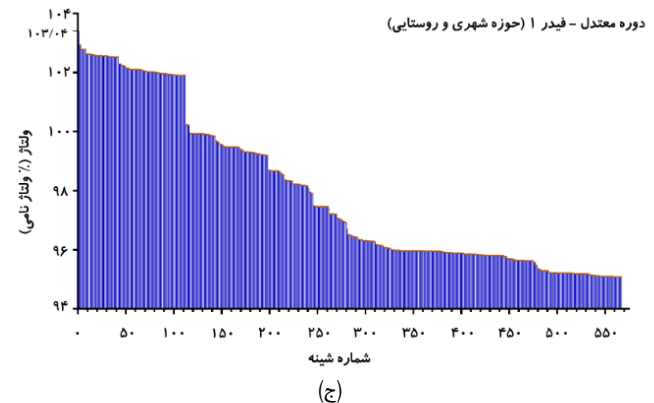
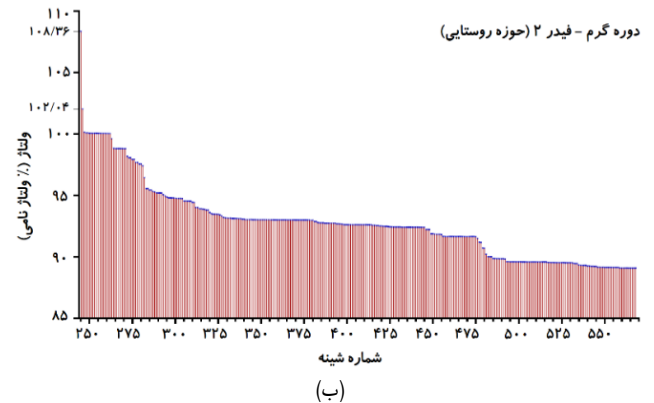
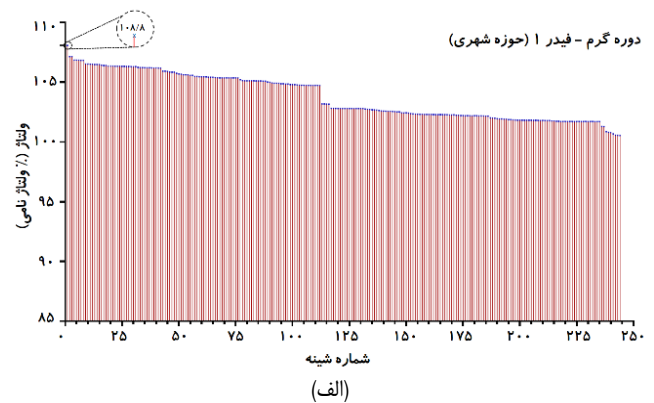
این فیدر که حدود ۱۲ MVA است و افت ولتاژی که در طول حدوداً ۲۱ کیلومتری این فیدر از پست اصلی تا محل کلید ۲. CB وجود دارد، ولتاژ فشارمتوسط در ابتدای منطقه روستایی (شینه شماره ۲۴۷) به حدود ۱/۰۲ پریونیت رسیده است.

علاوه بر این به دلیل وجود انشعابات متعدد در حوزه روستایی، افت ولتاژ در انتهای انشعابات تغذیه شونده توسط فیدر شماره ۲، به حدود ۱۰٪ نیز رسیده است (یعنی دامنه ولتاژ فشارمتوسط در این مناطق به کمتر از ۹۵٪ رسیده است). البته باید گفت با تنظیم تپ ترانسفورماتورهای توزیع در نرم افزار در بالاترین مقدار ممکن، ولتاژ تحویلی به مصرف کنندگان (ولتاژ در سمت فشارضعیف ترانسفورماتورها) حدود ۰/۹۸ پریونیت است که از نظر بهره برداری قابل قبول می باشد.

در دوره معتدل، همان طور که قبلاً بیان گردید، کل بار منطقه مورد مطالعه از طریق فیدر شماره ۱ تغذیه می شود. در این دوره تپ ترانسفورماتور T_1 روی پله ۷ تنظیم می گردد. بررسی شکل ۳-ج نشان می دهد که ولتاژ در شینه ۳۳ کیلوولت پست اصلی حدود ۱/۰۳ پریونیت است و با فاصله گرفتن از پست اصلی، ولتاژ فشارمتوسط در طول خط افت می کند، لیکن حداقل مقدار ولتاژ در نقاط انتهایی انشعابات فیدر شماره ۱ به حدود ۰/۹۵ پریونیت می رسد. به طور خلاصه می توان گفت که شبکه مورد مطالعه در دوره معتدل بر خلاف دوره گرم، با اضافه ولتاژ یا کاهش ولتاژ غیر متعارفی در حالت دایم مواجه نیست. اندازه گیری های میدانی نیز این نتیجه را تأیید می نماید.

۳-۲ مطالعات اتصال کوتاه

در شبکه های توزیع خطاهای اتصال کوتاه می توانند در سمت فشارضعیف و یا در سمت فشارمتوسط ترانسفورماتورها رخ دهند. در شبکه مورد مطالعه به علت ساختار شعاعی شبکه و نوع اتصال ترانسفورماتورهای توزیع که همگی Dyn هستند، وقوع اتصال کوتاه در سمت فشارضعیف ترانسفورماتورها منجر به ایجاد اضافه ولتاژهای موقت فرکانس ۵۰ هرتز در سمت فشارمتوسط ترانسفورماتورها نمی شود. از طرفی با توجه به این که در شبکه مورد مطالعه، برق گیرها در سمت فشارمتوسط ترانسفورماتورها قرار دارند، ارزیابی اثر وقوع اتصال کوتاه در سمت فشارضعیف ترانسفورماتورها از موضوع بحث خارج می گردد و لذا در ادامه تنها اثر وقوع اتصال کوتاه تک فاز به زمین در سمت شبکه فشارمتوسط و افزایش ولتاژ فازهای سالم در نتیجه آن ارزیابی شده است. شایان ذکر است که با توجه به ساختار شعاعی شبکه مورد مطالعه، در خطاهای تک فاز به زمین واقع شده در سمت فشارمتوسط، مسیر جریان خطا از طریق اتصال نوترال ترانسفورماتور پست اصلی بسته می شود. از طرفی با توجه به این که زمین منطقه مورد مطالعه سنگلاخی بوده و مقاومت ویژه خاک در این منطقه در محدوده ۴۳ تا ۴۰۰ اهم متر قرار دارد، لازم است اثر مقاومت زمین در مطالعات اتصال کوتاه در نظر گرفته شود. برای این منظور فرض می شود در نقاط نزدیک به پست اصلی و حوزه شهری اتصال کوتاه های تک فاز به زمین از طریق یک مقاومت ۱۰ اهم رخ می دهند و برای نقاط انتهایی خط، اتصال کوتاه های فاز به زمین از طریق یک مقاومت ۲۰ اهم رخ می دهند. قابل ذکر است که این فرض دور از واقعیت نیست و با توجه به نوع خاک منطقه و با فاصله گرفتن از پست اصلی و به ویژه در مناطق کوهستانی، مقدار مقاومت مسیر خطا ممکن است به بیشتر از این مقدار نیز برسد. در ادامه مطابق با شکل ۴، سه نقطه A، B و C (متناظر با شین های نمونه ۱۵، ۲۱۰ و ۵۴۰ در شبکه مورد مطالعه) به ترتیب در ابتدا، میانه و انتهای شبکه فشارمتوسط به عنوان محل های وقوع اتصال کوتاه



شکل ۳: پروفیل ولتاژ، (الف) فیدر شماره ۱ (حوزه شهری)، (ب) فیدر شماره ۲ (حوزه روستایی) در روز نمونه گرم سال و (ج) فیدر شماره ۱ (حوزه شهری و روستایی) در روز نمونه معتدل سال.

ETAP۱۲.۶ مدل سازی شده و مطالعات پخش بار و اتصال کوتاه انجام گرفته که نتایج آن در ادامه ارائه گردیده است.

۳-۱ مطالعات پخش بار

مطالعات پخش بار برای یک روز نمونه دوره گرم و یک روز نمونه دوره معتدل انجام گرفته و پروفیل ولتاژ فیدرهای شبکه مورد مطالعه برای این دو روز نمونه در شکل ۳ نشان داده شده است.

شایان ذکر است که در دوره گرم تپ ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 پست اصلی روی پله ۱۳ تنظیم می شود. همان طور که در شکل ۳-الف نشان داده شده است، افزایش ولتاژ فشارمتوسط در حوزه ابتدایی فیدر شماره ۱ حدود ۹٪ می باشد، ولی با توجه به این که بار ۱۳ MVA در طول این فیدر توزیع شده است، با فاصله گرفتن از ایستگاه، ولتاژ فشارمتوسط افت می کند به گونه ای که در انتهای انشعابات این فیدر، مقدار ولتاژ در حدود مقدار نامی قرار گرفته است. بررسی شکل ۳-ب نیز نشان می دهد که ولتاژ شینه ابتدایی فیدر شماره ۲ یعنی شینه ۳۳ کیلوولت پست حدود ۹٪ نسبت به مقدار نامی بالاتر است. لیکن به دلیل بار بالای

جدول ۱: افزایش ولتاژ شینه‌های فشار متوسط در اثر وقوع خطای تک‌فاز به زمین.

