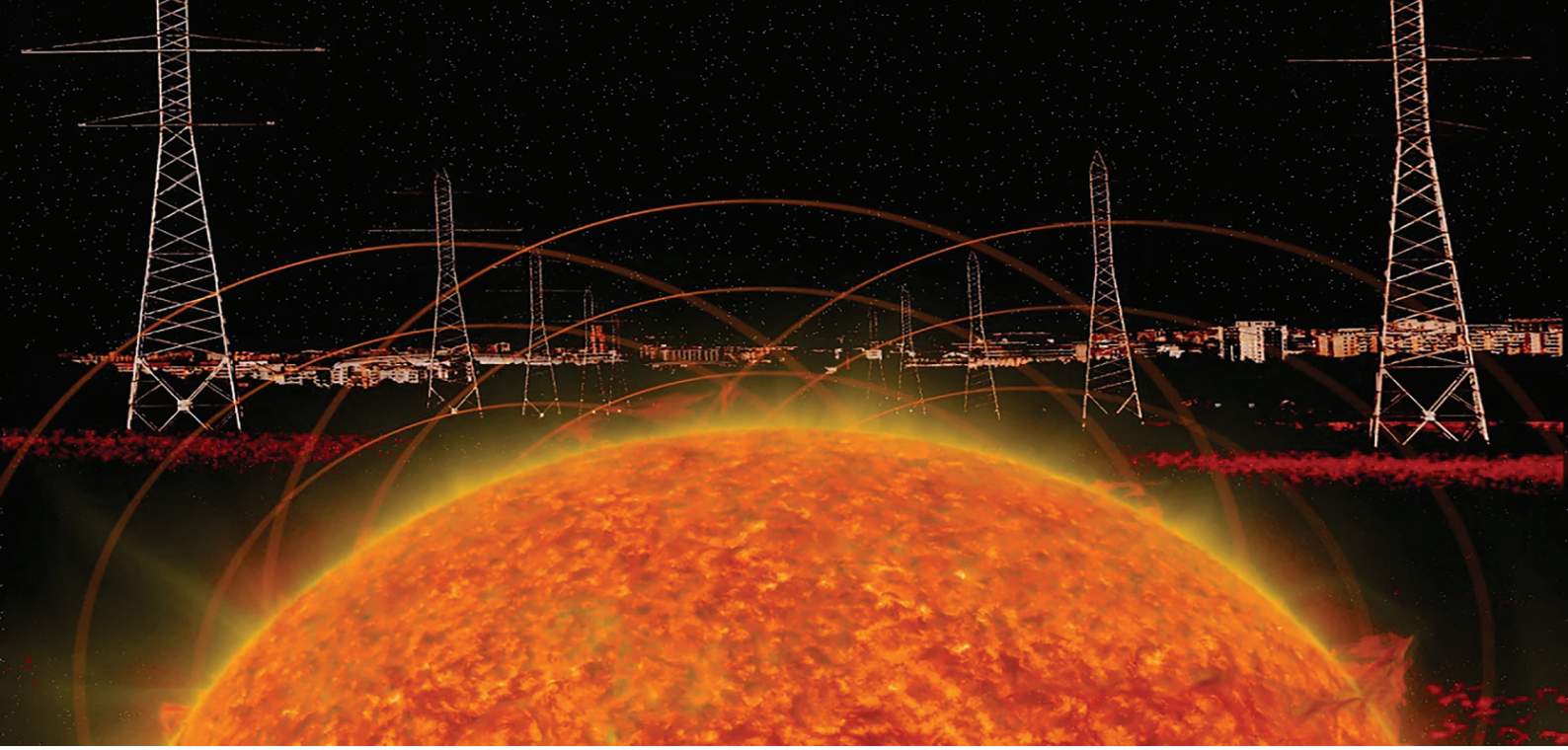


مقاله علمی-مروری

مخاطرات شبکه‌های قدرت از طوفان ژئومغناطیسی ناشی از فعالیت‌های خورشید

سمیه تاران*، استادیار دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، s.taran@znu.ac.ir

نسیبه علیپورراد، استادیار دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، alipourrad@znu.ac.ir

کورش رکنی، دانشجوی دکتری دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، rokni@znu.ac.ir

سید هادی حسینی، استادیار دانشکده مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران، hhosseini@znu.ac.ir

امید شکوفا، استادیار پژوهشکده سامانه‌های ماهواره، پژوهشگاه فضایی ایران، o.shekoofa@isrc.ac.ir

حسین صفری، استاد دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان- ایران safari@znu.ac.ir

*نویسنده مسئول

چکیده

تداوم زندگی مدرن بشر امروزی به تأمین مطمئن انرژی الکتریکی وابسته است به‌طوری‌که هر وقفه در تأمین آن به سبب ایجاد اختلالات مختلف از جمله اختلال در شبکه‌های برق می‌تواند چنین زندگی را به خطر انداخته و آسیب‌های فروان اقتصادی، اجتماعی و حتی جانی بر جای بگذارد. بررسی این پدیده‌های اختلالی الکتریکی پس از حادثه‌ای که در شمال کانادا در مارس ۱۹۸۹ رخ داد، مورد توجه ویژه قرار گرفت. بدین منظور تقاضا برای مطالعه دقیق آسیب‌پذیری شبکه قدرت و تجهیزات گران‌قیمت در برابر طوفان‌های مغناطیسی با آگاهی از اثرات منفی آن در سراسر دنیا گسترش یافته است. نتایج مطالعه‌های انجام گرفته در کشورهای مختلف حاکی از آن است که آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر طوفان‌های ژئومغناطیسی (بیشتر با منشأ خورشیدی) علاوه بر تغییرات زمانی مؤلفه افقی میدان ژئومغناطیسی به ساختار شبکه قدرت و مقاومت الکتریکی زمین نیز بستگی مستقیم دارد. قابل ذکر است، مطالعات کمی و کیفی در سال‌های اخیر نشان داد که عرض‌های جغرافیایی بالا (کانادا، روسیه، سوئد و غیره) در نزدیکی قطبین زمین و عرض‌های میانی (ژاپن، چین، برزیل و غیره) تحت تأثیر طوفان‌های ژئومغناطیسی قرار دارند. در اینجا موارد مهم ثبت شده از اختلالات ژئومغناطیسی میدان مغناطیسی با منشأ خورشیدی و تأثیرهای آن بر زیرساخت شبکه‌های برق قدرت آورده شده است. همچنین به برخی از راهکارهای کاهش خسارت در زیرساخت شبکه قدرت پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: اختلالات ژئومغناطیسی، جریان القایی ژئومغناطیسی، شبکه قدرت

Large Power Grid Hazards From Geomagnetic Storms Caused by Solar Activity

Somayeh Taran*, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

Nasibe Alipourrad, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

Kourosh Rokni : Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

S.Hadi Hosseini,Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

Omid Shekoofa, Satellite Research Institute, Tehran, Iran

Hossein Safari, Department of Physics, Faculty of Science, University of Zanjan, University Blvd., Zanjan, Zanjan, Iran.

*Corresponding Author

Abstrat

The survival of modern human life today depends on energy security, any interruption, e.g., by solar sources that

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]

cause various disruptions in the power grids. Special attention has been widely paid to studying the electrical disturbances following the March 1989 event in northern Canada. For this purpose, various countries started several studies to take the necessary measures to reduce the damage caused by geomagnetic storms in the power network. We carefully know that solar activity was considered the principal source of geomagnetic storms. Coronal mass ejections- the huge bubbles of hot plasma and magnetic fields with a speed of about 200 to 1000 kilometers per hour and solar flares are the most important causes of a geomagnetic storm. If they occur toward the Earth simultaneously, they can affect Earth's magnetic field and cause significant disturbances in the power grids. The solar activity has 11-year periods, but it is not entirely possible to predict the occurring time of solar events. Temporal variations of these currents cause a geoelectric field and low-frequency quasi-static geomagnetically induced currents (GIC) in power grid equipment. Studies in different geographical locations show that the magnitude of geomagnetic induction current (GIC) is directly related to the temporal changes of the disturbing magnetic field and especially to its horizontal component.

Transformers are one of the most effective equipment in a geomagnetic disturbance. In high latitudes, damages to power transformers have been reported in which geomagnetic changes during hurricane times have been very rapid and large (greater than 1000 nT), and hence GICs as large as or greater than 100 amps flow at the end of the storm in the winding. Usually, the geomagnetic disturbances are not strong at low latitudes, so much smaller GICs are reported there. However, the flow of GICs and their effects on power transformers are complex processes, and careful evaluation is required even in such low latitude regions. The strategies used against geomagnetic disturbances highly depend on geographical areas.

Countries that have already experienced the harmful effects of geomagnetic disturbances perform better in an event. Researchers in Russia, Japan, and Brazil proposed algorithms usable in all power grids and any geographical location. Testing the algorithms on the power grids in the mentioned countries confirmed that the magnitude of GICs and their possible harmful effects also depend on the power network topology, resistors, and other engineering details of the power system.

This article reviewed the impressive factors causing geomagnetic disturbances via solar activity and their effects on the power grids. In the logical next step, we will focus on finding the possible hazards in the Iranian bulk power network as linked with several neighboring countries by analyzing the related data.

