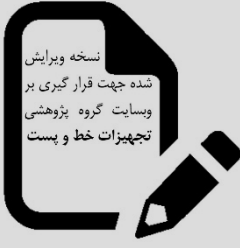




# وزارت نیرو پژوهشگاه نیرو

بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی تجهیزات خط و پست / سال سوم / شماره ۱۱ / زمستان ۹۷



دستگاه هیبریدی  
ضدگالوپینگ خطوط  
انتقال شامل سیستم  
هیستریزیس و تنظیمگر  
پاندولی

آینده پژوهی فناوری  
کلیدهای قدرت فشارقوی  
با تکنولوژی عایق  
CO2 و ترکیبات آن



معرفی کتاب اتصال  
انرژی بادی به شبکه‌های  
ضعیف با استفاده از  
تکنولوژی HVDC



# به نام خدا

## سال سوم / شماره ۱۱ / زمستان ۹۷

اعضای هیئت تحریریه:

مجتبی گیلوانژاد، آرمان صفایی، پژمان خزایی،  
مصطفی گودرزی، علی کدیور، امیرحسین  
محمدزاده نیاکی، هادی نوروزی

### اهداف و رویکرد:

«بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی تجهیزات  
خط و پست» با هدف ایجاد بستر مناسب برای  
تبادل اطلاعات مربوط به تجهیزات خط و پست به  
صورت داخل پژوهشگاهی منتشر می شود.  
این مجموعه از هرگونه پیشنهاد یا انتقاد برای  
هرچه بهتر شدن مطالب استقبال می کند و استفاده  
از مطالب آن با ذکر منبع بلامانع است.  
مسئولیت مطالب، مقالات و پژوهش های درج  
شده بر عهده نویسندگان است.



## گروه پژوهشی تجهیزات خط و پست

صاحب امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیرمسئول: مجتبی گیلوانژاد

سر دبیر و مدیر اجرایی: هادی نوروزی

گرافیسیت و صفحه آرا: هادی نوروزی

ویرایش نسخه اینترنتی: مصطفی گودرزی

ویراستار: هادی نوروزی، آرمان صفایی

عکس روی جلد: هادی نوروزی

همکاران این شماره:

مجتبی گیلوانژاد، آرمان صفایی، مصطفی  
گودرزی، علی کدیور، امیرحسین محمدزاده  
نیاکی، پژمان خزایی، هادی نوروزی

همکاران گروه:

مجتبی گیلوانژاد، فرشید منصوربخت، پژمان  
خزایی، مصطفی گودرزی، آرمان صفایی، هادی  
نوروزی، علی کدیور و امیرحسین محمدزاده  
نیاکی

همکاران معاونت پژوهشی:

مسعود حسنی مرزونی، نوشین فرودی

ناشر:

تهران، شهرک غرب، انتهای پونک باختری،  
پژوهشگاه نیرو، گروه تجهیزات خط و پست

پست الکترونیکی: [hnorouzi@nri.ac.ir](mailto:hnorouzi@nri.ac.ir)

تلفن: ۰۲۱-۸۸۵۹۰۱۷۳

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۵۷۴۷۸۶

• سخن سردبیر	۱
• آینده پژوهی فناوری کلیدهای قدرت فشارقوی با تکنولوژی عایق CO <sub>2</sub> و ترکیبات آن	۲
• ثبت اختراع	۶
• تازه‌های نشر	۱۹

## سخن سردبیر

سپاس خداوند را که هستی، نام از او یافت و خرد را بی میانجی حکمت آموخت تا او را بشناسیم که شناخت او، از شناخت خود و دنیای اطراف خود شروع می شود.

بدون شک یکی از ویژگی های عصر حاضر این است که نشر و تبادل اطلاعات همزمان با پیشرفت تکنولوژی و فناوری در زمینه های مختلف علمی، با سرعت زیاد در حال انجام است. در مورد سیستم های قدرت و تجهیزات مرتبط با آن نیز چه در زمینه تکنولوژی و چه در زمینه پژوهش ها و خدمات انجام یافته، تغییرات رو به جلو بوده و پیشرفت های زیادی در مراحل مختلف تولید تا توزیع و مصرف برق، شکل گرفته است. تجهیزات و فعالیت های مربوط به خط و پست نیز از این مقوله مستثنی نبوده و با توجه به اهمیت فراوان آن، در کارایی سیستم قدرت نقش بسزایی دارد.