محل وقوع خطا	ولتاژ شینه‌های انتخابی (%)					
	دوره گرم			دوره معتدل		
	A	B	C	A	B	C
نقطه A	۱۱۵	۱۱۸	*	۱۱۵	۱۱۸	۱۱۹
نقطه B	۱۰۵	۱۵۶	*	۱۰۵	۱۵۶	۱۵۶
نقطه C	*	*	*	۱۵۱	۱۲۸	۱۵۲

* با توجه به این که در دوره گرم، حوزه‌های شهری و روستایی از طریق دو فیدر مجزا تغذیه می‌شوند، وقوع اتصال کوتاه در یک فیدر تأثیری بر ولتاژ شینه‌های فیدر دیگر ندارد.

جدول ۲: مقایسه مشخصات پیشنهادی برای برق‌گیر اکسید روی در منطقه مورد مطالعه و مشخصات برق‌گیرهای موجود.

مشخصه	برق‌گیرهای موجود	برق‌گیرهای پیشنهادی
حداکثر ولتاژ کار دائم	۲۷ kV و ۲۸٫۸ kV	۲۲ kV
ولتاژ نامی	۳۶ kV	در نزدیکی پست اصلی: ۳۳ kV در سایر نقاط: ۳۱٫۲ kV
فاصله خزشی مقرر	۱٫۱۲۵ m	۰٫۵۸۰۸ m
جریان تخلیه نامی	۱۰ kA	۱۰ kA
سطح محافظت برق‌گیر	۱۰۳ kV	< ۱۰۳٫۵۷ kV
کلاس تخلیه برق‌گیر	۲٫۵ kJ/kV	-

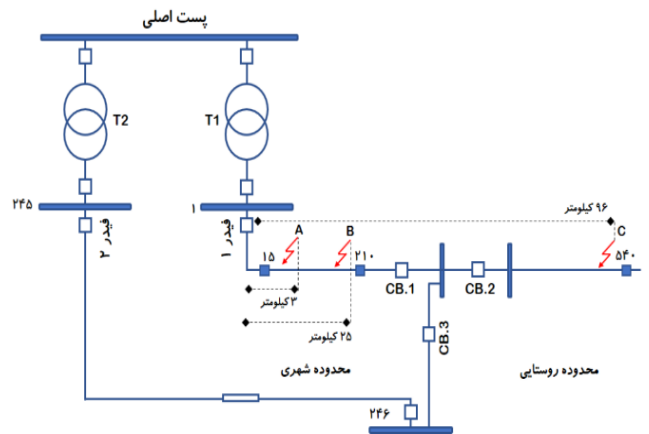
نتایج محاسبات پخش بار و اتصال کوتاه شبکه مورد مطالعه و اطلاعات کلی منطقه، مشخصات (به جز کلاس تخلیه که وابسته به اطلاعات اضافه‌تری است) برق‌گیر مناسب جهت به کارگیری در شبکه مذکور تعیین شده است. در جدول ۲ نیز مقایسه‌ای بین مشخصات برق‌گیرهای موجود و مشخصات برق‌گیرهای پیشنهادی صورت گرفته است.

حداکثر ولتاژ کار دائم برق‌گیر (U_{MCOV}) باید بزرگ‌تر از اضافه ولتاژهای موقت بلندمدت شبکه (COV) انتخاب شود. در شبکه‌های توزیع، COV ها عموماً متناظر با حالت کم‌باری شبکه بوده که در نتیجه کاهش مصرف توان راکتیو و برگشت توان خازن‌های محلی به شبکه بالادست می‌باشد. در یک شبکه توزیع، COV از (۱) به دست می‌آید

$$COV = 1.05 \times \frac{V_{max}}{\sqrt{3}} \quad (1)$$

که در این رابطه V_{max} حداکثر ولتاژ خط شبکه در محل نصب برق‌گیر است و ضریب ۱٫۰۵ برای منظورکردن اثر تنظیم ولتاژ توسط ترانسفورماتورها در نظر گرفته می‌شود [۳]. در شبکه مورد مطالعه با توجه به این که در دوره گرم تپ ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 پست اصلی روی پله ۱۳ تنظیم می‌شود، در بخش‌های ابتدای فیدهای ۱ و ۲ بیشینه ولتاژ خط تقریباً به ۱٫۰۹ پریونیت (۳۶ kV) می‌رسد. لیکن در دوره معتدل، همان طور که پیشتر بیان شد، شبکه با اضافه ولتاژ نامتعرفی مواجه نیست و بنابراین COV شبکه متناظر با دوره گرم و برابر با ۲۲ کیلوولت ($1.05 \times 36 / \sqrt{3}$) خواهد بود.

ولتاژ نامی (U_{rated}) برق‌گیرها باید از اضافه ولتاژهای موقت کوتاه‌مدت شبکه (TOV) که ناشی از افزایش ولتاژ فازهای سالم شبکه در نتیجه وقوع اتصال کوتاه‌های فاز به زمین است بزرگ‌تر باشد. TOV در یک سیستم به نحوه زمین‌شدن آن سیستم و نسبت X_1/R_1 و X_2/R_2 شبکه در محل برق‌گیرها بستگی دارد و از (۲) محاسبه می‌شود



شکل ۴: محل وقوع خطاهای اتصال کوتاه در شبکه فشار متوسط.

تک‌فاز به زمین انتخاب شده‌اند و افزایش ولتاژ فازهای سالم در این شینه‌ها محاسبه گردیده که نتایج آن در جدول ۱ نشان داده شده است. شایان ذکر است، از آنجا که هادی‌های فازها به صورت افقی قرار دارند، فاصله بین فازهای کناری بیشتر از فاصله بین آنها و فاز وسط است و لذا اندکی تفاوت در امپدانس متقابل بین فازها وجود دارد. این موضوع باعث می‌شود که تفاوت جزئی بین اندازه ولتاژ فازهای سالم وجود داشته باشد. مقادیر نشان داده شده در جدول، مربوط به فاز با بیشترین مقدار افزایش ولتاژ هستند.

در اینجا نکته قابل توجه این است که بارهای شبکه، ترکیبی از مؤلفه‌های توان ثابت و امپدانس ثابت هستند. وقتی اتصال کوتاه رخ می‌دهد، بخش توان ثابت (که همان بارهای موتوری هستند)، جریان راکتیو را به سمت نقطه خط ارسال می‌کند. با توجه به انشعابات متعدد در شبکه مورد مطالعه و گستردگی آن، این حالت معادل این است که منابع تزریق توان راکتیو در شبکه گسترده هستند و جریان راکتیو را به سمت محل اتصال کوتاه جاری می‌کنند. لذا مشاهده می‌شود که برای مثال وقتی اتصال کوتاه تک‌فاز به زمین در نقطه A رخ داده است، ولتاژ فازهای سالم نقاط انتهایی از ولتاژ نقاط ابتدایی بیشتر شده است. به علاوه همچنان که ملاحظه می‌گردد، با توجه به مشخصات زمین منطقه، ساختار شبکه و ترکیب بارهای شبکه، اگر خط در میانه خط (در حوزه شهری) رخ دهد، درصد افزایش ولتاژ فازهای سالم قابل توجه است. با توجه به این که در دوره گرم به خودی خود ولتاژهای بهره‌بردار این حوزه در اثر بالابردن تپ ترانسفورماتورهای T_1 و T_2 پست اصلی بالا می‌باشد، بررسی دقیق اثرات این موضوع بر عملکرد برق‌گیرهای منطقه حایز اهمیت است.

۴- تعیین مشخصات برق‌گیر برای شبکه مورد مطالعه و مقایسه با برق‌گیرهای موجود

شش مشخصه اصلی برق‌گیرها شامل حداکثر ولتاژ کار دائم (U_{MCOV})، ولتاژ نامی (U_{rated})، فاصله خزشی مقرر، جریان تخلیه نامی، سطح حفاظت برق‌گیر و کلاس تخلیه برق‌گیر هستند [۳] که باید متناسب با ساختار و ویژگی‌های شبکه تعیین شوند. سه کمیت اول مربوط به مشخصات حوزه فرکانس نامی (۵۰ هرتز) برق‌گیر و سه کمیت دیگر مربوط مشخصات ناحیه موجی آن می‌باشند. در ادامه ملاحظات کلی شش مشخصه اصلی برق‌گیرها به طور خلاصه بیان شده و همچنین بر اساس

1. Maximum Contiguous over Voltage
2. Rated Voltage

$$PM = \frac{BIL - V_p}{V_p} \times 100 \quad (4)$$

در شبکه مورد مطالعه برای ایجاد حاشیه حفاظت ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصدی برای ایزولاسیون داخلی به ترتیب به برق گیرهایی با سطح محافظت کوچکتر از ۱۲۰/۸۳، ۱۱۱/۵۳ و ۱۰۳/۵۷ کیلوولت نیاز است.

کلاس تخلیه برق گیر با محاسبه قابلیت جذب انرژی توسط برق گیر برآورد می شود که این مهم نه تنها وابسته به مشخصات شبکه و ولتاژهای موجی است، بلکه مستلزم اطلاع از ولتاژ پسماند (باقیمانده) برق گیر است که بر اساس اطلاعات سازنده برق گیر تعیین می شود [۳] و لذا در این مرحله قابل محاسبه نیست. از آنجا که هدف کلی، بررسی تناسب برق گیرهای موجود با مشخصات و شرایط شبکه است، ارزیابی کفایت کلاس تخلیه برق گیرهای موجود با بررسی قابلیت جذب انرژی این برق گیرها با شبیه سازی حالت گذرای شبکه تحت سناریوهای مختلف در بخش های بعد صورت می پذیرد.