Keywords: Geomagnetic disturbances, Geomagnetic induced current, Power grid

۱- مقدمه

بیشتر طوفان‌های بزرگ خورشیدی در زمان بیشینه فعالیت خورشیدی و با فاصله‌ی زمانی حدود ۱۱ سال رخ می‌دهند. برای ما ساکنان زمین، تغییرات آب‌وهوای فضایی می‌تواند از زیبایی شفق قطبی گرفته تا تأثیر مخرب احتمالی طوفان‌های خورشیدی بر زیرساخت‌های زندگی بشر، جذاب و زیبا و یا پرخطر باشد. در زمان وقوع طوفان مغناطیسی خورشیدی، خورشید جریان‌هایی بسیار قوی از انرژی مغناطیسی را به فضا پرتاب می‌کند. این جریان‌ها قادر هستند با سامانه‌های پیشرفته فضایی و زمینی تداخل کرده و بسیاری از خدمات حیاتی را که جامعه امروزی به آن‌ها متکی است، مختل کنند. در واقع ذرات پرانرژی و تشعشعات پرتاب‌شده از خورشید، پس از رسیدن به زمین می‌توانند باعث بروز نوسانات موقت در میدان ژئومغناطیسی شوند که این تغییرات اختلالات ژئومغناطیسی نامیده می‌شوند[۱]. نوسانات گذرا با شدت کافی را نیز طوفان‌های ژئومغناطیسی می‌نامند. بعد از شناسایی آثار مخرب نخستین طوفان‌های ژئومغناطیسی در سامانه‌های حیاتی بشر، تامپسون و همکاران ۱۹۹۷ پیشنهاد کردند برای جلوگیری از آسیب‌های اختلالات ژئومغناطیسی، آستانه خطر برای کشورها و موقعیت‌های جغرافیایی متفاوت تعیین شود که بعد کشورهای مختلف به‌طور جداگانه تصمیم به این کار گرفتند و هم‌اکنون هیچ مرکز بین‌المللی مسئولیت مطالعه اختلالات و روش‌های مقابله با آن را برای هیچ کشوری بر عهده ندارد. طوفان‌های ژئومغناطیسی با توجه به‌شدت تاثیرگذاری در انواع تجهیزات، در سایت نوآآ (NOAA) طبقه‌بندی شده‌اند که تحلیل داده‌های حاصل از این طوفان‌ها در هر منطقه جغرافیایی به‌صورت موضعی و توسط ساکنان همان منطقه انجام می‌شود. اگر قطب ژئومغناطیسی با سرعت و جهت فعلی به حرکت خود ادامه دهد سال ۲۰۵۰ به روسیه و عرض‌های میانی زمین خواهد رسید [۲] که در آینده نزدیک احتمال تأثیرپذیری کشورهایی همانند ایران که در حال توسعه زیرساخت‌های ارتباطی و شبکه قدرت هستند را در برابر خطرات ناشی از طوفان‌های ژئومغناطیسی بسیار افزایش خواهد داد، در نتیجه این باور که تأثیرات طوفان‌های ژئومغناطیسی در عرض‌های میانی زمین از جمله ایران اهمیتی ندارند، بسیار نادرست است و چه بسیار اختلالات ژئومغناطیسی که در عرض‌های میانی به ثبت رسیده‌اند [۳و۴و۵ و۶]. آسیب‌های متعدد ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی قوی در تجهیزات سیستم برق قدرت می‌تواند باعث خاموشی در مقیاس‌های بزرگ و طولانی مدت شود. توسعه مداوم شبکه‌های ولتاژ بسیار بالا از یک‌سو و قدیمی شدن تجهیزات شبکه قدرت از سوی دیگر منجر به گسترش مناطق پرخطر خواهد شد. بدین منظور تقاضا برای مطالعه دقیق آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر طوفان‌های مغناطیسی قوی با آگاهی گسترده‌تر از اثرات منفی آن در سراسر دنیا گسترش یافته است. در این پژوهش، ابتدا پیش‌زمینه‌ای در مورد عوامل مؤثر در ایجاد اختلال‌های ژئومغناطیسی و سپس مواردی از تأثیر این

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]

طوفان‌ها بر شبکه قدرت و همچنین مروری بر برخی راهکارهای مؤثر پیشنهاد شده برای جلوگیری از خطرهای احتمالی بر روی شبکه قدرت ایران نیز ارائه خواهد شد.

۲- اختلال‌های ژئومغناطیسی

اختلال‌های ژئومغناطیسی (GMD) به‌دلیل طوفان‌های ژئومغناطیسی روی می‌دهند که در بیشتر مواقع توسط جریان‌های پلاسمای خورشیدی با چگالی یا سرعت زیاد به محیط اطراف زمین می‌رسند. در صورتی‌که میدان مغناطیسی شاره‌ی خارج شده از خورشید مؤلفه‌ی موازی مؤثری با میدان دوقطبی کره‌ی زمین داشته باشد، انرژی موجود در بادهای خورشیدی به مغناطوکره‌ی زمین تزریق خواهد شد. خطرناک‌ترین حالت در صورتی است که جهت میدان شاره در خلاف جهت میدان دوقطبی زمین (روبه جنوب) باشد که سبب از هم گسیختن خطوط میدان اطراف زمین خواهد شد و در غیر این صورت خطوط میدان موجود در مغناطوکره با یک موج فشاری از طرف این شاره روبه‌رو می‌شوند. در هر دو حالت بیان شده به علت افزایش میدان الکتریکی موجود در مغناطوکره، حرکات پلاسما در این بخش از جو زمین افزایش یافته و در ادامه با افزایش شدت جریان الکتریکی در مغناطوکره و یون‌کره مواجه خواهیم بود[۷]. مطالعه‌ی طوفان‌های ژئومغناطیسی از دو جنبه اهمیت فراوان دارد. نخست این‌که طوفان ژئومغناطیسی بخش اصلی مطالعات ژئوفیزیکی است و دیگری اهمیت تأثیر عملی آن بر زندگی بشر است. دانشمندان در ابتدا طوفان‌ها را با فرض ساختار بسیار ساده مطالعه می‌کردند. با پیشرفت ابزارهای رصدی و شناخت فیزیک مغناطوکره، مطالعات به شکل عمیق‌تری ادامه یافت. هر اختلال ژئومغناطیسی منحصربه‌فرد است و علم ژئوفیزیک جدید نمی‌تواند به‌طور دقیق ویژگی‌های مورفولوژیکی اختلال‌های مختلف را توصیف کند[۸].

۳- منشا طوفان‌های خورشیدی

پرتاب‌های جرم تاجی (CME) یکی از منابع اصلی طوفان‌های ژئومغناطیسی است. یک رویداد بزرگ مقیاس جرم تاجی ممکن است حاوی یک میلیارد تن ماده و سرعتی بین ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلومتر در ساعت باشد که قادر است تا چند میلیون کیلومتر در ساعت نیز افزایش یابد. شراره‌های خورشیدی نمونه‌ی دیگری از منشأ طوفان‌های مغناطیسی هستند که در تابش‌های پرتوی ایکس و دیگر طیف‌های الکترومغناطیسی دیده می‌شوند. اگر پرتاب‌های جرم تاجی و شراره‌ها هم‌زمان اتفاق افتاده و در راستای زمین قرار بگیرند به‌دلیل سرعت بالا می‌توانند کمتر از ۲ ساعت به زمین برسند. چرخه‌های فعالیت‌های خورشیدی با دوره‌های ۱۱ ساله اتفاق می‌افتند که زمان شروع و پایان این دوره‌ها قابل پیش‌بینی است ولی میزان فعالیت در هر دوره می‌تواند متفاوت باشد. در زمان بیشینه فعالیت‌های خورشیدی به‌طور متوسط رویدادهای بزرگ مقیاس خورشیدی که می‌توانند تأثیر قابل توجهی بر ارتباطات داشته باشند، به صورت هفتگی رخ می‌دهند[۹].

۴- جریان‌های القایی ژئومغناطیسی

جریان القایی ژئومغناطیسی (GIC) رویدادی است که در اثر تعامل بین آب‌وهوای فضایی و میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌شود. یک طوفان ژئومغناطیسی قوی که در مغناطوکره زمین نفوذ کرده، می‌تواند منجر به یک جریان بالای الکتروجت (حرکت جریان ذرات باردار در بخش پایینی یون‌کره) با چندین میلیون آمپر در یون‌کره شود. این جریان با زمان تغییر کرده و سبب القای یک میدان ژئوالکتریکی می‌شود. در واقع با توجه به تفاوت‌های ولتاژ محلی ناشی از الکتروجت‌ها در سطح زمین، ممکن است یک جریان شبه مستقیم (DC)- جریانی با فرکانس بسیار پایین- در امتداد خطوط انتقال جریان داشته باشد و از طریق نقاط زمین خنثی ترانسفورماتور وارد و خارج شبکه شود. GIC ارتباط نزدیکی با مشتق زمانی میدان مغناطیسی (dB/dt) و به‌ویژه مؤلفه افقی آن دارد. گرچه برخی تحقیقات دیگر نیز نشان می‌دهند تغییرات زمانی مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی نیز می‌تواند در تولید GIC نقش بسزایی داشته باشد[۱۰و۱۱]. طی تحقیقاتی که در سال ۲۰۰۱ در نروژ و منطقه فنواسکاندیا صورت گرفت اعلام شد که تغییرات زمانی مؤلفه افقی با تغییر فصل نیز متفاوت خواهد بود. بزرگ‌ترین مقادیر در فصل‌های بهار و پاییز و کمترین آن در تابستان و زمستان روی می‌دهد (بردار مؤلفه افقی میدان ژئومغناطیسی است). رسانایی زمین در مکان خطوط انتقال نیز تأثیر بسزایی در میزان جریان GIC خواهد گذاشت. دامنه سیگنال‌های GIC تابعی از رسانایی الکتریکی سطح زیرین زمین است. بنابراین ساختارهای مقاومتی باید تا عمق چند ده یا چند صد کیلومتری زیر ناحیه شبکه قدرت انتخاب شده برای مطالعات GIC بررسی شوند. در حالت کلی در عرض‌های بالا مقدار GIC در خطوط انتقال رو به شرق بیشتر است و در عرض‌های میانی مؤلفه رو به شمال میدان ژئوالکتریکی بزرگ‌تر از مؤلفه رو به شرق است. کاپنمن در سال ۲۰۰۵ اعلام کرد شرایط ژئومغناطیسی آشفته پایدار در عرض‌های جغرافیایی پایین و استوایی به احتمال زیاد با تشدید جریان حلقه که به‌عنوان منبع GICها در مناطقی با عرض جغرافیایی میانی امریکای شمالی عمل می‌کند، ارتباط دارد. تعیین دقیق جهت میدان ژئوالکتریکی در هر ناحیه نیازمند داده‌های مغناطیسی در آن بخش است[۱۲و۱۳].