پروژه ها و تحقیقات انجام شده در گروه پژوهشی تجهیزات خط و پست پژوهشگاه نیرو، همواره در مسیر پیشرفت و در سطح فعالیت های پیشرو در دنیا می باشد. با توجه به اهمیت نشر و تبادل اطلاعات سعی شده است که این نشریه پژوهشی از انواع فعالیت های پژوهشی و تخصصی انجام شده در گروه باشد تا بتوان با استفاده از نشر این فعالیت ها در قالب گزارشات و مقالات، ارتباط مناسبی با گروه های مختلف داخل پژوهشگاه و همچنین سایر مراکز علمی و تحقیقاتی مثل دانشگاه ها برقرار کرد.

### هادی نوروزی

گروه پژوهشی تجهیزات خط و پست

## آینده پژوهی فناوری کلیدهای قدرت فشارقوی با تکنولوژی عایق CO2 و ترکیبات آن

👤 مدیر پروژه: علی کدیور

به دلیل تجدید ساختار بازارهای برق، قابلیت اطمینان، پایداری و در دسترس پذیری سیستم‌های قدرت، به منظور افزایش رقابت در بازارهای برق می‌بایست افزایش یابد. جهت افزایش این جنبه‌ها، سیستم‌های قدرت باید با کمترین تعداد حالات عملکرد غیرطبیعی بهره‌برداری شوند و همان تعداد کم نیز باید به سرعت مرتفع شوند. بنابراین، کلیدهای فشارقوی، که به منظور قطع شرایط خطا طراحی شده‌اند، نقشی بسیار مهم در سیستم‌های قدرت در طول ۱۰۰ سال اخیر (از زمان معرفی اولین کلید روغنی) ایفا کرده‌اند. محفظه قطع، مکانیزم عملکرد (مکانیزم فرمان)، مقره‌ها و اجزاء جانبی بخش‌های اصلی یک کلید قدرت هستند. در حال حاضر، کلیدهای فشارقوی، به منظور کاربردهای گوناگونی چون: کلید زنی خازن‌ها، اتصال خط، کلید زنی راکتور موازی، کلید زنی ترانسفورماتور و حفاظت ژنراتور در شبکه‌های قدرت مورد استفاده قرار می‌گیرند. امروزه در سطوح فشارقوی استفاده از کلیدهای کم روغن و کلیدهای با حجم روغن زیاد، به دلایل فنی و اقتصادی منسوخ شده اما کلیدهای SF6 به وفور مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این کلیدها گاز SF6 به عنوان عایق بین قطعات مختلف و همچنین به عنوان خاموش‌کننده قوس به کار می‌رود.

در کلیدهای SF6 از گاز سولفور هگزا فلوراید (SF6) به عنوان ماده خاموش‌کننده جرقه و عایق بین دو کنتاکت در حالت باز بودن کلید استفاده می‌شود. گاز SF6 و خواص آن در دهه ۲۰ قرن بیستم میلادی کشف شدند اما به کارگیری آن به عنوان ماده عایقی در کلیدهای قدرت مربوط به دهه ۴۰ قرن بیستم می‌شود. این در حالی است که کلیدهای قدرت با عایق SF6 اولین بار در دهه ۶۰ قرن بیستم میلادی وارد بازار شدند. گاز SF6 از مزایای فوق‌العاده‌ای برخوردار بوده که چند مورد آن به شرح زیر می‌باشد.

👉 از نظر سطح عایقی گاز SF6 بسیار عالی می‌باشد. در فشار یک اتمسفر تقریباً ۳ برابر بیشتر از هوا

تحمل الکتریکی داشته و در فشارهای بالاتر این تفاوت بیشتر می‌شود.