با توجه به مقایسه صورت گرفته در جدول ۲، ملاحظه می شود که مشخصات برق گیرهای موجود از لحاظ حداکثر ولتاژ کار دائم، ولتاژ نامی، فاصله خزشی، جریان نامی و سطح حفاظت برق گیر با شرایط بهره برداری شبکه تطابق لازم را دارند. نکته قابل توجه این است که مطابق با استاندارد IEC 60099-5، برق گیرها می توانند به مدت ۱۰ ثانیه اضافه ولتاژهای موقت با دامنه برابر با ولتاژ نامی خود (۳۶ kV) در شبکه مورد مطالعه را تحمل نمایند. روشن است در صورتی که اضافه ولتاژهای موقت در شبکه مورد مطالعه کمتر از ۳۶ kV باشند، مدت زمان تحمل اضافه ولتاژها توسط برق گیرها نیز بیشتر می شود. برق گیرهای موجود می توانند اضافه ولتاژهای معادل ۱/۲ برابر حداکثر ولتاژ کار دائم خود را به مدت ۳ ساعت تحمل نمایند.

از آنجا که زمان عملکرد کلیدها و رفع خطا روی شبکه بسیار کمتر از ۱۰ ثانیه است، بنابراین به نظر می رسد برق گیرها می توانند به راحتی اضافه ولتاژهای موقت کوتاه مدت را تحمل نمایند و این اضافه ولتاژها نمی توانند بلافاصله باعث صدمه به برق گیرها شوند. اما توجه به این نکته لازم است که در دوره گرم، حوزه شهری با ۹٪ اضافه ولتاژ دایم فرکانس ۵۰ هرتز مواجه است. تحت این شرایط، وقوع اتصال کوتاه های فاز به زمین متعدد و در فواصل زمانی کم باعث می شود که برق گیرهای حوزه ابتدایی خط، مرتب در معرض اضافه ولتاژهای موقت با دامنه نزدیک به ولتاژ نامی برق گیر قرار گیرند و بدین ترتیب قرص واریستورهای برق گیرها در معرض آسیب جدی واقع شوند. بر اساس آمارهای ثبت شده در دیسپاچینگ شرکت توزیع برق خوزستان در فاصله زمانی ماه های خرداد تا شهریور در سه سال متوالی به ترتیب ۴۰، ۴۳ و ۷۵ مورد خطا روی فیدر شماره ۱ (حوزه شهری) رخ داده و در بعضی از روزها تعداد آنها به ۴ مورد در روز و یا بیشتر هم رسیده است. لذا روشن است که اگرچه در نتیجه وقوع یک اتصال کوتاه در شبکه، برق گیرها بلافاصله معیوب نمی شوند، لیکن تکرار این رخدادها در فواصل زمانی کم، باعث پایین آمدن مقاومت واریستورها و افزایش مؤلفه اهمی جریان نشتی فرکانس ۵۰ هرتز در برق گیرها می شود. نهایتاً این امر باعث افزایش درجه حرارت واریستورها شده و منحنی ولت-آمپر برق گیرها را جابه جا می کند. بدین ترتیب نقطه کار برق گیرها از ناحیه بهره برداری فرکانس ۵۰ هرتز به ناحیه جریان های تخلیه موجی جابه جا می شود. تحت این شرایط حرارت تولید شده افزایش یافته و ممکن است برق گیرها به طور خود به خود یا در اثر وقوع یک خطای فاز به زمین معیوب شوند. به عنوان نمونه در یک روز

$$TOV = K_1 \times K_g \times \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (2)$$

که در این رابطه U_n ولتاژ نامی شبکه و K_1 ضریبی است متناظر با اضافه ولتاژهای ناشی از وضعیت کمباری شبکه و برای شبکه های توزیع، ۱/۰۵ پیش بینی شده است [۳]. اگرچه در شبکه مورد مطالعه با توجه به اضافه ولتاژ حدوداً ۱/۰۹ پریونیتی در نقاط نزدیک به پست اصلی در فصل گرم، K_1 برای این نقاط ۱/۱ و برای سایر نقاط ۱/۰۵ در نظر گرفته می شود. K_g نیز ضریب زمین است و متناظر با افزایش ولتاژ فازهای سالم در اثر وقوع اتصال کوتاه های تک فاز به زمین می باشد. در خصوص شبکه مورد مطالعه با توجه به نتایج جدول ۱، در یک شرایط نزدیک به واقعیت، افزایش ولتاژ فازهای سالم در اثر اتصال کوتاه های تک فاز به زمین در فصل گرم به ۱/۵۶ پریونیت رسیده و حتی ممکن است با بررسی بیشتر، در بعضی از شرایط یا در اثر وقوع اتصال کوتاه در نقاط دیگر شبکه، شاهد افزایش بیشتری در ولتاژ فازهای سالم باشیم. به هر ترتیب، برای تعیین ولتاژ نامی برق گیر در این شبکه، K_g برابر ۱/۵۶ در نظر گرفته می شود. به این ترتیب بیشینه TOV شبکه در نزدیکی پست اصلی ۳۳ کیلوولت ($1,1 \times 1,56 \times 33 / \sqrt{3}$) و در سایر نقاط ۳۱,۲ کیلوولت ($1,05 \times 1,56 \times 33 / \sqrt{3}$) خواهد بود.

فاصله خزشی مقرر (L) با توجه به میزان آلودگی سطحی در محل یا منطقه قرارگیری برق گیرها از طریق (۳) برآورد می شود [۳]

$$L \geq 1,1 \times U_n \times a \quad (3)$$

که a اندازه فاصله سطحی به ازای هر کیلوولت می باشد و استاندارد IEC 60721 برای این کمیت مقادیر ۰,۱۰۲، ۰,۱۰۱۶، ۰,۱۰۲۵ و ۰,۱۰۳۱ بر حسب mm/kV را به ترتیب برای مناطق با میزان آلودگی کم، متوسط، سنگین و خیلی سنگین پیشنهاد داده است [۲۰]. در خصوص شبکه مورد مطالعه با توجه به تمیزی هوای منطقه، این ضریب برابر ۰,۱۰۱۶ در نظر گرفته می شود. به این ترتیب فاصله خزشی مقرر در شبکه مورد مطالعه باید بزرگتر از $1,1 \times 33 \times 0,1016$ یعنی بزرگتر از ۰,۵۸۰۸ m باشد. جریان تخلیه نامی برق گیر بر اساس استاندارد IEC 60099-4 و متناظر با سطح ولتاژ شبکه و همچنین عدد ایزوکرونیک منطقه تعیین می گردد [۲۱]. در شبکه های توزیع معمولاً برای جریان تخلیه نامی برق گیرها مقدار ۵ KA انتخاب می گردد، لیکن در مناطقی با عدد ایزوکرونیک بالا به کارگیری برق گیرهایی با جریان تخلیه نامی ۱۰ kA توصیه شده است [۲۲]. عدد ایزوکرونیک مناطق مختلف کشور ایران از مقادیر کمتر از ۲ تا مقادیر بزرگتر از ۲۰ متغیر می باشد و مقدار آن برای منطقه مورد مطالعه ۱۰ است [۱۹] که مقدار نسبتاً بالایی است. لذا جریان تخلیه ۱۰ kA برای برق گیرهای شبکه مورد مطالعه انتخاب می گردد.

سطح محافظت برق گیر (V_p) با آگاهی از سطح ایزولاسیون پایه (BIL) تجهیزات و حاشیه حفاظت (PM) مورد نیاز قابل محاسبه است. بر اساس استاندارد IEC 60071 سطح ایزولاسیون پایه تجهیزات شبکه ۳۳ kV در برابر اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه برابر ۱۴۵ kV می باشد [۲۳]. البته دامنه ولتاژهای تخلیه جوی باید توسط برق گیر به مقداری کمتر از BIL کاهش یابد تا حاشیه حفاظت لازم برای ایزولاسیون داخلی فراهم شود. در این صورت، سطح محافظت برق گیر که همان ولتاژ باقیمانده برق گیر است از (۴) قابل محاسبه است

1. Basic Insulation Level
2. Present Margin

$$L_1 = 15 \times \frac{d}{n} (\mu H) \quad (8)$$

$$R_1 = 65 \times \frac{d}{n} (\Omega) \quad (9)$$

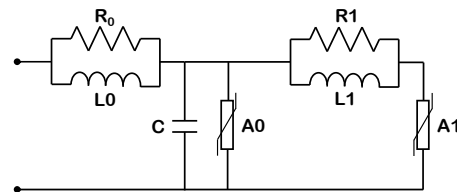
که در این روابط d ارتفاع برق‌گیر بر حسب متر و n تعداد ستون واریستورها می‌باشد. ارتفاع برق‌گیرهای مورد استفاده در شبکه مورد مطالعه، ۳۷ سانتی‌متر و دارای یک ستون واریستور هستند. A_1 و A_2 نیز مقاومت‌های غیر خطی بوده که در نرم‌افزار EMTP به صورت یک منحنی $V-I$ تکه‌ای خطی مدل می‌شوند. جزئیات این روش در [۲۴] ارائه شده است.

مدل‌سازی صاعقه نیز در نرم‌افزار EMTP برای هر جریان ضربه صاعقه به صورت مدل سیگره یعنی اتصال موازی یک منبع جریان با یک مقاومت بزرگ که همان مقاومت معادل امپدانس موجی خط است، انجام می‌پذیرد. از آنجا که علی‌رغم مکاتبه و مراجعه به سازمان هواشناسی استان خوزستان، اطلاعات دامنه و شیب امواج صاعقه در منطقه حاصل نگردید، در این مطالعه، موج صاعقه با دامنه ۳۰ kA، پیشانی موج ۵ μS و دم موج ۲۰۰ μS در نظر گرفته شده است [۲].