۵- مروری بر مهم‌ترین جریان های القایی ژئومغناطیسی ثبت‌شده شبکه قدرت در اثر طوفان ژئومغناطیسی

توسعه دانش فعلی در مورد تأثیر جریان القایی ژئومغناطیسی بر سامانه‌های برق قدرت بیشتر بر اساس تجزیه و تحلیل رویدادهای تاریخی ایجاد شده است. در این بخش برخی طوفان‌های ژئومغناطیسی ثبت شده در سامانه‌های برق قدرت کشورهای مختلف آورده شده است.

۵-۱- خاموشی شبکه قدرت هیدروکبک کانادا

از شناخته شده‌ترین رویدادها می‌توان به طوفان خورشیدی مارس ۱۹۸۹ اشاره نمود که منجر به خاموشی گسترده در کانادا شد. در صبح روز ۱۳ مارس ۱۹۸۹ دو سیستم جبران‌ساز توان راکتیو استاتیکی (SVC) به فاصله زمانی دو ثانیه در ایستگاه شیبوکامو کبک کانادا به‌دلیل افزایش بار در خازن مربوطه از سرویس خارج شدند. با از دست دادن تنظیم ولتاژ در شبکه ۷۳۵ کیلوولتی، یک سری خطوط باز شدند و در عرض ۱ دقیقه، مجتمع هیدروالکتریک لا گرانده در شمال کانادا از مراکز بار در جنوب قطع شد. این سری از رویدادها بیش‌تر از موارد احتمالی پیش‌بینی شده‌ای بودند که سیستم برای مقابله با آن‌ها و بدون از دست دادن بار طراحی‌شده بود. این سیستم به‌طور ناگهانی حدود ۵/۹ گیگاوات تولید خود را از دست داد که حدود نصف کل توان سیستم در آن زمان در اوایل صبح بود. افت فرکانس به حدی شدید شد که

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]

عوامل مختلف کاهش بار که در سراسر سیستم توزیع شده بودند، برای بازگرداندن تعادل بین بار موجود و ظرفیت تولید باقی‌مانده، شروع به قطع بار کردند. با این حال، تنظیمات رله نتوانستند تغییر پله‌ای توان و نیز تغییر فرکانس ناشی از آن را کنترل کرده و کل سیستم به توان صفر رسید. تنها ۷۵ ثانیه پس از فروپاشی نخستین خازن، بیشتر استان بدون برق ماند[۱۴]. علت این رویداد یک سری انفجارهای عظیم با پرتاب جرم تاجی در منطقه‌ای از خورشید در بازه ۶ تا ۱۲ مارس ۱۹۸۹بود[۱۵].

۵-۲- خاموشی‌های طوفان هالووین ۲۰۰۳

در سال ۲۰۰۳ مجموعه‌ای از طوفان‌های خورشیدی بزرگ بر فراز سطح خورشید روی دادند. در این رویدادها یکی از بزرگ‌ترین و قوی‌ترین شراره‌های خورشیدی کلاس X و نیز وقوع تعدادی شراره پس از آن نشان از شدت بالای طوفان‌های اتفاق افتاده بود. بیشترین میزان تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی نسبت به روز آرام حدود ۳۸۳- نانو تسلا ثبت شد. در زمان اوج طوفان و میدان ژئوالکتریکی در منطقه مالمو به مقادیر ۲ ولت بر کیلومتر و جریان ژئوالکتریکی در ژاپن ۱۳۰ آمپر اندازه‌گیری شد. این طوفان خرابی‌های گسترده‌ای در سامانه‌های مختلف فناوری با خود به همراه داشت. در سوئد در ۳۰ اکتبر ساعت ۲۱:۰۷ خاموشی در حدود ۲۰ تا ۵۰ دقیقه رخ داد و این خاموشی نزدیک به ۵۰۰۰۰ نفر را در مناطق مالمو و نواحی اطراف، تحت تأثیر قرار داد. علت اصلی عملکرد یک رله در سیستم ۱۳۰ کیلوولت بود. همچنین گزارش شده که همین طوفان خورشیدی خسارت‌های قابل توجهی را به ترانسفورماتورها در آفریقای جنوبی وارد کرده است[۱۶].

۵-۳- خرابی‌های ثبت‌شده در لهستان

ارتباط بین خرابی عناصر زیرساخت انرژی در لهستان و حوادث ژئومغناطیسی با استفاده از تحلیل سری‌های زمانی مورد بررسی قرار گرفته است. در یک بررسی آماری در جنوب لهستان، داده‌های خرابی‌ها با دلایل نامشخص و خرابی دستگاه‌های الکترونیکی که در دوره‌های افزایش فعالیت ژئومغناطیسی رخ داده است، تجزیه و تحلیل شده‌اند. نزدیک به ۴۶۲۵ خرابی در ۲۰۱۰ و ۱۰۵۶۵ خرابی در هفت ماه از ۲۰۱۴ مورد بررسی قرار گرفت. تجزیه‌وتحلیل‌ها نشان می‌دهد که علت اصلی اختلال‌های شبکه‌ی برق قدرت ناشی از طوفان‌های خورشیدی است و متوسط خرابی‌ها یک روز بعد از پرتاب‌های جرم تاجی سریع رخ داده است. همچنین آن‌ها نشان دادند که خرابی‌ها در هفت ماه اول ۲۰۱۴ که نزدیک به بیشینه فعالیت‌های خورشیدی است بیش از دو برابر سال ۲۰۱۰ بوده است[۱۷].

۵-۴- جریان ژئوالکتریکی در شبکه قدرت ژاپن

در شبکه قدرت ژاپن، در بازه زمانی دسامبر ۲۰۰۵ و مارس ۲۰۰۸ به‌عنوان بخشی از همکاری نزدیک بین موسسه ملی فناوری اطلاعات و ارتباطات (NICT)، شرکت برق هوکایدو، آزمایشگاه محیط زیست خورشیدی-زمینی (STEL) و دانشگاه ناگویا، مقدار جریان GIC در شبکه قدرت اندازه‌گیری شد. در این پژوهش با استفاده از یک آمپرمتر انبری، جریان الکتریکی یک نقطه خنثی زمین شده در یک ترانسفورماتور در پست ممانبتسو در شرکت برق هوکایدو در بازه زمانی مورد نظر اندازه‌گیری شد. این ترانسفورماتور یک ترانسفورماتور سه فاز معمولی است و به خط ۱۸۷کیلوولت نیروگاه آشورو متصل می‌شود. هر دو انتهای خط به زمین متصل هستند و پست ممانبتسو نقطه پایانی این خط بوده و هیچ شاخه‌ای بین این دو پایانه وجود ندارد. این خط به طول حدود ۱۰۰ کیلومتر و در جهت جنوب غربی (حدود ۴۰ درجه از راستای شمال- جنوب به سمت غرب) قرار دارد. بیشترین مقدار GIC اندازه‌گیری شده در بازه‌های زمانی یک ثانیه، حدود ۳/۸۵ آمپر در زمان فاز اصلی طوفان اندازه‌گیری شده است. مشخص شد با اینکه GICهای شدید بیشتر در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی رخ می‌دهند، GICهای مرتبط با طوفان‌های فرعی را نیز می‌توان در ژاپن حتی در کمینه خورشیدی شناسایی کرد. تغییرات زمانی GICها به‌جای مشتقات زمانی میدان ژئومغناطیسی، همبستگی بالایی با تغییرات میدان ژئومغناطیسی نشان دادند[۱۸].

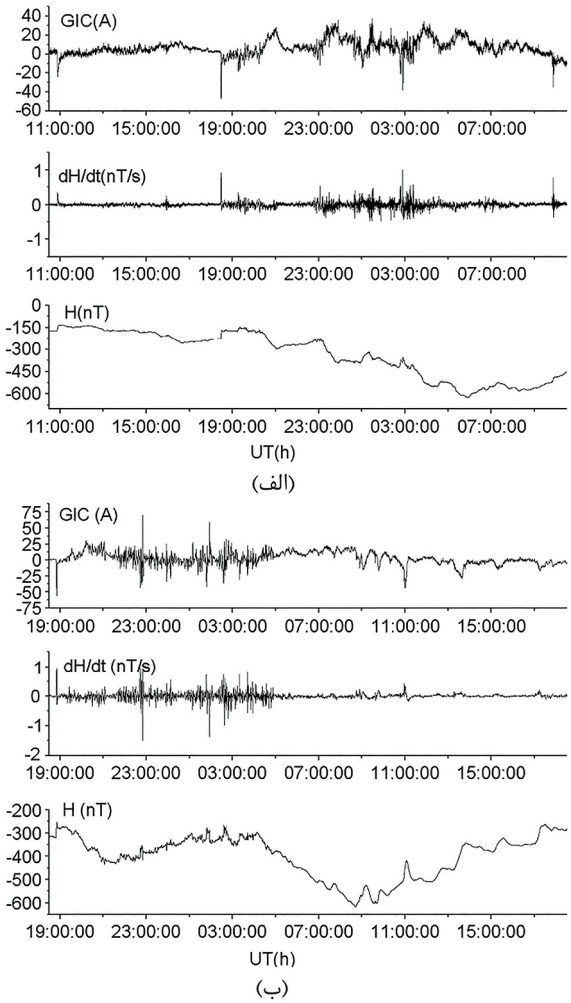
۵-۵- نمونه جریان‌های GIC مشاهده شده در چین

با وجود این‌که چین کشوری با عرض جغرافیایی متوسط است، جریان‌های بزرگی در ترانسفورماتورهای خنثی بارها در سیستم برق فشارقوی چین در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی ایجاد شده است. شبکه قدرت ۷۵۰ کیلوولت شمال غرب چین دارای خطوط انتقال طولانی با مقاومت‌های کوچک است که آن را مستعد GIC بزرگ در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی می‌کند. نمونه‌ای از داده‌های GIC و مؤلفه‌ی افقی میدان ژئومغناطیسی و تغییرات زمانی این مؤلفه در شبکه قدرت چین برای (الف) ۷ و ۸ نوامبر و (ب) ۹ و ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در شکل (۱) نشان داده شده است. زمان وقوع بیشینه جریان با نرخ تغییرات میدان ژئومغناطیسی مطابقت دارد. همچنین در آن زمان هیچ جریان مستقیم ولتاژ بالایی گزارش نشده است و بیانگر این است که این جریان‌ها به‌درستی GIC بوده که توسط طوفان‌های ژئومغناطیسی القا می‌شوند. لیو و همکاران (۲۰۱۴) نشان دادند که برخی موقعیت‌ها در چین به‌شدت به طوفان‌های ژئومغناطیسی حساس هستند و دامنه‌ی جریان‌های GIC می‌تواند به بیشتر از A30 در طول طوفان‌های ژئومغناطیسی قوی برسد. همچنین آن‌ها به این مهم متذکر هستند که GIC نه‌تنها یک مشکل عرض جغرافیایی بالا است، بلکه شبکه‌ها در عرض‌های جغرافیایی متوسط و پایین را نیز می‌توانند تحت تأثیر قرار دهد [۱۹].