👉 از نظر هدایت حرارتی بسیار خوب بوده و به خاموش شدن جرقه کمک می‌نماید.

گاز SF6 الکترون‌های آزاد را جذب می‌نماید و ایجاد یون منفی بدون تحرک می‌کند در نتیجه مانع ایجاد ابر بهمنی الکترون‌ها که باعث شکست عایق و ایجاد جرقه می‌شود، می‌گردد. در اثر حرارت زیاد خاصیت خود را از دست نمی‌دهد.

از نظر شیمیایی باثبات بوده و میل ترکیبی آن خیلی کم است و در اثر جرقه‌های ایجادشده در کلید تغییر ماهیت نمی‌دهد. غیرقابل اشتغال و غیر سمی می‌باشد.



علی‌رغم تمام مزایای ذکر شده در بالا، گاز SF6 به عنوان یک تهدید زیست محیطی می‌باشد و در صورت نشت این گاز از محفظه کلید و یا کنتاکت‌ها موجب گرم شدن زمین به جهت گلخانه‌ای بودن این نوع گاز شود. به همین جهت، تحت تاثیر دوست‌داران محیط زیست و رسانه‌های جمعی، سازندگان کلیدهای قدرت در سال‌های اخیر به فکر جایگزینی گاز SF6 با عایق دیگری شده‌اند تا اثرات مخرب زیست محیطی را نداشته باشد و از لحاظ خاصیت عایقی و قدرت قطع نیز در اندازه گاز SF6 باشد.

هر چند که گاز CO<sub>2</sub> از لحاظ عایقی و قدرت قطع توانایی گاز SF<sub>6</sub> را ندارد اما از لحاظ تاثیر آن بر حجم گازهای گلخانه‌ای مزیت بالایی دارد. همچنین نتایج ساخت یک نمونه از کلیدهای قدرت با گاز CO<sub>2</sub> توسط شرکت ABB نشان داده است که از لحاظ کارکرد نیز تفاوت محسوسی با کلیدهای SF<sub>6</sub> نداشته است. شرکت ABB در اواخر سال ۲۰۱۲ موفق گردید اولین کلید قدرت CO<sub>2</sub> را در سطح ولتاژ ۷۲/۵ کیلوولت رونمایی کند و در سال ۲۰۱۳ اولین نوع از این کلیدها در شبکه برق نصب گردید. با مطالعات و آینده پژوهی در زمینه کلیدهای قدرت CO<sub>2</sub> به جای کلیدهای قدرت SF<sub>6</sub> در وهله اول، مشکلات زیست محیطی مربوط به گازهای گلخانه‌ای به دلیل نشت گاز SF<sub>6</sub> حل خواهد شد همچنین هزینه‌های تعمیر و نگهداری کلیدهای قدرت نیز پایین‌تر خواهد بود.

تحقیقات اخیر با توجه به ویژگی‌های ترمودینامیکی گازهای مختلف و ضرایب انتقال آنها (مانند ویسکوزیته، هدایت الکتریکی و حرارتی) نشان داده است که برای بهینه سازی قدرت قطع کلید استفاده از ترکیب گازهای SF<sub>6</sub> با N<sub>2</sub> و CO<sub>2</sub> مناسب‌تر می باشد چرا که سبب هم‌افزایی ویژگی‌های مثبت این گازها می‌گردد. کلیدهای قدرتی که در آنها تنها از گاز CO<sub>2</sub> استفاده شده در مقایسه با کلیدهای قدرت گازی SF<sub>6</sub>، حجم بزرگتری داشته و قدرت قطع آنها رضایت بخش نیست. اندازه گیری افزایش فشار گاز در کلیدهای گازی نوع PUFFER در قدرت قطع ۲۸،۴ کیلوآمپر برای گازهای CO<sub>2</sub> و SF<sub>6</sub> نشان داده است که CO<sub>2</sub> برای قطع جریان‌های کوتاه مدت و SF<sub>6</sub> برای قطع جریان‌های بلند مدت مناسب‌تر می‌باشد. همچنین مطالعه روی کلید قدرت نوع PUFFER در رده ولتاژی ۱۲۶ کیلوولت و مقایسه تغییرات جریان و ولتاژ قوس الکتریکی با زمان نشان داده است که قابلیت اتلاف حرارتی SF<sub>6</sub> از CO<sub>2</sub> مناسب‌تر می باشد.