۲-۵ بررسی اثر صاعقه بر عملکرد برق‌گیرها

هدف از مطالعات این بخش، ارزیابی عملکرد برق‌گیرهای موجود در شبکه در تخلیه انرژی ناشی از برخورد صاعقه به خط می‌باشد. شایان ذکر است از آنجا که در دوره گرم، وقوع صاعقه متفی است، این مطالعات برای شرایط بهره‌برداری شبکه در دوره معتدل (فصل زمستان) انجام شده است. بدیهی است که بسته به محل برخورد صاعقه به شبکه، برق‌گیرهای شبکه عملکرد متفاوتی خواهند داشت. از آنجا که شبکه مورد مطالعه در گستره وسیعی (حدود ۳۰۰ کیلومتر شبکه توزیع) پراکنده است، تحلیل همه حالت‌های ممکن برخورد صاعقه به خط و تحلیل رفتار همه برق‌گیرها کاری زمان‌بر است. بر اساس مصاحبه‌های انجام‌شده با بهره‌برداران شبکه در منطقه مورد مطالعه و بهره‌گیری از تجربیات آنها و همچنین آمار عملکرد برق‌گیرها از روی شمارنده آنها، مشخص گردید که رعد و برق‌های شدید در مناطق مرتفع‌تر رخ می‌دهد و معمولاً برق‌گیرهای این مناطق دچار آسیب می‌شوند. لذا بدون از دست دادن کلیت موضوع، دو سناریو برای محل برای برخورد صاعقه به شبکه در نظر گرفته شده است. محل برخورد صاعقه در سناریوی اول در حوزه میانی خط، در فاصله ۴۱ کیلومتر مانده به انتهای انشعاب اصلی فیدر و در سناریوی دوم در حوزه انتهایی خط و ۱۰ کیلومتر مانده به انتهای انشعاب اصلی فیدر در نظر گرفته شده است. یادآوری می‌گردد که مقاومت سیستم زمین شبکه مورد مطالعه در رنج وسیعی (از ۰.۴۶ تا ۲۶ اهم) متغیر است. لذا مطالعات حالت گذرا برای مقادیر متفاوتی از مقاومت زمین انجام شده است. لیکن در مقاله، بدون از دست دادن کلیت موضوع و به منظور حفظ اختصار، صرفاً دو مقدار برای مقاومت زمین فرض شده است. در سناریوی اول محل برخورد صاعقه، مقاومت زمین همه برق‌گیرها ۱۰ اهم فرض شده و در سناریوی دوم، مقدار توصیه‌شده بر اساس استاندارد IEC 61۰۲۴ [۲۵] یعنی مقاومت ۵ اهم برای همه برق‌گیرها در نظر گرفته شده است.

با در نظر گرفتن این فرضیات و با تمرکز بر قابلیت جذب انرژی برق‌گیرها، شبیه‌سازی رفتار حالت گذرای شبکه مورد مطالعه صورت گرفته است. به این منظور ۲۰ ترانسفورماتور در مکان‌های مختلف شبکه انتخاب شده و برق‌گیرهای آنها مورد بررسی قرار گرفته است. انتخاب این ترانسفورماتورها که در حوزه میانی و غالباً انتهایی شبکه مورد مطالعه



شکل ۵: مدل الکتریکی IEEE برق‌گیر.

۳ مورد خط در ساعات ۹:۳۵، ۱۴ و ۱۹:۲۰ در حوزه شهری رخ داده و به دنبال آن در ساعت ۱۹:۳۰ برق‌گیر یکی از ترانسفورماتورها (تقریباً در فاصله ۱۲ کیلومتری پست اصلی) معیوب شده و یک اتصال کوتاه دیگر را موجب گردیده است. در ادامه آن نیز در ساعت ۱۹:۵۰ یک برق‌گیر دیگر در طول خط (در حوزه شهری) معیوب شده است. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که روی بدنه برق‌گیرهایی که این گونه معیوب شده‌اند آثار قوس وجود ندارد. در حوزه روستایی، اضافه ولتاژهای دایم فرکانس ۵۰ هرتز در دوره گرم وجود ندارد و معیوب‌شدن برق‌گیرهای حوزه روستایی نیز در دوره گرم گزارش نشده است.

۵- مطالعات حالت گذرای شبکه مورد مطالعه

همچنان که پیش‌تر ذکر گردید، از میان مشخصات مربوط به ناحیه موجی برق‌گیرها، جریان تخلیه نامی و سطح محافظت برق‌گیرهای مورد استفاده مطلوب می‌باشد. بنابراین در این بخش ارزیابی عملکرد برق‌گیرهای موجود در تخلیه انرژی خطوط در اثر اضافه ولتاژهای تخلیه موجی به جهت تطابق کلاس تخلیه آنها با شرایط بهره‌برداری شبکه صورت گرفته است. به این منظور از نرم‌افزار EMTP ۴.۰ که یکی از نرم‌افزارهای کارآمد است که با دقت بسیار بالا قادر به شبیه‌سازی حالات گذرای سیستم الکتریکی می‌باشد، استفاده شده است. از آنجا که اضافه ولتاژهای کلیدزنی در شبکه توزیع قابل توجه نیستند [۱۷]، مدل‌سازی و مطالعات حالت گذرای شبکه برای برخورد صاعقه انجام شده که نتایج آن در ادامه ارائه گردیده است.

۱-۵ مدل اجزای شبکه و امواج ضربه‌ای برای تحلیل‌های حالت گذرا

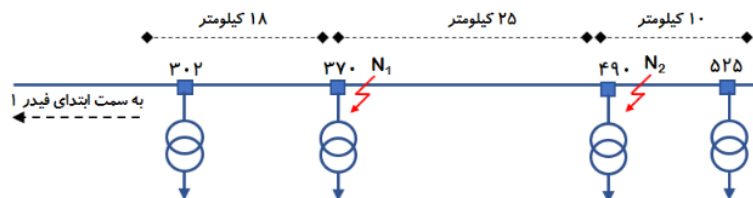
به منظور انجام مطالعات حالت گذرای شبکه مورد مطالعه از مدل‌های حالت گذرای المان‌های موجود در نرم‌افزار EMTP استفاده شده است. برای مدل‌سازی ترانسفورماتورها از مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور و برای خطوط از مدل وابسته به فرکانس^۱ که مناسب برای مطالعات مربوط به امواج سیار می‌باشد استفاده شده و جزئیات این مدل‌ها در راهنمای نرم‌افزار EMTP ارائه گردیده است.

مدل‌سازی برق‌گیرها جهت مطالعات صاعقه نیز بر اساس مدل IEEE [۲۴] و مطابق شکل ۵ صورت گرفته است. پارامترهای مختلف موجود در این مدل توسط (۵) تا (۹) محاسبه می‌شوند

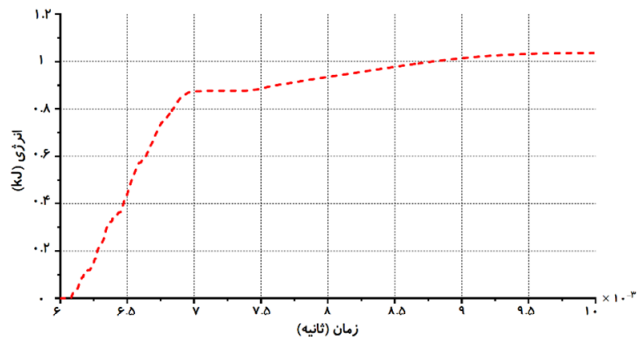
$$L_1 = 0.7 \times \frac{d}{n} (\mu H) \quad (5)$$

$$R_1 = 100 \times \frac{d}{n} (\Omega) \quad (6)$$

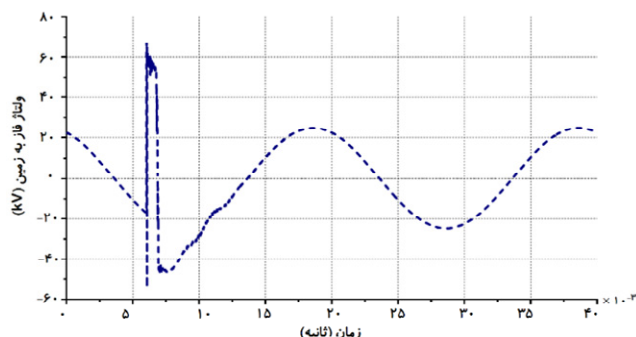
$$C = 100 \times \frac{d}{n} (PF) \quad (7)$$



شکل ۶: موقعیت مکانی محل برخورد صاعقه و ترانسفورماتورهای منتخب.