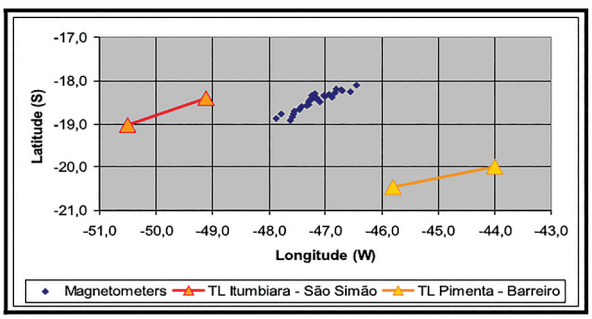
۵-۶- محاسبه جریان القایی ژئومغناطیسی در شبکه قدرت برزیل

در طی یک طوفان ژئومغناطیسی بزرگ، که در ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ روی داد، بر اساس تغییرات ژئومغناطیسی در خطوط انتقال برق ۵۰۰ کیلوولت در منطقه جنوبی برزیل جریانی ژئومغناطیسی با دامنه ۱۵ آمپر اندازه‌گیری شد. مکان‌های اندازه‌گیری GIC از قبل با کمک کارکنان مهندسی شرکت برق قدرت برزیل، فورناس به دقت انتخاب شده بودند. دو خط انتقال در ایتومبیارا- سیمائو سائو و پیمنتا- باریرو که در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند، تقریباً در راستای شرق- غرب میدان ژئومغناطیسی قرار داشتند، مکان جغرافیایی دو خط انتقال در شکل (۲) نشان داده شده است. چنین انتخابی با استناد بر اینکه از نظر آماری، میدان‌های ژئوالکتریک شرق- غرب تا حدودی بزرگ‌تر از میدان‌های شمالی- جنوبی هستند و بنابراین GICهای بزرگ‌تری در خطوط انتقال شرق - غرب تولید می‌کنند، انجام گرفته است. برای به‌دست آوردن مقادیر GIC بزرگ‌تر، خطوط انتقال انتخاب شده باید از روی مناطق دارای لایه‌های بسیار مقاوم در پوسته و گوشته بالایی زمین عبور کنند که منجر به میدان‌های ژئوالکتریک افقی بزرگ‌تر می‌شود. طول کل خطوط انتخاب شده بین ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر بوده است. اندازه‌گیری تغییرات میدان ژئومغناطیسی تحت دو خط انتقال انتخاب شده در آگوست ۲۰۰۴ با نصب مغناطیس‌سنج‌های سه‌جزئی فلاکس گیت آغاز شد. خطوط انتخاب شده در منطقه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]



شکل ۱: داده‌های GIC ، مؤلفه افقی و تغییرات زمانی مؤلفه افقی میدان مغناطیسی ثبت شده در نیروگاه هسته‌ای لینگ آئو به همراه مؤلفه‌ی افقی میدان ژئومغناطیسی از رصدخانه ژئوکینگ در (الف) ۷-۸ و (ب) ۹-۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ [۱۹].



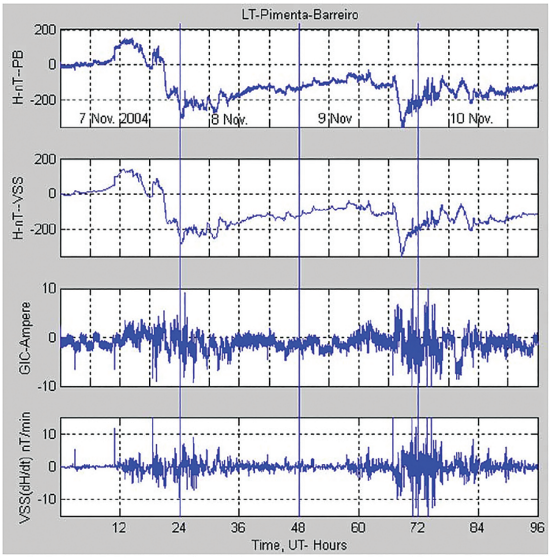
شکل ۲: موقعیت جغرافیایی مگنتومترها (آبی) و خطوط انتقال ایتومبیارا - سیمائو سائو (قرمز) و پیمنتا- باریرو (زرد) [۳].

غربی ایالت میناس، به ترتیب حدود ۷۰۰ و ۳۰۰ کیلومتر از رصدخانه مغناطیسی ریودوژانیرو (ایستگاه مرجع) برای بررسی GIC فاصله دارند. این فواصل برای مناطقی در عرض‌های جغرافیایی پایین که تغییرات میدان ژئومغناطیسی به طور کلی یکنواخت است قابل قبول در نظر گرفته می‌شود. برای اندازه‌گیری GIC یک روش ساده و مستقیم انتخاب شد. تغییرات میدان ژئومغناطیسی افقی (X مؤلفه شمال جغرافیایی و Y مؤلفه شرق جغرافیایی است) با نصب مغناطیس‌سنج‌های فلاکسگیت به‌طور پیوسته اندازه‌گیری شد. مغناطیس‌سنج‌ها به‌طور مستقیم در زیر خطوط انتقال نیرو که چندین صد کیلوولت را با جریان‌های بالای صدها و هزاران آمپر حمل می‌کنند، قرار گرفته و داده‌ها را با اختلاف زمانی یک دقیقه ثبت نمودند. داده‌های میدان ژئومغناطیسی افقی به‌دست آمده با داده‌های هم‌زمان در ایستگاه مرجع مقایسه شدند. میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده در خطوط مورد نظر مجموع تغییرات ژئومغناطیسی طبیعی و میدان مغناطیسی تولید شده توسط یک GIC است که در خط انتقال جریان دارد. با کم کردن تغییرات میدان ژئومغناطیسی ثبت شده در ایستگاه مرجع از تغییرات ثبت شده در خطوط انتقال، تغییرات مغناطیسی مربوط به GIC به‌دست می‌آید. مقدار GIC با استفاده از قانون بیوساوار محاسبه شد. در بازه زمانی ۷ تا ۱۱ نوامبر ۲۰۰۴ یک طوفان ژئومغناطیسی بزرگ در سیستم اندازه‌گیری راه‌اندازی شده ثبت شد. تغییرات شدت افقی میدان ژئومغناطیسی $H = \sqrt{X^2 + Y^2}$ محاسبه شده از مؤلفه‌های X و Y که توسط مغناطیس‌سنج در زیر خطوط ارتباطی در پیمنتا- باریرو و ایتومبیارا- سیمائو سائو و در ایستگاه مرجع نصب شده‌اند و نیز GIC محاسبه شده در این مکان‌ها و همچنین dH/dt در ایستگاه مرجع به ازای هر دو ایستگاه به ترتیب در شکل‌های (۳) و (۴) نشان داده شده‌اند. همان‌طورکه به نظر می‌رسد مقادیر واضح قابل مشاهده فقط در دوره‌های طوفان‌های ژئومغناطیسی ظاهر می‌شوند. در این پژوهش نشان داده شد که GIC در عرض‌های جغرافیایی پایین نیز رخ می‌دهد که مقدار آن در بخش مطالعاتی برزیل و در محدوده ۱۸تا ۲۱ درجه جنوبی و در زمان اوج یک طوفان ژئومغناطیسی حدود ۱۵ تا ۲۰ آمپر اندازه‌گیری شد. از آنجایی‌که دامنه‌های GIC بسیار بیشتر به مشتق زمانی میدان ژئومغناطیسی و مقاومت پوسته و گوشته بالایی زمین مرتبط است نمی‌توان با قطعیت گفت که مناطق عرض جغرافیایی و پایین مانند برزیل، تحت تأثیر GIC قرار نخواهد گرفت.