در گاز ترکیبی CO<sub>2</sub>/SF<sub>6</sub> هر چه میزان SF<sub>6</sub> بیشتر باشد، با افزایش غیر خطی در مقاومت دی الکتریکی فاصله هوایی، شاخصهایی چون ولتاژ پیدایش قوس الکتریکی، ولتاژ خاموشی قوس الکتریکی و مقاومت قوس افزایش خواهند یافت. همچنین در مقایسه با SF<sub>6</sub>، قدرت وزش (BLOW EFFECT) در CO<sub>2</sub> به ویژه در جریان گذرنده از صفر ضعیف‌تر می‌باشد. لذا در طراحی کلیدهای قدرت گازی CO<sub>2</sub> می‌بایست بر افزایش و بهبود قدرت وزش تمرکز بیشتری صورت پذیرد.

### نتایج مورد انتظار و دستاوردهای جانبی پروژه

در این پروژه آینده پژوهشی با رصد آخرین فعالیتهای تحقیقاتی موسسات پژوهشی معتبر دنیا و دستاوردهای شرکتها در زمینه تئوری مدلهای ولتاژ شکست و مکانیزم قطع کنندگی و خاموش کنندگی قوس در محیط گاز CO<sub>2</sub> و مقایسه آن با محیط گاز SF<sub>6</sub>، فناوریهای مورد نیاز، بررسی و تحقیق در رابطه با تولیدکنندگان کلیدهای گاز CO<sub>2</sub> و الزامات فنی مورد نیاز و فواید آن به لحاظ هزینه های تعمیر و نگهداری، بهره برداری، کاهش انتشار گازهای گلخانه ای و جنبه های زیست محیطی مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت و روند تحقیق و توسعه این فناوری و بازخوردهای عملکردی این کلیدها از مراجع علمی معتبر بررسی خواهند شد. از جمله مهمترین فعالیت هایی که در این پروژه صورت خواهد گرفت، عبارتند از:

تیین مشخصه های فناوری جایگزینی گازهای دوستدار محیط با SF<sub>6</sub> در کلیدهای قدرت فشارقوی

بررسی آزمایشگاهی پارامترهای حرارتی و الکتریکی گاز Co<sub>2</sub>

مقایسه عملی عملکرد عایقی کلید قدرت با گازهای عایقی SF<sub>6</sub> و CO<sub>2</sub> از طریق انجام آزمون های

آزمایشگاهی مرتبط بر روی کلید قدرت

آینده پژوهی فناوری کلیدهای قدرت فشارقوی مجهز به گازهای دوستدار محیط زیست



## دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ خطوط انتقال شامل سیستم هیستریزیس و تنظیمگر پاندولی

مخترعین: پژمان خزایی، محمدعلی توفیق، محمد یسن زاده شللو و هادی نوروزی

یکی از عوامل بروز خطای جدی در خطوط انتقال برق، نوسانات هادی می‌باشد. "گالوپینگ" یکی از مخرب‌ترین انواع نوسانات هادی، با مشخصات فرکانس پایین (زیر ۲ هرتز) و دامنه بزرگ (تا ۴ برابر شکم هادی) است که عمدتاً در مناطق کوهستانی، برفی و در اثر وزش باد روی می‌دهد. علت اصلی شروع و تداوم پدیده گالوپینگ، تشدید بین نوسانات عمودی و پیچشی خط انتقال می‌باشد. در سال ۱۳۹۰ خط سه بانده فشار قوی یاسوج-سورمق دچار پدیده گالوپینگ شد و خسارات سنگینی از قبیل پاره شدن کابل‌ها، شکستن دکل و توقف در برق‌رسانی را به بار آورد. یکی از مناسب‌ترین راهکارها برای مقابله با این پدیده استفاده از تجهیزات ضدگالوپینگ می‌باشد. دستگاه ضدگالوپینگ پیچشی نسل سوم دمپرهای ضدگالوپینگ می‌باشد، که برای اولین بار در کشور برای مجهز کردن خطوط سه بانده، توسط محققین گروه پژوهشی تجهیزات خط و پست ابداع و ساخته شده است. این دستگاه، که از یک سیستم هیبریدی میراکننده فشرده هیستریزستی و مجموعه پاندول تشکیل شده است، بطور همزمان از ویژگی جداسازی نوسانات پیچشی و عمودی خط و نیز ایجاد میرایی پیچشی، به منظور جلوگیری و مهار گالوپینگ استفاده می‌کند.