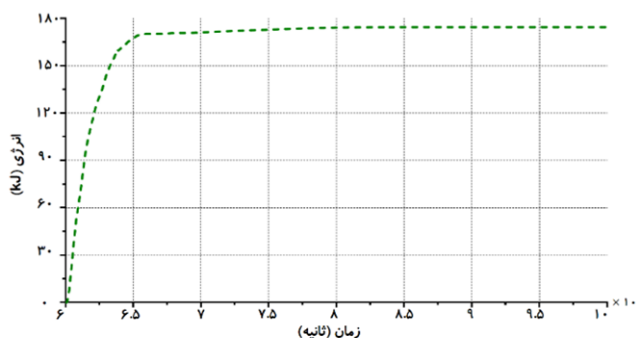


(ب)

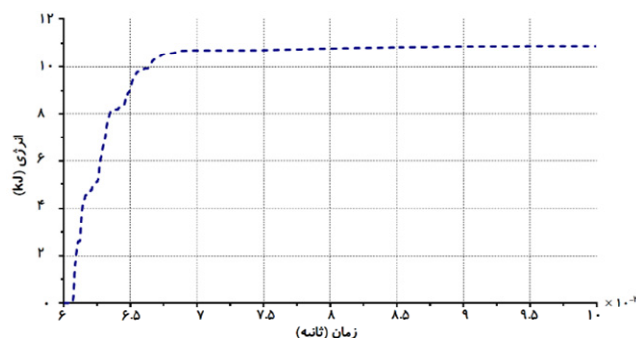


(الف)

شکل ۷: (الف) ولتاژ دو سر برق گیر ترانسفورماتور T_{tr} و (ب) انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتور T_{tr} متناظر با سناریوی اول.



(ب)



(الف)

شکل ۸: انرژی جذب شده توسط برق گیرها متناظر با سناریوی اول، (الف) برق گیر ترانسفورماتور T_{tr} و (ب) برق گیر ترانسفورماتور T_{tr} .

جدول ۳: نتایج شبیه سازی رفتار حالت گذرای برق گیرهای شبکه در سناریوهای اول و دوم.

سناریو	محل برخورد صاعقه	مقاومت زمین برق گیرها	محل اندازه گیری (شماره ترانسفورماتور)	انرژی جذب شده
اول	N_1	10Ω	T_{tr}	۱,۰۳ kJ
			$T_{r,r}$	۱۰,۸ kJ
			T_{tr}	۱۷۴,۴ kJ
دوم	N_r	5Ω	T_{tr}	۴,۸ kJ
			$T_{r,r}$	۷,۵ kJ
			T_{tr}	۲۳۲,۴ kJ

انرژی جذب شده برق گیر نصب شده روی ترانسفورماتور T_{tr} در شکل ۷ و انرژی تخلیه شده توسط برق گیر ترانسفورماتورهای $T_{r,r}$ و T_{tr} در شکل ۸ نشان داده شده است.

بررسی نتایج مطالعات نشان می دهد که با دور شدن از محل برخورد صاعقه به سمت ابتدا و انتهای خط، انرژی جذب شده توسط تعدادی از برق گیرها افزایش می یابد. همچنان که ملاحظه می گردد، انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتور $T_{r,r}$ برابر $10,8 \text{ kJ}$ و انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتور T_{tr} برابر $174,4 \text{ kJ}$ می باشد. علت این امر آن است که شبکه مورد مطالعه به ویژه در محدوده میانی و انتهایی فیدر اصلی، در فواصل متعدد (بین ۶ تا ۱۰ کیلومتر) فاقد هر گونه ترانسفورماتور و در نتیجه فاقد برق گیر می باشد. به علاوه در هر کدام از این فواصل نیز انشعابات متعددی از فیدر اصلی وجود دارند که آنها نیز در فواصل بعضاً ۵

هستند، بر اساس تجربه بهره برداران شبکه و با توجه به معیوب شدن برق گیرهای آن مناطق صورت گرفته است. به منظور جلوگیری از بیان مطالب تکراری در تحلیل های عددی مربوط به شبیه سازی ها برای هر ۲۰ برق گیر، خلاصه نکات قابل توجه حاصل از شبیه سازی ها برای تعدادی از برق گیرها در جدول ۳ نشان داده شده است. شکل ۶ موقعیت مکانی محل برخورد صاعقه و ترانسفورماتورهای انتخاب شده جهت تحلیل انرژی جذب شده توسط برق گیرهای آنها را نمایش می دهد. در این شکل، به منظور حفظ اختصار و سادگی، انشعابات متعدد شبکه و ترانسفورماتورهای آن نمایش داده نشده است.

نتایج بررسی های این مطالعه نشان می دهد که در هر دو سناریو، برق گیرهای زیادی در شبکه اقدام به تخلیه انرژی موج صاعقه می کنند. به عنوان نمونه متناظر با مفروضات سناریوی اول، شکل موج ولتاژ و

و انتهای خط، انرژی جذب شده توسط تعدادی از برق‌گیرها افزایش می‌یابد. همچنان که ملاحظه می‌گردد، انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{575} برابر $7/5$ kJ و انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} برابر $232/4$ kJ می‌باشد. نسبت انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} به ولتاژ نامی آن برابر $6/45$ kJ/kV می‌باشد که بزرگ‌تر از قابلیت جذب انرژی برق‌گیر (یعنی $3/5$ kJ/kV) است، لذا در چنین شرایطی نیز برق‌گیر معیوب خواهد شد.

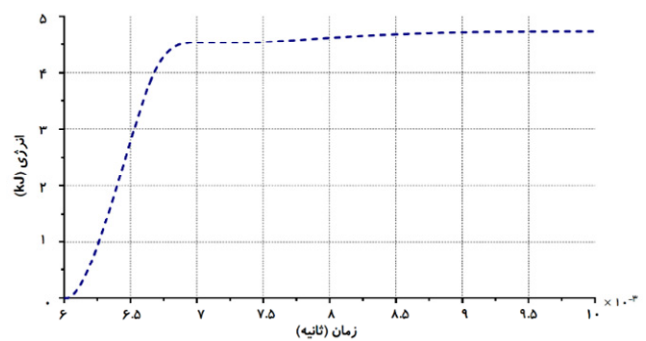
نتایج مطالعات نشان می‌دهد که نه تنها در سناریوی اول که مقدار مقاومت زمین بالا است، تعدادی از برق‌گیرها معیوب می‌شوند، در سناریوی دوم که مطابق با استاندارد IEC 61024، مقاومت زمین برق‌گیرهای منطقه مورد مطالعه به ۵ اهم محدود شده است، نیز امکان سوختن برق‌گیرها در نتیجه جذب بیش از حد انرژی صاعقه وجود دارد. لذا به منظور بررسی بیشتر این موضوع، در ادامه دو مسأله اساسی مورد مطالعه قرار گرفته است. مسأله اول اثر کاهش مقاومت زمین برق‌گیرها و مسأله دوم اثر افزایش تعداد برق‌گیرهای شبکه بر عملکرد برق‌گیرها و جلوگیری از سوختن آنها را مورد ارزیابی قرار می‌دهد.

۲-۱- بررسی تغییر مقاومت زمین برق‌گیرها

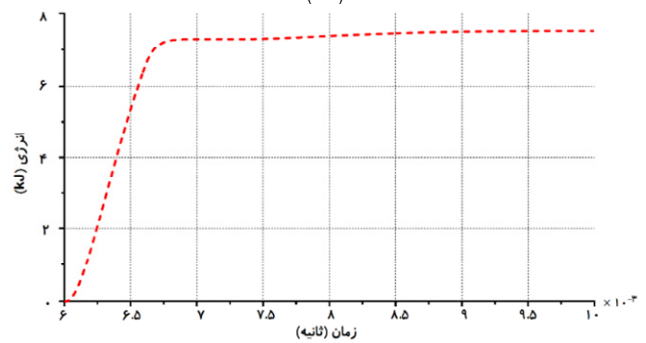
به منظور بررسی تغییر مقاومت زمین برق‌گیرها بر قابلیت جذب انرژی توسط آنها، دو سناریوی مختلف مطابق با جدول ۴ مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج مطالعات متناظر با مفروضات سناریوی سوم نشان می‌دهد که انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} از 1 kJ به $25/4$ kJ افزایش یافته است. در حالی که انرژی جذب شده توسط سایر برق‌گیرها از جمله برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} از $174/4$ kJ به $173/8$ کاهش یافته است. به بیان واضح‌تر وقتی مقاومت زمین یک برق‌گیر کمتر شود، برای یک موج صاعقه معین و محل برخورد معین، این برق‌گیر انرژی بیشتری جذب می‌نماید و سهم سایر برق‌گیرهایی که مقاومت زمین آنها بدون تغییر مانده در جذب انرژی کم می‌شود. به طور مشابه نتایج مطالعات متناظر با مفروضات سناریوی چهارم نشان می‌دهد که انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} از $4/8$ kJ به $1/6$ کاهش یافته است. در حالی که انرژی جذب شده توسط سایر برق‌گیرها از جمله برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} افزایش یافته است. به بیان دیگر، وقتی مقاومت زمین یک برق‌گیر زیاد شود، برای یک موج صاعقه معین و محل برخورد معین، برق‌گیر کمتری جذب می‌نماید و سهم سایر برق‌گیرهایی که مقاومت زمین آنها بدون تغییر مانده در جذب انرژی بیشتر می‌شود. تغییرات مقدار انرژی جذب شده توسط برق‌گیرهای نمونه در سناریوهای سوم و چهارم نسبت به سناریوهای اول و دوم در شکل‌های ۱۰ و ۱۱ نشان داده شده است.