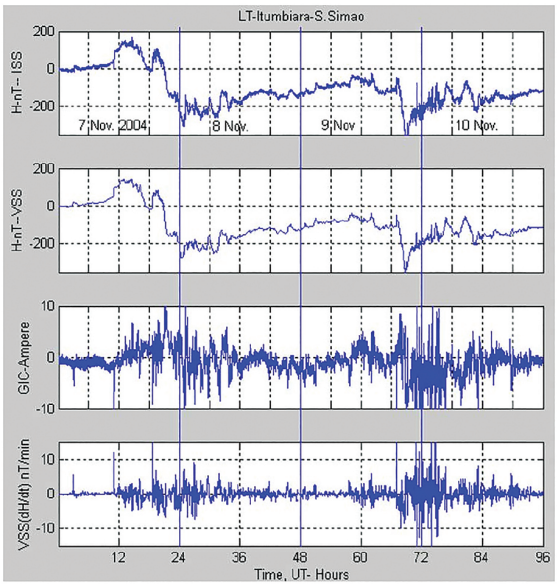
۶- راه‌کارهای ارائه‌شده در جهت مقابله با اثرات ناشی از رخدادهای اقلیم فضا در شبکه تولید و انتقال برق

به‌دلیل اشباع ترانسفورماتور و اثرات ناشی از آن، جریان‌های GIC هم از نظر قابلیت اطمینان و هم از نظر هزینه تأثیر منفی بر شبکه می‌گذارند. از آنجایی که GIC ها می‌توانند به تجهیزات آسیب رسانده، باعث عملکرد نادرست حفاظت شده و موجب افت ولتاژ سیستم شوند، قابلیت اطمینان شبکه را در معرض خطر قرار می‌دهند. فناوری‌هایی وجود دارند که می‌توان با کمک آن‌ها اثرات ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی بر شبکه قدرت را کاهش داد. استفاده از خازن‌های سری و رله‌های محافظتی دو راه‌کار کلی‌ای بوده‌اند که برای کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی از طرف وزارت انرژی ایالات متحده امریکا پیشنهاد شده‌اند. به‌منظور اعمال تصحیحات در ساختار ترانسفورماتورها، ابتدا سازوکار شارش جریان القایی ژئومغناطیسی در یک ترانسفورماتور به‌طور اختصار مورد بحث قرار می‌گیرد. از آنجایی که فرکانس GIC بین ۰.۰۰۰۱ هرتز تا ۰.۰۱ هرتز است، می‌توان آن را نسبت به فرکانس ۵۰ هرتزی شبکه قدرت یک جریان شبه ایستا در نظر گرفت، نقطه خنثی زمین ترانسفورماتور و خط انتقال یک مسیر گردش را فراهم می‌کنند که GIC از این طریق وارد سیستم شده و در آن جریان می‌یابد. هنگام استفاده از ترانسفورماتور ، یک شار مغناطیسی بایاس در هسته ایجاد می‌شود که به شار مغناطیسی اصلی اضافه

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]



شکل ۳: تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی H، تغییرات GIC محاسبه شده در طوفان مغناطیسی در بازه زمانی ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در زیر خط انتقال پیمنتا- باریرو و در ایستگاه مرجع و dH/dt در ایستگاه مرجع است [۳].

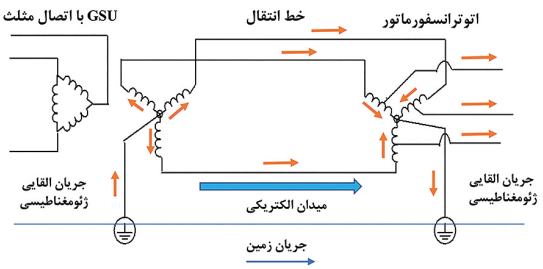


شکل ۴: تغییرات مؤلفه افقی میدان مغناطیسی H، تغییرات GIC محاسبه شده در طوفان مغناطیسی در بازه زمانی ۷ تا ۱۰ نوامبر ۲۰۰۴ در زیر خط انتقال ایتومبیارا- سیمائو سائو و در ایستگاه مرجع و dH/dt در ایستگاه مرجع است [۳].

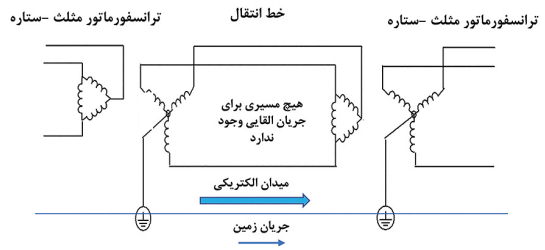
شده و باعث اشباع هسته ترانسفورماتور و اختلال در عملکرد عادی شبکه قدرت خواهد بود. سازوکار چرخش جریان القایی در شکل (۵) نشان داده‌شده است. مطابق شکل GIC از سمت چپ و نقطه خنثی زمینی ترانسفورماتور وارد سیستم شده و از طریق خط انتقال و دیگر ترانسفورماتورها به سمت نقطه خنثی زمینی و در نتیجه داخل زمین شارش می‌یابد[۲۰].

۶-۱- استفاده از طرح خاصی از ترانسفورماتور جهت کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی

طراحی خاصی از ترانسفورماتورها می‌توانند سبب کاهش میزان خسارت‌های وارده شوند. ترانسفورماتورهای اشباع شده علت اصلی اختلاهای ناشی از جریان‌های القایی ژئومغناطیسی در سامانه‌های انتقال برق هستند که با توجه به حساسیت‌های مختلف ترانسفورماتورها، میزان اختلال‌های منتشر شده متفاوت خواهد بود. ترانسفورماتورهای افزاینده نیروگاهی(GSU) و ترانسفورماتورهای کاهنده انتقال به توزیع به‌طور معمول در سمت ولتاژ بالا یک سیم‌پیچ با اتصال ستاره زمین شده و در طرف ولتاژ کم با اتصال مثلث هستند که جریان القایی عبوری از سیم‌پیچ زمین شده ستاره می‌تواند سبب اشباع ترانسفورماتور شود. تقسیم جریان GIC در خطوط انتقال و زمین به سطح GIC در ترانسفورماتورها وابسته است که می‌تواند بر اشباع ناشی از GIC نیز تأثیرگذار باشد. ترانسفورماتورهای با سیم‌پیچ مثلث از اشباع توسط GIC مصون هستند، زیرا سیم‌پیچ‌های مثلث نقطه اتصال به زمین نداشته و در نتیجه GIC نمی‌تواند با عبور از سیم‌پیچ‌ها سبب اشباع ترانسفورماتور شود. با این حال، بخش ولتاژ بالای این ترانسفورماتورها به‌طور عموم به‌صورت مثلث در انتقال استفاده نمی‌شوند. ترانسفورماتورهای سه فاز با طراحی خاص نسبت به سایر طرح‌ها و از آنجایی که برای رسیدن به اشباع نیازمند سطح بالایی از GIC هستند، کمتر مستعد اشباع هستند. شکل (۶) یک خط انتقال را نشان می‌دهد که در سمت چپ اتصال ستاره و در سمت راست اتصال مثلث دارد. از آنجایی که خط انتقال تنها در یک انتها به زمین متصل است، هیچ مسیری برای شارش جریان GIC وجود ندارد. بزرگ‌ترین مشکل با این رویکرد این است که اتوترانسفورماتورهای تک فاز به‌دلیل کارایی بالا و هزینه ساخت کم (با سیم‌پیچ مشترک) بهترین گزینه برای انتقال عمده در ولتاژهای بالا هستند. اتوترانسفورماتورها به‌طور معمول همیشه زمین خنثی هستند تا مشکلات اضافه ولتاژ را محدود کنند. بنابراین، نه تنها یک نقطه خنثی زمین شده برای شارش GIC فراهم می‌کنند، بلکه یک مسیر عبوری برای GIC برای جریان از خط انتقال سمت بالا به خط انتقال سمت پایین یا بالعکس فراهم می‌کنند. حتی اگر از اتوترانسفورماتورها استفاده نشوند، ساختار موجود برای اتصال همیشگی خط انتقال مطابق شکل (۶) شامل اتصال ستاره در یک بخش و اتصال مثلث در بخش دیگر است و قطع اتصال به زمین بر اساس ملاحظات سامانه امکان‌پذیر و یا عملی نیست. به‌عنوان مثال، یک اتصال مثلث- ستاره یک تغییر فاز خاص را معرفی می‌کند و اتصالات ترانسفورماتور باید مطابق با طراحی استاندارد ایجاد شوند تا هم‌فازی بین ولتاژهای مختلف



شکل ۵: مسیر گردش GIC درسامانه برق قدرت [۲۰].



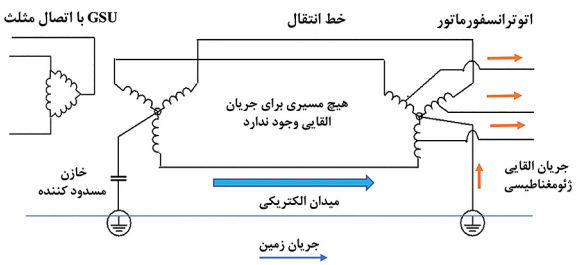
شکل۶: طرح‌واره‌های که نشان میدهد استفاده از اتصال مثلث در انتهای ترانسفورماتور مانع عبور GIC می‌شود [۲۰].

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]

سیستم (برای اتصالات متقابل) برقرار باشد [۲۰].

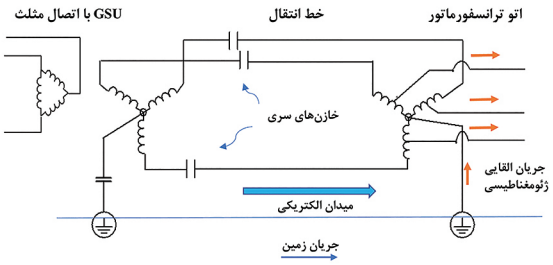
۶-۲- کاهش اثرات جریان القایی با خازن‌های سری

آشکارترین روش برای جلوگیری از ایجاد مشکل در ترانسفورماتورها در طول یک اختلال ژئومغناطیسی، سامانه‌های محدودکننده جریان القایی پیشرفته‌ای هستند که به‌صورت عملی در شبکه آزموده شده‌اند. این روش فناوری خازنی مسدودکننده جریان القایی ژئومغناطیس است که با استفاده از یک خازن برای مسدود کردن جریان القایی شبه ایستای دی‌سی کار می‌کند. علاوه بر جریان دی‌سی، جریان‌های شبه استاتیک و همچنین کم فرکانس نیز قادر به عبور از یک خازن نبوده و به طور مؤثری شارش این جریان‌ها را مسدود می‌کنند. این روش ممکن است به علت نیاز به تعویض چند باره هر خازن در طول یک سال مقرون به صرفه نباشد، در صورتی‌که استفاده از خازن‌های سری توان بیشتری را در خطوط انتقال جابه‌جا کرده و ممکن است استفاده از آن‌ها برای خدمات شهری حتی بدون در نظر گرفتن تأثیر احتمالی GIC مورد استقبال بیشتری قرار بگیرد. ولی مزیت اصلی این فناوری نیز نسبت به خازن‌های سری این است که فقط یک خازن مسدودکننده خنثی به جای سه خازن سری در هر ترانسفورماتور مورد نیاز است (یک خازن برای هر سه فاز جداگانه در خطوط انتقال). طرحی از نحوه اتصال یک خازن در بخش اتصال زمین در شکل (۷) آورده شده است. از ویژگی‌های الکتریکی خط انتقال توان هوایی یک سلف القایی سری و یک خازن شنت است که در طول آن توزیع شده‌اند. سلف القایی سری که با افزایش طول خط افزایش می‌یابد به‌طور چشم‌گیری قادر است مقدار توانی که می‌تواند در میان رسانا شارش پیدا کند را محدود نماید. در واقع از خازن‌های سری می‌توان برای بهبود قابلیت انتقال توان خطوط انتقال طولانی از طریق افزایش انتقال توان اکتیو با حفظ ثبات ولتاژ خط استفاده کرد. خازن‌های سری تلفات توان راکتیو که برای حفظ ولتاژ و همچنین میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی خطوط انتقال لازم است را جبران می‌کنند[۲۰]. در واقع این امر شامل حذف یکی از دو اتصال زمین خنثی در دو انتهای خط انتقال است. با اعمال این گزینه‌ها GIC ها نمی‌توانند از ترانسفورماتور عبور کنند و مشکلات ناشی از اشباع نیم‌چرخه- مانند هماهنگ‌ها، گرمایش و مصرف VAR- حذف می‌شوند.