### زمینه علمی اختراع

این اختراع به کنترل گالوپینگ خطوط انتقال سه بانده ولتاژ بالا در صنعت برق مربوط می‌شود. در خطوط انتقال فشار قوی، به منظور دستیابی به بازدهی بیشتر، هر فاز از سه فاز را بصورت یک بانده متشکل از تعدادی (۲ تا ۸) هادی طراحی می‌کنند، هادی‌های یک بانده هم فاز بوده و توسط نگهدارنده‌ها از یکدیگر جدا می‌شوند. یکی از عوامل بروز خطای جدی در خطوط انتقال، نوسانات هادی می‌باشد. در یک دسته‌بندی کلی می‌توان نوسانات خط را بر اساس مشخصات ارتعاشی (دامنه و فرکانس) به سه دسته آئولین، گالوپینگ و سوئینگ نام‌گذاری نمود. "گالوپینگ"، که مخرب‌ترین نوع ارتعاشات هادی‌هاست، به نوساناتی با فرکانس

پایین (زیر ۲ هرتز) و دامنه خیلی بزرگ (از ۰,۲ تا چند متر) اطلاق می‌گردد. اثرات تخریب کننده ناشی از پدیده گالوپینگ به صورت لحظه‌ای می‌تواند شامل پاره شدن سیم، خوابیدن و شکستن دکل انتقال انرژی، و یا کاهش حداقل فاصله مجاز هادی با فازهای دیگر، بدنه دکل و سایر بخشهای عایق باشد و در بلند مدت نیز ایجاد خستگی در محل اتصال هادی به مقره، کاهش مقاومت سیم در برابر کشش و در نهایت پارگی هادی باشد. علاوه بر هزینه‌های زیاد ناشی از تعمیر خطوط انتقال برق در اثر حوادث فوق، توقف در برق‌رسانی نیز، ضررهای جبران ناپذیری بر مصرف‌کنندگان برق تحمیل می‌کند.

مکانیزم گالوپینگ بسیار پیچیده است. بر اساس نتایج تحقیقات صورت گرفته در زمینه عوامل وقوع گالوپینگ، این پدیده عمدتاً در مناطق یخبندان رخ می‌دهد. جمع شدن نامتقارن برف بر روی هادی، تشکیل یک پروفایل ایرودینامیکی می‌دهد که باعث ایجاد نیروی لیفت (برآ) در اثر وزش باد می‌گردد. این نیرو در مورد هادی‌های بانده شده نسبت به یک هادی منفرد مقدار قابل توجهی پیدا خواهد کرد، زیرا در هادی‌های بانده سختی پیچشی افزایش یافته و امکان تشکیل برف و یخ نامتقارن روی آن بیستر می‌گردد. از طرفی، بدلیل وجود جداکننده‌ها در هادی‌های بانده شده، فرکانسهای طبیعی پیچشی و عمودی خط در محدود نزدیکی نسبت بهم قرار می‌گیرند. بنابراین در چنین شرایطی یک نوسانات پیچشی می‌تواند عامل تشدید ارتعاشات عمودی گردد که در نتیجه آن، فرآیند گالوپینگ هادیهای بانده شده رخ می‌دهد. همچنین ذوب ناگهانی یخ روی هادی‌ها عامل دیگر وقوع گالوپینگ محسوب می‌گردد.