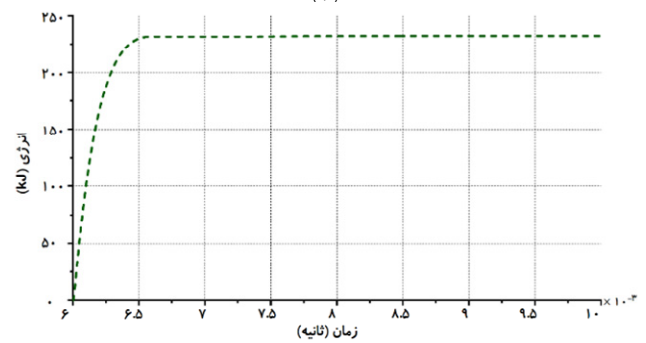
به منظور صحت‌گذاری میدانی نتایج حاصل از مطالعات فوق، ۱۰ عدد ترانسفورماتور از شبکه مورد مطالعه واقع در مناطق کوهستانی با زمین خشک که بر اساس آمارهای موجود در اثر برخورد صاعقه برق‌گیر آنها معیوب نشده بود، انتخاب و مقاومت زمین برق‌گیر آنها به ۳ اهم محدود گردید. اندازه‌گیری‌های صورت گرفته در محل نشان داد که مقاومت زمین سایر برق‌گیرهایی که در محدوده نزدیک به ۱۰ برق‌گیر انتخاب شده قرار داشتند، بین $6/5$ تا 11 اهم متغیر بود. در اولین بارندگی پس از تغییرات مذکور، ۴ عدد از برق‌گیرهای انتخاب شده معیوب گردیدند. این در حالی است که این برق‌گیرها قبلاً هیچ گونه سابقه معیوب شدن نداشته‌اند. این موضوع به وضوح نشان می‌دهد که کاهش مقاومت زمین برق‌گیرها تنها



(الف)



(ب)

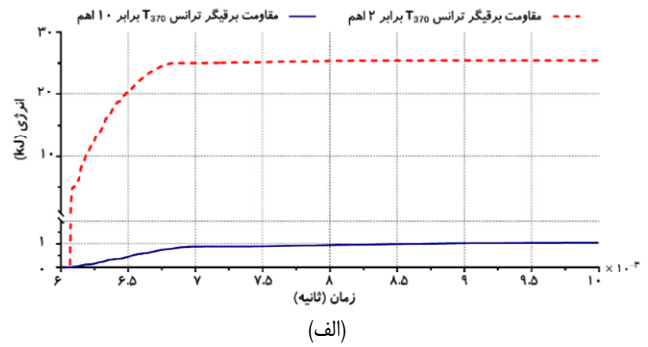
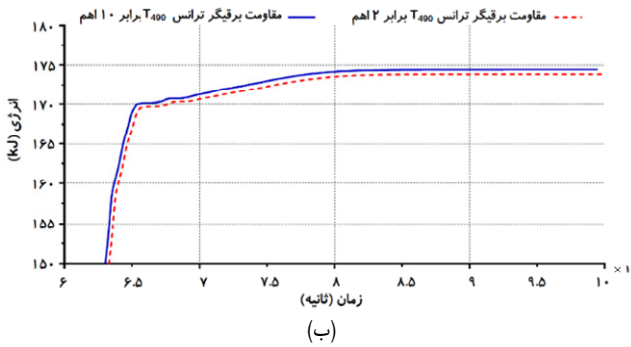


(ج)

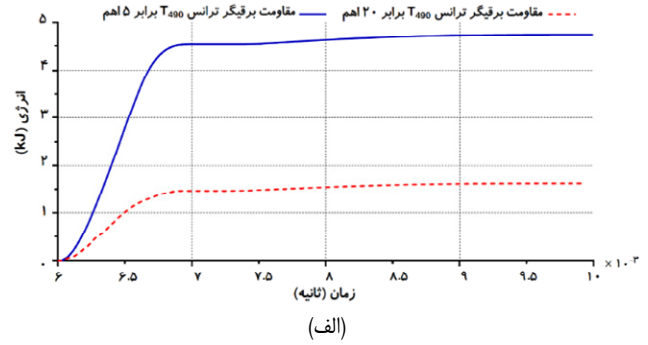
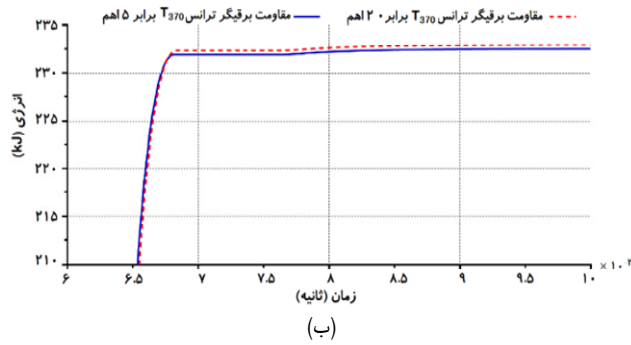
شکل ۹: انرژی جذب شده توسط برق‌گیرها متناظر با سناریوی دوم، (الف) برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} ، (ب) برق‌گیر ترانسفورماتور T_{575} و (ج) برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} .

تا ۱۱ کیلومتری فاقد ترانسفورماتور و برق‌گیر هستند و مجدداً دارای انشعابات متعددی هستند و در هر انشعاب تعداد کمی ترانسفورماتور و برق‌گیر وجود دارد. از آنجا که زمان انتشار موج صاعقه در مقایسه با زمان تخلیه آن کوتاه است و از طرفی شبکه مورد مطالعه دارای انشعابات متعدد در فواصل نسبتاً کوتاه می‌باشد، دامنه موج تخلیه نشده رفت و برگشتی در انشعابات مختلف زیاد می‌شود و انرژی خط که باید توسط برق‌گیرها تخلیه شود افزایش می‌یابد. تحت این شرایط با توجه به ساختار شبکه مورد مطالعه، بعضی از برق‌گیرهایی که فاصله بیشتری از محل برخورد صاعقه دارند، با توجه به موقعیت مکانی خود در شبکه، فرصت بیشتری برای تخلیه موج در اختیار داشته و لذا انرژی جذب شده توسط آنها افزایش می‌یابد. شایان ذکر است با توجه به این که ولتاژ نامی برق‌گیرهای مورد استفاده برابر ۳۶ کیلوولت می‌باشد، نسبت انرژی جذب شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{77} به ولتاژ نامی برق‌گیر برابر $4/8$ kJ/kV می‌باشد که بزرگ‌تر از قابلیت جذب انرژی برق‌گیر (یعنی $3/5$ kJ/kV) است و لذا در چنین شرایطی برق‌گیر معیوب خواهد شد.

متناظر با مفروضات سناریوی دوم نیز انرژی جذب شده توسط برق‌گیرهای T_{77} ، T_{575} و T_{77} در شکل ۹ نشان داده شده است. مطابق با آنچه پیشتر گفته شد، با دور شدن از محل برخورد صاعقه به سمت ابتدا



شکل ۱۰: مقایسه انرژی جذب شده توسط برق گیرها در سناریوهای اول و سوم، (الف) برق گیر ترانسفورماتور T_{370} و (ب) برق گیر ترانسفورماتور T_{490} .



شکل ۱۱: مقایسه انرژی جذب شده توسط برق گیرها در سناریوهای دوم و چهارم، (الف) برق گیر ترانسفورماتور T_{490} و (ب) برق گیر ترانسفورماتور T_{370} .

جدول ۴: نتایج شبیه سازی رفتار حالت گذرای برق گیرهای شبکه در سناریوهای سوم و چهارم.

سناریو	محل برخورد صاعقه	مقاومت زمین برق گیرها	محل اندازه گیری (شماره ترانسفورماتور)	انرژی جذب شده
سوم	N_1	مقاومت زمین برای برق گیر ترانسفورماتور T_{370} ۲ اهم و برای سایر برق گیرهای شبکه ۱۰ اهم فرض شده است.	T_{370}	۲۵,۴ kJ
چهارم	N_2	مقاومت زمین برای برق گیر ترانسفورماتور T_{490} ۲۰ اهم و برای سایر برق گیرهای شبکه ۵ اهم فرض شده است.	T_{490}	۱۷۳,۸ kJ
			T_{370}	۱,۶ kJ
			T_{490}	۲۳۳,۲ kJ

جدول ۵: نتایج شبیه سازی رفتار حالت گذرای برق گیرهای شبکه در سناریوهای پنجم و ششم.

سناریو	محل برخورد صاعقه	مقاومت زمین برق گیرها	محل اندازه گیری (شماره ترانسفورماتور)	انرژی جذب شده
پنجم	N_1	۱۰ Ω	T_{370}	۰,۴ kJ
			T_{370}	۰,۶ kJ
			T_{490}	۲۷,۷ kJ
			T_{370}	۳,۸۶ kJ
ششم	N_2	۵ Ω	T_{370}	۹۵,۶۶ kJ
			T_{490}	۸,۳۷ kJ

۵ نشان داده شده است. شایان ذکر است که سناریوی پنجم، متناظر با سناریوی اول و سناریوی ششم متناظر با سناریوی دوم می باشد. با مقایسه نتایج مطالعات متناظر با سناریوی اول در جدول ۳ و نتایج متناظر با سناریوی پنجم در جدول ۵ ملاحظه می گردد که انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتور T_{370} از ۱,۰۳ kJ به ۰,۴ kJ کاهش یافته است. همچنین انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتورهای T_{370} و T_{490} نیز به ترتیب از ۱ kJ و ۱۷۴,۴ kJ به ۰,۶ kJ و ۲۷,۷ kJ کاهش یافته است. علاوه بر این بررسی وضعیت سایر برق گیرها نشان می دهد که در شرایط متناظر با مفروضات سناریوی پنجم، انرژی جذب شده توسط آنها نیز کمتر از قابلیت جذب انرژی برق گیرها می باشد.