شکل ۷: برای مسدود کردن GIC، خازن مسدودکننده در اتصال زمین خنثی وارد شده است [۲۰].

با این‌که خازن‌های سری سبب مسدود شدن GIC در سیستم می‌شوند با این حال، باید در قرار دادن خازن‌های سری در سیستم انتقال قدرت الکتریکی دقت شود زیرا مسدود شدن GIC در یک قسمت از شبکه می‌تواند بر جریان GIC در بخش‌های دیگر سیستم انتقال قدرت تأثیرگذار باشد. بنابراین لازم است ابتدا تأثیر نصب خازن‌های سری در یک بخش بر سایر بخش‌های سیستم انتقال قدرت ارزیابی شود. شکل (۸) طرحی از نحوه قرارگیری خازن‌های سری در سامانه را نشان می‌دهد. خازن‌های سری با مهندسی مناسب می‌توانند این القایی سری را جبران کرده و ظرفیت انتقال قدرت خط را افزایش دهند. با توجه به قیمت بالای خازن‌های سری تصمیم برای نصب این خازن‌ها زمانی گرفته می‌شود که مزیت قابلیت افزایش توان، هزینه صرف شده جهت انجام آن را جبران کند. نصب خازن‌ها نیازمند سازه‌های بزرگ، گران‌قیمت و عایق ولتاژ بالا هستند. برای خازن‌های سری، مسائل اصلی؛ امپدانس خط، امپدانس بار و پایداری سیستم (به دلیل رزونانس) می‌باشند.



شکل ۸: جبران سازی سری (خازن‌ها) مسیر CIG را قطع می‌کند [۲۰].

۶-۳- کاهش اثرات جریان القایی ژئومغناطیسی با رله‌های حفاظتی

یکی از روش‌های حفاظت از سیستم استفاده از رله‌های حفاظتی الکترومکانیکی با محافظ‌های مبتنی بر ریزپردازنده‌ها جهت نظارت بر سیستم در راستای کاهش پیامدهای ناشی از رفتار غیرمتعارف است. وقتی خطایی در سیستم تشخیص داده می‌شود، اجزای معیوبی که شامل ترانسفورماتورها نیز هستند، از سیستم خارج می‌شوند. معیار خارج کردن یک ترانسفورماتور شامل تشخیص خطای داخلی است که امکان دارد طی افزایش سریع فشار گاز در مخزن ترانسفورماتور روی دهد. وقتی ترانسفورماتورها اشباع می‌شوند، جریان‌هایی با فرکانسی متفاوت از فرکانس اصلی (آلودگی هارمونیکی) تولید می‌کنند که می‌تواند منجر به عملکرد نادرست یا نامطلوب رله‌های حفاظتی شده و در زمان پشتیبانی ولتاژ بحرانی سیستم به طور ناخواسته تجهیزات کلیدی را از سیستم جدا کند. در نتیجه ممکن است ایمنی کاهش یافته و با نزدیک کردن سیستم به نقطه فروپاشی ولتاژ، به‌طور بالقوه نیروی الکتریکی از دسترس خارج شود. با این وجود امروزه ترانسفورماتورها به‌علت پیش‌بینی خسارت‌هایی که ممکن است توسط آشکار شدن سطوح مختلفی از جریان‌های القایی ژئومغناطیسی روی دهند، از سیستم خارج نمی‌شوند. ولی اگر بتوان از امکانات قابل اعتمادی برای تشخیص و جداسازی ترانسفورماتورهای در معرض خطر، قبل از ایجاد صدمه شدید از طریق GIC استفاده کرد، سناریوهای فاجعه‌بار طولانی مدت بهبود خواهند یافت. استفاده نکردن درست از رله‌های حفاظتی الکترومکانیکی، عامل اصلی خاموشی ناشی از اختلالات ژئومغناطیسی سال ۱۹۸۹درهیدروکبک کانادا بود.

۶-۴- تصحیحات اعمال شده در راستای خرابی‌های شبکه قدرت هیدرو-کبک

پس از رویداد مارس ۱۹۸۹شرکت هیدرو-کبک متعهد شد طی انجام یک سری بررسی‌ها، تعدادی تغییرات را اعمال کند. در تغییرات اعمال شده موارد زیر به‌طور ویژه مد نظر قرار گرفتند.

- مشخص شد که SVCها می‌توانند تأثیرات GIC را مدیریت کنند، اما تنظیمات اجازه محافظت را به آن‌ها نمی‌دهد. بنابراین

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]

تنظیمات سیستم حفاظتی SVC تغییر کرد. اگر تنظیمات در زمان رویداد GIC در سطوح جدید بود، هیچ یک از SVCها خاموش نمی‌شد.

- دو SVC اضافه شد که تعداد کل SVCهای نصب شده در سیستم را به ۱۱عدد رساند.
- مشخص شد که سیم‌پیچ‌های ترانسفورماتورهای بزرگ قدرت بیش از حد انتظار در برابر جریان DC مقاوم بودند. آزمایش‌ها نشان داد که جریان DC ترانسفورماتورها را گرم می‌کند، اما آسیب‌پذیرترین قسمت مربوط به صفحه اتصال است. صفحه اتصال یک قطعه مکانیکی به نسبت ساده است که می‌تواند از مواد غیرمغناطیسی ساخته شود.
- طرحی برای مسدود کردن جریان DC در ترانسفورماتورهای خنثی ایجاد و یک پایلوت نصب شد. با این حال، ممکن است نیاز به چنین طرحی نباشد، زیرا هیدروکبک خازن‌های جبرانی سری را در بیشتر خطوط طولانی در شبکه ۷۳۵ کیلوولتی نصب کرده است.

باید دقت داشت که تحقیقات انجام شده در هیدروکبک نشان داد که راستای شرق به غرب جهت مورد علاقه برای حرکت الکتروجت‌ها (جریان‌های عرض‌های جغرافیایی بالا ناشی از CME ها) است. بنابراین راستای شرق به غرب برای جهت‌گیری خطوط برق مطلوب نخواهد بود. خطوط شرق به غرب در لاگرانده خطوط کم ولتاژ و به نسبت کوتاه هستند. بر اساس این درک، هیدروکبک بیشتر خطوط طولانی‌تر را در راستای شمال به جنوب در شبکه قدرت ایجاد کرد.

دستورالعمل‌های زیر برای راه‌اندازی سیستم در طول یک رویداد CME ایجاد شده است:

- به جای تکیه بر انتقال قدرت بزرگ، تولید به طور یکنواخت پخش شود.
- اگر یک ژنراتور از بین رفت، ذخیره چرخشی برای پاسخ سریع افزایش یابد.
- تا حد امکان خطوط زیادی در شبکه به کار گرفته شود.
- کاهش جریان در خطوط انتقال به سطوح کمتر از ظرفیت نامی آن‌ها.
- تغییر وضعیت حفاظت SVC به «حالت هشدار» و عدم اجازه خاموشی.
- کاهش عملیات سوئیچینگ تا حد امکان.

در طی طوفان ژئومغناطیسی سال ۱۹۸۹ تجربه‌های زیر به دست آمدند:

- به محض شروع به کار سیستم حفاظتی، رویدادها به سرعت در شبکه منتشر می‌شوند.
- سامانه‌های حفاظتی برای محافظت از تجهیزات ساخته شده‌اند، اما عموماً برای مقابله با اختلالات بزرگ مفید نبوده‌اند.
- انتشار اختلالات می‌تواند ناشی از اقدامات سیستم حفاظتی باشد که می‌تواند درست در نظر گرفته شده باشد. به علت فعال بودن سیستم حفاظتی، هیچ خرابی ناشی از GIC وجود نداشت [۱۴].