کنترل این پدیده و جلوگیری از وقوع آن بر روی خطوط می‌تواند تا حدود بسیار زیادی از زیانهای اقتصادی ناشی از گالوپینگ جلوگیری کند. عواملی از قبیل اینرسی، سختی و میرایی پیچشی کابل در کیفیت گالوپینگ تاثیر گذار می‌باشند. دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ پیچشی، یک جاذب - دمپر ارتعاشی برای خطوط سه بانده است که بطور همزمان عمل اتلاف انرژی و جابجایی فرکانس پیچشی از عمودی را در خط انتقال ایجاب می‌شود.

این دستگاه که نسل جدید دمپرها ضدگالوپینگ محسوب می‌گردد، با هدف رفع معضلات خطوط انتقال نیرو سه بانده در برابر پدیده گالوپینگ طراحی و ساخته شده است. در دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ یک سیستم میرایی هیستریزیستی فشرده بکار گرفته شده که نسبت به نسل‌های قبل مزایایی از قبیل ابعاد کوچکتر، قیمت ارزان‌تر، میرایی بیشتر و کارایی مناسب‌تر در دماهای پایین را فراهم می‌آورد.

## مشکل فنی و بیان اهداف اختراع

مطالعات و تحلیل‌های انجام شده نشان می‌دهد که خطوط سه بانده کشور، بدلیل مجهز نبودن به تجهیزات ضدگالوپینگ، در مناطق بادخیز و کوهستانی به شدت در معرض وقوع گالوپینگ هستند. به عنوان نمونه می‌توان به خط ۴۰۰ کیلوولت یاسوج-سورمق واقع در دشت نمدان اشاره داشت که در زمستان سال ۱۳۹۰ دچار این پدیده گردید و خسارات سنگینی به بار آورد. گستردگی نسبی مناطق مستعد گالوپینگ در ایران لزوم یک برنامه‌ریزی صحیح را در جهت مقابله با این پدیده آشکار می‌سازد تا حدود زیادی از خسارات ناشی از آن جلوگیری می‌گردد. متأسفانه تابحال محصول مناسبی جهت تجهیز خطوط سه بانده در داخل کشور ساخته نشده و از طرفی هزینه واردات محصولات خارجی سرسام آور می‌باشد. لذا ساخت یک تجهیز ضدگالوپینگ معتبر در داخل کشور امری ضروری و در مسیر اقتصاد مقاومتی خواهد بود.

علت اصلی شروع و تداوم پدیده گالوپینگ، تشدید بین نوسانات عمودی و پیچشی خط انتقال می‌باشد. بنابراین جابجایی فرکانس‌های پیچشی خط که باعث جلوگیری از انطباق فرکانس‌های عمودی و پیچشی گردد، می‌تواند راه حل مناسبی برای جلوگیری از گالوپینگ باشد. به این عمل اصطلاحاً تنظیم‌گری (Detuning) و دستگاه عامل را جاذب ارتعاشی (Absorber) نامند.

دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ که توسط پژوهشگاه نیرو طراحی و ساخته شده است علاوه بر قابلیت جابجا کردن فرکانس‌های طبیعی پیچش خط بانده، دارای اثر میراثی پیچشی جهت جلوگیری از ورود انرژی به سیستم و اتلاف آن می‌باشد. بعبارتی، جلوگیری از انطباق فرکانس‌های تشدید باعث پیشگیری از وقوع ناپایداری در خط شده و یا در مواردی که سرعت باد یا میزان یخ روی کابل زیاد است (جلوگیری از گالوپینگ دشوار است)، وجود میراثی دستگاه، کاهش دامنه نوسانات خط را سبب می‌گردد.

طراحی دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ پیچشی بگونه‌ای انجام شده است که فرکانس طبیعی آن در رنج محدودی قابل تنظیم است. زیرا انطباق بر تشدید دستگاه بر فرکانس گالوپینگ خط عملکرد دستگاه را بهینه می‌سازد. از آنجاکه تعیین فرکانس گالوپینگ خط به پارامترهای گوناگونی از جمله، سرعت باد، حجم، شکل و اندازه یخ موجود روی کابل بستگی دارد لذا در ساخت این دستگاه بایستی انعطاف تنظیم فرکانس لحاظ گردیده می‌شد.