به طور مشابه با مقایسه نتایج مطالعات متناظر با سناریوی دوم در جدول ۳ و نتایج متناظر با سناریوی ششم در جدول ۵ ملاحظه می گردد که انرژی جذب شده توسط برق گیر ترانسفورماتور T_{490} از ۷,۷۴ kJ به

زمانی اثر بخش خواهد بود که مقاومت زمین تمامی برق گیرهای شبکه به نسبت یکسانی کاهش داده شود تا هنگام اصابت صاعقه، توزیع نسبتاً یکنواخت تری از انرژی جذب شده بین برق گیرهای مختلف رخ دهد.

۲-۲-۵ بررسی افزایش تعداد برق گیرها

در این قسمت اثر افزودن سه برق گیر اضافی به شبکه مورد مطالعه بررسی شده است. البته انتخاب مکان نصب این برق گیرها لزوماً یک انتخاب بهینه نیست و مکان یابی بهینه برق گیرها خارج از حوزه کار این مقاله می باشد. لیکن در اینجا هدف صرفاً بررسی اثر افزودن تعدادی برق گیر به شبکه بر میزان جذب انرژی توسط سایر برق گیرها می باشد. برای این منظور سه برق گیر مذکور به مکان هایی که جذب انرژی توسط بعضی از برق گیرهای آن ناحیه نسبتاً بالا است، یعنی در نزدیکی T_{370} ، در نزدیکی T_{490} و در نزدیکی T_{370} اضافه شده اند. خلاصه نتایج مربوط به شبیه سازی رفتار حالت گذرای شبکه برای دو سناریوی مختلف در جدول

محدود شود و به منظور حفظ پروفیل ولتاژ یکنواخت در طول خط از ترانسفورماتورهای تنظیم‌کننده ولتاژ استفاده شود. بدین ترتیب افزایش ولتاژ فازهای سالم در اثر اتصالی فاز به زمین در حوزه شهری محدود خواهد شد.

از سویی دیگر، عمده برق‌گیرسوزی‌های شبکه مربوط به نواحی روستایی (محدوده میانی و انتهایی خط) در دوره معتدل سال می‌باشد که علت آن وقوع اضافه ولتاژهای موجی ناشی از صاعقه است. در دوره معتدل، وقوع صاعقه در شبکه با انشعابات متعدد که در هر انشعاب تعداد کمی برق‌گیر وجود دارد باعث می‌شود که انرژی زیادی توسط برق‌گیرها (به ویژه آنهایی که مقاومت زمین مناسب‌تری دارند) تخلیه شود و این موضوع باعث صدمه به برق‌گیرها می‌شود. لذا مطابق با نتایج این تحقیق، افزایش تعداد برق‌گیرهای طول خط به ویژه در حوزه انتهایی و در جاهایی که در فاصله طولانی تعداد معدودی ترانسفورماتور و برق‌گیر وجود دارد، پیشنهاد می‌گردد. در این صورت انرژی خط از طریق تعداد بیشتری برق‌گیر، تخلیه و از سوختن برق‌گیرها جلوگیری می‌شود. علاوه بر این اصلاح سیستم زمین همه برق‌گیرهای شبکه به طوری که مقاومت زمین آنها (مطابق با استاندارد IEC 61024) به ۵ اهم محدود شود در جلوگیری از سوختن برق‌گیرها در دوره معتدل سال مؤثر خواهد بود. قابل ذکر است بر اساس نتایج شبیه‌سازی‌ها و همچنین نتایج عملی این تحقیق، اصلاح موردی زمین برق‌گیرها در مناطق کوهستانی در شرایطی که سایر برق‌گیرهای منطقه زمین مطلوبی ندارند، برق‌گیرهای اصلاح‌شده را در معرض آسیب سریع‌تر قرار می‌دهد و لذا اصلاح زمین همه برق‌گیرها توصیه می‌شود.

۷- نتیجه‌گیری

یکی از عوامل مهم معیوب‌شدن برق‌گیرها در شبکه توزیع، مربوط به عدم تطابق مشخصات حوزه فرکانس نامی برق‌گیرها با شرایط بهره‌برداری حالت دائم آن شبکه و یا عدم تطابق مشخصات ناحیه موجی برق‌گیرها با شرایط بهره‌برداری حالت گذرای شبکه می‌باشد. در این راستا ویژگی‌ها و ساختار شبکه در عملکرد برق‌گیرها تأثیرگذار هستند و لازم است به آن توجه جدی شود. در این پژوهش به منظور بررسی علت معیوب‌شدن برق‌گیرها در فیدرهای طولانی در مناطق کوهستانی استان خوزستان، یک شبکه توزیع نمونه در شهرستان ایذه مورد بررسی قرار گرفت. آب و هوای این منطقه به دو دوره گرم (اردیبهشت تا آبان) و معتدل (مابقی ایام سال) تقسیم می‌شود. در این شبکه، برق‌گیرها در هر دو دوره گرم و معتدل سال معیوب شده‌اند، اگرچه آمار برق‌گیرهای معیوب در دوره معتدل بسیار بیشتر از دوره گرم بوده است. با توجه به این که در شبکه‌های توزیع استان خوزستان، در فصول گرم سال، فیدرها بسیار پربار هستند، به منظور حفظ ولتاژ انتهایی خطوط تپ ترانسفورماتورهای پست‌های فوق توزیع بالا برده می‌شود و در خطوط طولانی، در بالاترین مقدار ممکن قرار می‌گیرد. در این صورت ولتاژ در ابتدای خطوط طولانی معمولاً تا ۱/۱ پربونیت می‌رسد و ولتاژ سمت مصرف‌کننده نهایی به کمک تپ ترانسفورماتورهای توزیع در مقدار قابل قبول نگه داشته می‌شود. تحت این شرایط، با وجود اضافه ولتاژهای دائم بلندمدت در بخش‌هایی از شبکه فشارممتوسط، وقوع اتصال کوتاه‌های شبکه در فواصل زمانی کم می‌تواند باعث شود که تعدادی از برق‌گیرها مرتباً در معرض اضافه ولتاژهای موقت با دامنه نزدیک به ولتاژ نامی برق‌گیر قرار گیرند و بدین ترتیب قرص‌های واریستورها در معرض آسیب جدی واقع شوند. این موضوع، علت اصلی معیوب‌شدن برق‌گیرها در منطقه مورد مطالعه در دوره گرم و به عنوان

۳/۸۶ kJ و برق‌گیر ترانسفورماتور T_{TV} از ۲۳۲/۴۹ kJ به ۸/۳۷ kJ کاهش یافته است. این در حالی است که انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{DTS} از ۷/۵۳ kJ به ۹۵/۶۶ kJ افزایش یافته که علت این اتفاق عدم انتخاب بهینه تعداد و محل نصب برق‌گیرهای جدید می‌باشد، به طوری که برق‌گیرهای اضافه‌شده از ترانسفورماتور T_{DTS} فاصله قابل توجهی دارند. لیکن به هر ترتیب انرژی جذب‌شده در این حالت توسط برق‌گیر ترانسفورماتور T_{DTS} از مقدار مجاز کمتر است. همچنین بررسی وضعیت سایر برق‌گیرها نشان می‌دهد که در شرایط متناظر با مفروضات سناریوی ششم، انرژی جذب‌شده توسط آنها نیز کمتر از قابلیت جذب انرژی برق‌گیرها می‌باشد.

۵-۲-۳ ارزیابی نتایج مطالعات اثر صاعقه بر عملکرد برق‌گیرها

همان طور که نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد با توجه به ساختار شبکه مورد مطالعه، به دلیل وجود انشعابات متعدد در حوزه انتهایی شبکه و تعداد کم ترانسفورماتورها و در نتیجه برق‌گیرها، انرژی جذب‌شده توسط بعضی از برق‌گیرهای این ناحیه از مقدار مجاز ارائه‌شده در کاتالوگ سازنده بیشتر می‌شود و لذا امکان سوختن این برق‌گیرها وجود دارد. آمارها نشان می‌دهد که عمده برق‌گیرسوزی‌ها در دوره معتدل در همین نواحی انتهایی صورت گرفته است. بررسی‌های میدانی نشان می‌دهد که روی بدنه این برق‌گیرها آثار قوس وجود دارد و در بعضی موارد برق‌گیر منفجر شده است. از طرفی با اضافه‌کردن سه برق‌گیر در نزدیکی برق‌گیرهایی که برای یک صاعقه مشخص جذب انرژی آنها بالا است، مشاهده می‌شود که انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیرهای مذکور کاهش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت قابلیت جذب انرژی برق‌گیرهای نصب‌شده برای نواحی انتهایی و میانی شبکه مورد مطالعه کافی نیست.

اگرچه موقعیت مکانی برق‌گیرها در شبکه و محل برخورد صاعقه در جذب انرژی توسط آنها مؤثر هستند، لیکن بر اساس نتایج نشان داده شده در جدول ۴، وقتی مقاومت زمین یک برق‌گیر کمتر شود، برای یک موج صاعقه معین و محل برخورد معین، این برق‌گیر انرژی بیشتری جذب می‌نماید و سهم برق‌گیرهایی که مقاومت زمین آنها بدون تغییر مانده در جذب انرژی کم می‌شود و بالعکس. لذا وقتی مقاومت زمین برق‌گیرها متفاوت باشد، برای برق‌گیرهایی که در مجاورت هم هستند، آنهایی که مقاومت زمین کمتری دارند انرژی بیشتری جذب می‌کنند. با توجه به این که در مناطق کوهستانی منطقه مورد مطالعه، مقاومت زمین اغلب برق‌گیرها بالا می‌باشد، انرژی جذب‌شده توسط برق‌گیری که مقاومت زمین مطلوب‌تری دارد، امکان دارد بیشتر از قابلیت جذب انرژی آن برق‌گیر شود و این امر موجب معیوب‌شدن برق‌گیر می‌شود.