۶-۵- تجزیه و تحلیل ۱۰۰ ساله خطر ژئوالکتریک برای شبکه قدرت فشارقوی ایالات‌متحده

بعد از رویداد مارس ۱۹۸۹در کبک کانادا برای شبکه قدرت فشارقوی ایالات متحده امریکا یک نقشه مخاطرات ژئوالکتریکی در هر قرن تهیه می‌شود. بدین منظور طی یک برون‌یابی آماری از ۳۱ سال اندازه‌گیری میدان مغناطیسی که با شاخص‌های ژئومغناطیسی انجام شد، ۸۴ طوفان ژئومغناطیسی شناسایی شدند. در راستای تهیه این نقشه داده‌های ۲۴ رصدخانه ژئومغناطیسی، ۱۰۷۹ سایت بررسی مگنتوتلوریک و ۱۷۲۵۸ خط انتقال برای انجام تجزیه و تحلیل خطر ژئوالکتریک با جامع‌ترین داده‌های در دسترس، مورد استفاده قرار گرفتند. هزاران خط انتقال فشار قوی در ایالات متحده یک ارتباط ستون فقراتی برای انتقال برق ایجاد می‌کنند که در اینجا مطالعه انجام شده به محاسبه ولتاژهای تنظیم شده در خطوط انتقال توسط میدان‌های ژئوالکتریک القایی محدود شده است. این ولتاژها با اتصال مستقیم خطوط انتقال به زمین در پست‌ها ایجاد می‌شوند. همراه با توپولوژی شبکه و وضعیت عملکرد شبکه، از این ولتاژها می‌توان برای تخمین مقدار جریان‌های القای ژئومغناطیسی استفاده کرد. در این مطالعه سری‌های زمانی میدان‌های ژئومغناطیسی و ژئوالکتریکی و تفاوت‌های دقیقی که در هنگام مقایسه داده‌های واقعی با تجزیه و تحلیل‌های یک طرفه ایجاد شده بودند مورد بررسی قرار گرفتند. سپس همان روش‌ها برای همه ۱۰۷۹ ایستگاه مغناطیسی تلوریک در سراسر ایالات متحده به کار برده شد تا یک سری زمانی منحصربه‌فرد در هر مکان به‌ازای روش مطالعاتی SECS خاص تولید شود. برای هر سری زمانی، بیشینه بزرگی میدان ژئوالکتریک را در طول طوفان برای تجزیه و تحلیل بیشتر انتخاب کردند. توزیع جغرافیایی بردارهای ژئوالکتریک را می‌توان با هندسه شبکه انتقال برای محاسبه ولتاژ خطوط انتقال ترکیب کرد. با استفاده از روش دلونی میدان الکتریکی را در نقاط متعدد مشخص شده در امتداد خط انتقال (E_{line}) و با در نظر گرفتن وزن‌ها بر اساس فاصله از نقطه مورد نظر تا سه میدان الکتریکی اطراف سایت محاسبه کرده و سپس با انتگرال‌گیری از میدان الکتریکی در امتداد هندسه خط انتقال، ولتاژ در خط انتقال محاسبه می‌شود (معادله ۱)،

$$V_{line} = \int_G E_{line}.\,dl \qquad (۱)$$

ولتاژ خط انتقال به دلیل ادغام میدان الکتریکی در طول کل مسیر پیچیده خط بین دو اتصال، به شدت به طول خطوط انتقال وابسته است. این به طور بالقوه می‌تواند خطر ناشی از میدان‌های ژئوالکتریک را پنهان کند. برای بهتر نشان دادن خطر مورد نظر، این ولتاژها را بر طول خط انتقال تقسیم می‌شود تا یک میدان الکتریکی متوسط برای هر خط انتقال به‌دست آید،

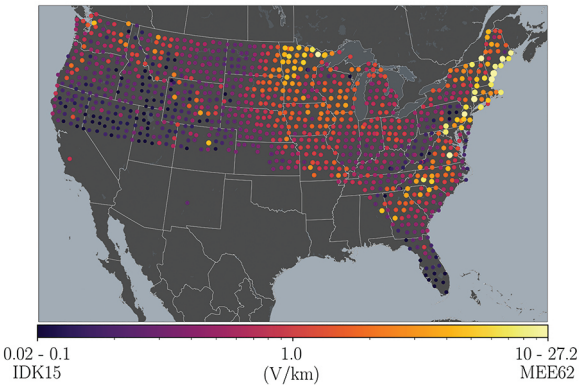
$$\overline{E}_{line}(t) = \frac{V_{line}}{L_{line}}, \qquad (۲)$$

شکل (۹) مقادیر تخمینی میدان ژئوالکتریک را در ۱۰۷۹ سایت مگنتوتلوریک که در سراسر ایالات‌متحده پخش شده‌اند و امکان رویداد آن یک بار در یک قرن وجود دارد را نشان می‌دهد. تحقیقات منطقه‌ای نزدیک به رصدخانه‌های ژئومغناطیسی نشان می‌دهد که علم زمین‌شناسی تأثیر زیادی در تعیین خطرات ژئوالکتریک در مناطق کوچک ایفا می‌کند. بزرگ‌ترین میدان ژئوالکتریک تخمین زده شده که یک بار در هر قرن می‌تواند روی دهد، ۲/۲۷ ولت بر کیلومتر در سایتی واقع در مین (MEE62) و کم‌ترین میدان ژئوالکتریک تخمین زده شده ۰/۰۲ ولت بر کیلومتر در سایتی واقع در آیداهو (IDK15) است[۲۱].

۶-۶- ارائه الگوریتمی جهت تقویت شبکه قدرت در برابر خطرات طوفان‌های ژئومغناطیسی در روسیه

در پژوهشی که در روسیه در سال ۲۰۱۸ انجام گرفت، تجسم گرافیکی از آسیب‌پذیری شبکه قدرت یکپارچه در سیبری در برابر اختلالات ژئومغناطیسی شدید ارائه شد. در این راستا الگوریتمی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]



شکل۹: پیش‌بینی رویداد طوفان ژئومغناطیسی شدید یک‌بار در قرن از میدان ژئوالکتریک اندازه‌گیری شده در سایت‌های مگنوتتلوریک در ایالات‌متحده امریکا. مناطق با خطر بالا و کم در سراسر کشور وجود دارند که پیچیدگی ژئوالکتریک ایالات‌متحده را نشان می‌دهد [۲۱].

ارائه شد تا بتوان میزان آسیب‌پذیری شبکه قدرت از طوفان‌های ژئومغناطیسی را تخمین بزند. پارامترهای بحرانی که میزان مقاومت شبکه در برابر اختلالات ژئومغناطیسی را تعیین می‌کنند به چهار بخش اساسی تقسیم شدند:

- **پارامترهای GMD:** نوع GMD، رسانایی زمین و احتمال ظهور آثار GMD در شبکه
- **پارامترهای شبکه قدرت:** ساختار، سطح ولتاژ، وضعیت سیستم قدرت و موقعیت جغرافیایی
- **پارامترهای تجهیزات سیستم برق قدرت:** سطح ولتاژ، نوع تجهیزات، طرح ساخت و ویژگی‌های جداسازی
- **آگاهی:** آگاهی اجتماعی و پیش‌بینی

مراحل الگوریتم ارائه شده برای ارزیابی اولیه آسیب‌پذیری شبکه قدرت در برابر GMD در شکل (۱۰) آورده شده است. در مرحله اول، باید داده‌های مربوط به شبکه قدرت جمع‌آوری و تجزیه و تحلیل شوند. این داده‌ها اطلاعاتی در مورد تجهیزات نصب شده و موقعیت جغرافیایی آن‌ها، توپولوژی شبکه، سطوح ولتاژ و طول خطوط انتقال و رسانایی زمین در منطقه مورد مطالعه را پوشش می‌دهد. مرحله دوم نیازمند تجزیه‌وتحلیل داده‌های خرابی شبکه، از جمله طبقه‌بندی علت‌های خرابی است. خرابی‌های ناشی از دلایل فنی غیر مشخص می‌توانند به‌صورت بالقوه ناشی از یک GMD باشند. همبستگی خرابی‌ها (ناشی از دلایل فنی نامشخص) با بالا در مرحله سوم انجام می‌گیرد. اگر چنین همبستگی‌ای آشکار شد، مطالعه دقیق استحکام شبکه قدرت خاص نسبت به GMD مورد نیاز است. اگر چنین همبستگی‌ای آشکار نشد یا قابل تعریف نبود، باید گام چهارم حذف شود. مرحله چهارم شامل بررسی سطوح ولتاژ تجهیزات سیستم قدرت نصب شده است. اگر شبکه قدرت شامل گره‌هایی باشد که تجهیزاتی با سطح ولتاژ بالاتر از ۲۲۰ کیلوولت در آن‌ها نصب شده باشند، انجام مرحله پنجم ضروری است. اگر سطوح ولتاژ تمام تجهیزات نصب شده کمتر از ۲۲۰ کیلوولت باشد، مطالعه دقیقی لازم نیست و می‌توان نتیجه گرفت که این شبکه قدرت خاص در برابر اثرات GMD مقاوم است. در مرحله پنجم باید بررسی کرد که آیا ترانسفورماتورهای قدرت تک‌فاز یا سه‌فاز پنج‌پایه در شبکه نصب شده‌اند یا خیر. اگر تجهیزات ثبت GIC در بخش‌های خنثی ترانسفورماتور قدرت آسیب‌پذیر نصب شده باشند، بررسی دامنه‌های اندازه‌گیری شده GIC باید در مرحله ششم انجام شود. اگر سطوح GIC از مقدار آستانه فراتر رود، مطالعه دقیق مورد نیاز است. مقدار آستانه توسط تولیدکننده ترانسفورماتور قدرت تعریف می‌شود و برای هر مورد یک مقدار منحصربه‌فرد دارد. از آنجایی‌که توپولوژی شبکه نقش مهمی در تعیین آسیب‌پذیری شبکه قدرت دارد، بنابراین، گام هفتم شامل بررسی مکان‌های تجهیزات بالقوه آسیب‌پذیر در شبکه است. اگر خطوط انتقال بیش از ۵۰ کیلومتر به گره‌های بالقوه آسیب‌پذیر متصل شوند، باید تحقیقات بیشتری انجام شود. مرحله هشتم، بازرسی بیشتر از ویژگی‌های شبکه، جستجوی خطوط انتقال را که در آن دستگاه‌های جبران توان راکتیو نصب شده‌اند، پوشش می‌دهد. با این کار با به کمینه رساندن کسری توان راکتیو ناشی از اشباع ترانسفورماتور قدرت که از GIC ناشی می‌شود، به حفظ سطح ولتاژ در محدوده مجاز کمک خواهد شد. اثر دیگری که باید بررسی شود، خازن‌های سری نصب شده در خطوط انتقال هستند که از منظر GIC به صورت قطع مدار عمل می‌کنند. در مرحله آخر (مرحله ۹)، داده‌های مربوط به رسانایی زمین در منطقه خلاصه می‌شوند. شبکه‌های برق واقع در مناطق با پوسته مقاومت بالا دارای خطرات بالاتری هستند[۲].

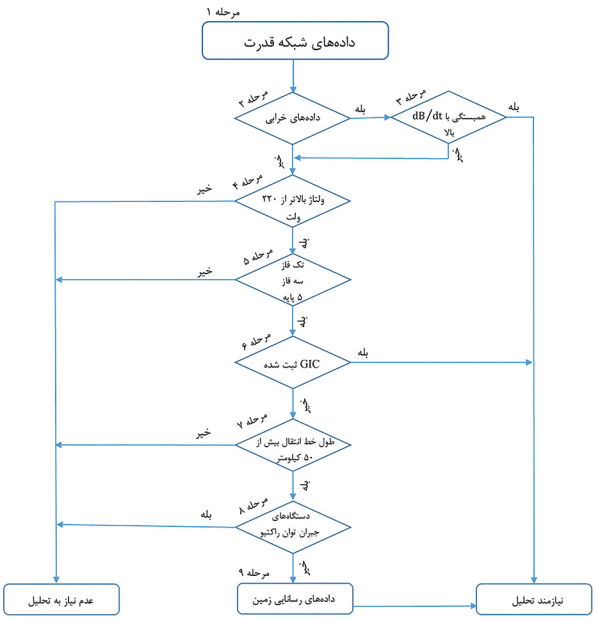
۶-۷- شبیه‌سازی اختلالات ژئومغناطیسی ناشی از طوفان‌های مغناطیسی خورشید و پیش‌بینی تاثیر آنها در شبکه‌های قدرت

پژوهشی با عنوان همین بخش توسط صفری و همکاران و تحت حمایت صندوق حمایت از پژوهشگران ریاست جمهوری و با شماره طرح ۹۳۰۴۳۷۰۱ انجام شد. در این طرح طی محاسبات تحلیلی و عددی ابتدا پارامترهای یک باد خورشیدی دوشارهای سریع در نزدیکی جو زمین محاسبه شد[۲۱]. با در دست داشتن دما و شدت میدان مغناطیسی شاره خورشیدی در نزدیکی جو زمین و نیز شرایط آرام مغناطیسی جو زمین، برهم‌کنش جو زمین با باد خورشیدی ورودی در کد شبیه‌سازی پلوتو شبیه‌سازی شد. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده اختلال ۲/۲ نانوتسلایی در میدان مغناطیسی زمین بود.

۷- نتایج

در توسعه و حفظ سامانه‌های برق ملی باید در نظر گرفت که طوفان‌های ژئومغناطیسی یک خطر واقعی برای توسعه و حفظ سامانه‌های تولید و انتقال برق در هر کشوری هستند و می‌توانند آسیب‌های اساسی را هم به شبکه قدرت و هم به سایر زیرساخت‌های حیاتی وارد کنند که در صورت عدم مدیریت صحیح، پیامدهای مخرب اقتصادی و اجتماعی شدید با خود به همراه خواهند داشت. بنابراین، تجزیه و تحلیل با استفاده از ابزارهای مختلف ریاضی و آماری و اینکه تا چه حد زیرساخت انرژی ایران تحت تأثیر نتایج آب و هوای فضایی قرار دارد، بسیار مهم است. شایان ذکر است که تحلیل سری زمانی بیشتر در مطالعات مسائل آب‌وهوای فضایی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رویدادهای ثبت شده در مناطق مختلف جغرافیایی نشان داد که مقدار GIC تولید شده در شبکه‌های برق قدرت بیشتر از آن‌که تابع میزان تغییرات اندازه میدان ژئومغناطیسی باشد به تغییرات زمانی این رویداد وابسته است. در مناطقی با عرض جغرافیایی بالا، آسیب‌هایی به ترانسفورماتورهای قدرت گزارش شده است که در آن تغییرات ژئومغناطیسی زمان طوفان بسیار سریع و بزرگ بوده است (بزرگتر از ۱۰۰۰ نانو تسلا) و از این‌رو GIC هایی به بزرگی و یا بیشتر از ۱۰۰ آمپر در پایان طوفان از سیم‌پیچ ترانسفورماتورهای قدرت جریان می‌یابند. در کشورهایی با عرض‌های جغرافیایی پایین همانند ژاپن (۲۰ تا ۴۵ درجه‌ی شمالی) نیز اختلالاتی در شبکه قدرت به ثبت رسیده است که گواهی بر عدم وابستگی

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]



شکل ۱۰: الگوریتمی برای یافتن گلوگاه‌های شبکه قدرت برای تأثیر منفی اختلالات ژئومغناطیسی [۲].

محض GMD به موقعیت جغرافیایی است. کشورهایی که پیش‌تر اثرات در عرض‌های جغرافیایی پایین داشتند، دارای تغییرات ژئومغناطیسی ضعیف‌تر هستند و از این رو به‌طور معمول در آنجا مقادیر GIC بسیار کوچک‌تر گزارش می‌شوند. با این حال، جریان GICها و اثرات آن‌ها بر ترانسفورماتورهای قدرت فرآیندهای پیچیده‌ای هستند و ارزیابی دقیق حتی در چنین مناطقی با عرض جغرافیایی کم مورد نیاز است.

۸- سپاسگزاری

نویسندگان این مقاله از حمایت پژوهشگاه فضایی ایران از طرح پژوهشی مرتبط با این مقاله با شماره سند ۱۰۰/۱۶۲/م تشکر می‌نمایند.

۹- مراجع

[1] Marusek, J. A. (2007). Solar storm threat analysis. J. Marusek.
[2] Sokolova, O., Burgherr, P., Sakharov, Y., & Korovkin, N. (2018). Algorithm for analysis of power grid vulnerability to geomagnetic disturbances. Space Weather, 16(10), 1570-1582.
[3] Trivedi, N. B., Vitorello, Í., Kabata, W., Dutra, S. L., Padilha, A. L., Bologna, M. S., ... & Viljanen, A. (2007). Geomagnetically induced currents in an electric power transmission system at low latitudes in Brazil: A case study. Space Weather, 5(4).
[4] Watari, S. (2015). Estimation of geomagnetically induced currents based on the measurement data of a transformer in a Japanese power network and geoelectric field observations. Earth, Planets and Space, 67(1), 1-12.
[5] Fujii, I., Ookawa, T., Nagamachi, S., & Owada, T. (2015). The characteristics of geoelectric fields at Kakioka, Kanoya, and Memambetsu inferred from voltage measurements during 2000 to 2011. Earth, Planets and Space, 67(1), 1-17.
[6] Shinichi, W., & Kumar, S. (2021). Prediction of geomagnetically induced currents (GICs) flowing in Japanese power grid for Carrington-class magnetic storms. Earth, Planets and Space (Online), 73(1).
[7] Gonzalez, W. D., Tsurutani, B. T., & De Gonzalez, A. L. C. (1999). Interplanetary origin of geomagnetic storms. Space Science Reviews, 88(3), 529-562.
[8] Hynes, B. J. (2016). The effects of geomagnetic disturbances on electric power systems (Doctoral dissertation, The University of Wisconsin-Milwaukee).
[9] Priest, Eric. Magnetohydrodynamics of the Sun. Cambridge University Press, 2014
[10] Bolduc, L., Langlois, P., Boteler, D., & Pirjola, R. (1998). A study of geoelectromagnetic disturbances in Quebec. I. General results. IEEE Transactions on Power Delivery, 13(4), 1251-1256.
[11] Viljanen, A. (1997). The relation between geomagnetic variations and their time derivatives and implications for estimation of induction risks. Geophysical research letters, 24(6), 631-634.
[12] Kappenman, J. G. (2005). An overview of the impulsive geomagnetic field disturbances and power grid impacts.
[13] Daglis, I. A. (2006). Ring current dynamics. Space Science Reviews, 124(1), 183-202.
[14] Kirkham, H., Makarov, Y. V., Dagle, J. E., DeSteese, J. G., Elizondo, M. A., & Diao, R. (2011). Geomagnetic storms and long-term impacts on power systems (No. PNNL-21033). Pacific Northwest National Lab.(PNNL), Richland, WA (United States).
[15] Bolduc, L. (2002). GIC observations and studies in the Hydro-Québec power system. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 64(16), 1793-1802.
[16] Wik, M., Pirjola, R., Lundstedt, H., Viljanen, A., Wintoft, P., & Pulkkinen, A. (2009, April). Space weather events in July 1982 and October 2003 and the effects of geomagnetically induced currents on Swedish technical systems. In Annales Geophysicae (Vol. 27, No. 4, pp. 1775-1787). Copernicus GmbH.
[17] Gil, A., Modzelewska, R., Moskwa, S., Siluszyk, A., Siluszyk, M., Wawrzynczak, A., & Zakrzewska, S. (2019). Does time series analysis confirms the relationship between space weather effects and the failures of electrical grids in South Poland?. Journal of Mathematics in Industry, 9(1), 1-16.
[18] Watari, S., Kunitake, M., Kitamura, K., Hori, T., Kikuchi, T., Shiokawa, K., ... & Tsuneta, Y. (2009). Measurements of geomagnetically induced current in a power grid in Hokkaido, Japan. Space Weather, 7(3).
[19] Liu, C., Li, Y., & Pirjola, R. (2014). Observations and modeling of GIC in the Chinese large-scale high-voltage power networks. Journal of Space Weather and Space Climate, 4, A03.
[20] Monitoring and Mitigation of Geomagnetically Induced Currents. EPRI, Palo Alto, CA: 20081015938 .
[21] Lucas, G. M., Love, J. J., Kelbert, A., Bedrosian, P. A., & Rigler, E. J. (2020). A 100-year geoelectric hazard analysis for the US high-voltage power grid. Space Weather, 18(2), e2019SW002329.
[22] Taran, S., Safari, H., & Daei, F. (2019). Kappa-Maxwellian electrons and Bi-Maxwellian protons in a two-fluid model for fast solar wind. The Astrophysical Journal, 882(2), 157.

***

[Downloaded from kiaeee.ir on 2026-02-07]