۶- ارائه راهکار جهت جلوگیری از سوختن برق‌گیرها

بر اساس آمارهای موجود و نتایج این تحقیق، تعداد کمی از برق‌گیرسوزی‌ها در دوره گرم و در حوزه شهری (محدوده ابتدایی خط) رخ می‌دهد. اگرچه بررسی مشخصات حوزه فرکانس ۵۰ هرتز شبکه نشان‌دهنده تطابق ویژگی‌های برق‌گیرهای موجود با شرایط بهره‌برداری شبکه می‌باشد، لیکن در دوره گرم از آنجا که به علت بالابودن تپ ترانسفورماتور T_1 پست اصلی، ولتاژ فشارممتوسط نقاط شهری و نزدیک به پست بالا است، وقوع اضافه ولتاژهای موقت کوتاه‌مدت به طور مکرر و بعضاً با فاصله زمانی کم باعث صدمه و انهدام برق‌گیرها می‌شود. بر این اساس برای رفع این مشکل، لازم است تپ ترانسفورماتور T_1 پست اصلی به گونه‌ای تنظیم شود که حداکثر ولتاژ در ابتدای خط به ۱/۰۵ p.u

- [10] G. V. S. Rocha, et al., "Optimized surge arrester allocation based on genetic algorithm and ATP simulation in electric distribution systems," *Energies*, vol. 12, Article ID: 4110, 15 pp., Oct. 2019.
- [11] M. A. Araujo, R. A. Flauzino, R. A. C. Altafim, O. E. Batista, and L. A. Moraes., "Practical methodology for modeling and simulation of a lightning protection system using metal-oxide surge arresters for distribution lines," *Electric Power Systems Research*, vol. 118, pp. 47-54, Jul. 2015.
- [12] P. Sestassombut and A. Ngaopitakkul, "Evaluation of a direct lightning strike to the 24 kV distribution lines in Thailand," *Energies*, vol. 12, no. 16, Article ID: 3193, 31, Aug. 2019.
- [13] K. Nakada, S. Yokoyama, T. Yokota, A. Asakawa, and T. Kawabata, "Analytical study on prevention methods for distribution arrester outages caused by winter lightning," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1399-1404, Oct. 1998.
- [14] C. A. Christodoulou, L. Ekonomou, N. Papanikolaou, and I. F. Gonos, "Effect of the grounding resistance to the behavior of high-voltage transmission lines' surge arresters," *IET Science, Measurement and Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 470-478, Mar. 2014.
- [15] "Overvoltage protection; Metal oxide surge arresters in medium voltage systems-5th edition," *ABB Application Guidelines*, May 2011.
- [16] <http://etap.com/electrical-power-system-software/etap-products.htm>
- [17] M. V. Lat and J. Kortschinski, "Application guide for surge arresters and field research of lightning effects on distribution systems," in *Proc. 10th Int. Conf. on Electricity Distribution*, pp. 150-154, Brighton, UK, 8-12 May 1989.
- [18] <https://www.emtp.com/>
- [۱۹] م. عابدی، ب. وحیدی و ف. رهبر، "تهیه منحنی‌های ایزوکرونیک ایران و کاربرد آن در عملکرد خطوط انتقال نیرو،" *سومین کنفرانس بین‌المللی برق، تهران، ایران*، ۱۴ صص، ۲۱-۲۰ آبان ۱۳۶۷.
- [20] International Electrotechnical Commission, *IEC 60721: Classification of Environmental Conditions*, 2013.
- [21] International Electrotechnical Commission, *IEC 60099-4: 2014. Surge Arresters-Part 4: Metal-Oxide Surge Arresters without Gaps for A.C. Systems*, 2014.
- [22] V. Hinrichsen, *Metal-Oxide Surge Arrester Fundamentals*, 3rd Edition, Siemens AG, Germany, 2011.
- [23] International Electrotechnical Commission, *IEC 60071: Insulation Co-ordination*, 2019.
- [24] IEEE Working Group 3.4.11, Application of Surge Protective Devices Subcommittee, Surge Protective Committee, "Modeling of metal oxide surge arresters," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 7, no. 1, pp. 302-309, Jan. 1992.
- [25] International Electrotechnical Commission, *IEC 61024: Protection against Lightning Electromagnetic*, 1993.

الهه مشهور تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۴ و ۱۳۷۹ در دانشگاه شهید شهید چمران اهواز و در مقطع دکتری مهندسی برق- سیستم‌های قدرت در سال ۱۳۸۸ در دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده مهندسی دانشگاه شهید چمران اهواز می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به دانشگاه شهید چمران اهواز، در شرکت توزیع نیروی برق استان خوزستان مشغول به کار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: بهینه‌سازی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت و شبکه‌های توزیع، شبکه‌های توزیع هوشمند، منابع تجدیدپذیر و داده‌کاوی.

سید حمیدرضا آل محمد مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری خود را در رشته مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۱، ۱۳۹۳ و ۱۳۹۹ در دانشگاه شهید چمران اهواز به پایان رسانده است و از شهریورماه ۱۳۹۷ به عنوان کارشناس طراحی برق و اتوماسیون در شرکت فولاد خوزستان مشغول به کار می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعاتی مانند برنامه‌ریزی توسعه و بهره‌برداری از شبکه‌های توزیع هوشمند، مدیریت خاموشی، انرژی‌های نو و هاب‌های انرژی می‌باشد.

یکی از یافته‌های این پژوهش می‌باشد. راهکار پیشنهادی این مقاله جهت جلوگیری از معیوب شدن برق‌گیرها در دوره گرم سال، استفاده از ترانسفورماتورهای تنظیم‌کننده ولتاژ به منظور تنظیم ولتاژ خطوط طولانی، به جای بالابردن تپ ترانسفورماتورهای فوق توزیع می‌باشد. این رویه مانع از ایجاد اضافه ولتاژهای دائم و موقت فرکانس ۵۰ هرتز در محدوده ابتدایی خطوط طولانی شده و در نتیجه می‌تواند مانع از معیوب شدن برق‌گیرها شود. از سویی دیگر مطابق با نتایج شبیه‌سازی‌ها و بررسی‌های میدانی، معیوب شدن برق‌گیرهای منطقه مورد مطالعه در دوره معتدل، ریشه در ساختار شبکه، طولانی بودن فیدر، وجود انشعابات متعدد و تعداد کم ترانسفورماتورها و در نتیجه تعداد کم برق‌گیرها و مقاومت زمین نامساعد شبکه دارد. مجموعه این عوامل می‌تواند منجر به تخلیه نامتوازن انرژی امواج صاعقه توسط برق‌گیرها و نهایتاً معیوب شدن آنها گردد. راهکار پیشنهادی این مقاله جهت جلوگیری از معیوب شدن برق‌گیرها در دوره معتدل سال در شبکه‌های توزیع با پراکندگی زیاد و دارای انشعابات متعدد، افزودن تعداد بهینه‌ای برق‌گیر در طول خطوط و همچنین اصلاح و یکسان‌سازی مقاومت زمین تمامی برق‌گیرها به جای اصلاح موردی چند برق‌گیر در شبکه می‌باشد. در این شرایط امکان تخلیه متوازن انرژی برق‌گیرها فراهم شده و مانع از سوختن برق‌گیرها در اثر تخلیه انرژی بیشتر از ظرفیت نامی آنها می‌گردد. نتایج این تحقیق قابل تعمیم به سایر فیدرهای طولانی و پربار در مناطق کوهستانی خوزستان که ساختاری مشابه ساختار فیدر مورد مطالعه دارند، می‌باشد.

مراجع

- [۱] ط. ق. شاهرخشاهی، *اضافه ولتاژها در شبکه‌های توزیع انرژی، چاپ اول، انتشارات آزاده* به سفارش شرکت فرانیرو، ایران، ۱۳۸۵.
- [۲] ط. ق. شاهرخشاهی، *برق‌گیرها در شبکه‌های توزیع و انتقال انرژی، چاپ اول، نشر علوم دانشگاهی، ایران، ۱۳۸۲.*
- [۳] ط. ق. شاهرخشاهی، *برق‌گیرهای فشارقوی بدون فاصله هوایی، چاپ اول، انتشارات دینفیه، ایران، ۱۳۷۸.*
- [4] J. J. Burke, V. Varneckas, E. Chebli, and G. Hoskey, "Application of MOV and gapped arresters on non-effectively grounded distribution systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 6, no. 2, pp. 794-800, Apr. 1991.
- [5] L. J. Bohmann, J. McDaniel, and E. K. Stanek, "Lightning arrester failure and ferroresonance on a distribution system," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, no. 6, pp. 1189-1195, Nov. 1993.
- [6] K. Nakada, et al., "Distribution arrester failures caused by lightning current flowing from customer's structure into distribution lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 14, no. 4, pp. 1527-1532, Oct. 1999.
- [7] J. Snodgrass and L. Xie, "Overvoltage analysis and protection of lightning arresters in distribution systems with distributed generation," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 123, Article ID: 106209, Dec. 2020.
- [8] A. L. Orille-Fernandez, S. B. Rodriguez, and M. A. G. Gotes, "Optimization of surge arrester's location," *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 19, no. 1, pp. 145-150, Jan. 2004.
- [9] R. Shariatinasab, B. Vahidi, and S. H. Hosseinian, "Statistical evaluation of lightning-related failures for the optimal location of surge arresters on the power networks," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 3, no. 2, pp. 129-144, Feb. 2009.