حذف مشکلات و خسارات ناشی از وقوع گالوپینگ در خطوط فشار قوی سه بانده، دستیابی به دانش فنی طراحی و ساخت مدرن‌ترین تجهیزات ضدگالوپینگ و حرکت در مسیر اقتصاد مقاومتی از اهداف اصلی اختراع دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ می‌باشد.

### شرح وضعیت دانش پیشین و سابقه پیشرفت‌های آن

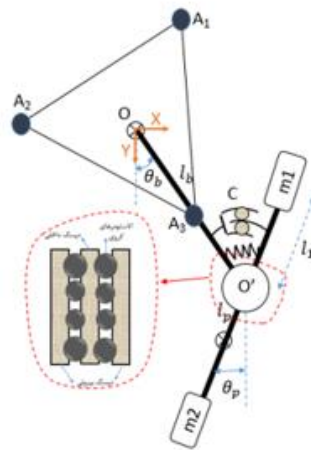
پروفسور لیلیئن در سال ۱۹۹۷ برای اولین بار طرحی را ابداع کردند که بطور همزمان از مفهوم میرایی و شیف فرکانسی برای نوسانات پیچشی خطوط انتقال استفاده می‌نمود. این محصول که TDD (detuning damper torsional) نامگذاری شد یکی از موفق‌ترین تجهیزات جهت مقابله با گالوپینگ خطوط بانده محسوب می‌شد. در سال ۱۳۸۶ مخترعین گروه خط و پست با الگوبرداری از محصول TDD یک نمونه داخلی دمپر ضدگالوپینگ متناسب با خطوط دو بانده کشور ساختند. این محصول که به تولید انبوه رسیده و بر روی خطوط انتقال دو بانده بحرانی (از جمله خطوط ۴۰۰ کیلوولت شاهرود - علی‌آباد و خطوط ۴۰۰ کیلوولت حسن کیف - زیاران) نصب گردیده، تاکنون عملکرد مطلوبی در مهار گالوپینگ، به جا گذاشته است. دمپر TDD مجهز به یک پاندول می‌باشد که نوسانات پیچشی خط را به یک لاستیک میراکننده منتقل می‌کند. به منظور دستیابی به بیشینه دوام، لاستیک‌های طویل (که وظیفه تامین سختی و میرایی سیستم را دارد) داخل پوسته‌های آلومینیومی قرار داده شده‌اند. مهمترین مشکلی که دمپرهای TDD با آن مواجه بودند، هزینه بالای تولید لاستیک‌های خاص بخش میراکننده می‌باشد. ضمن اینکه در دماهای خیلی پایین، خواص مکانیکی لاستیک‌ها دچار تغییر شده و این عملکرد دمپر در مناطق یخبندان را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

موضوع این اختراع (دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ پیچشی) یک نسخه ارتقاء یافته از دمپرهای TDD است که در آن یک سیستم میرایی هیستریزیستی فشرده جایگزین لاستیک‌های طویل شده است و نواقص آنها را برطرف نموده است.

## ارائه راه حل برای مشکل موجود به همراه شرح اختراع

دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ به منظور مهار گالوپینگ خطوط انتقال فشاری قوی سه باندد طراحی و ساخته شده است. از نقطه نظر دینامیکی یک سیستم تک ورودی/ تک خروجی محسوب می شود که پیچش خط باندد ( $\theta_b$ ) بعنوان ورودی و نوسانات پاندول ( $\theta_p$ ) خروجی آن می باشد. شکل (۱) شماتیک دینامیکی دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ را نمایش می دهد که در آن نمایانگر هادی های موجود در مجموعه باندد یک فاز می باشند.

اساس طراحی پارامترهای دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ، رسیدن به فرکانس طبیعی و میرایی مطلوب می باشد. عوامل اصلی در کنترل عملکرد دستگاه، فاصله مرکز باندد تا مرکز جرم دستگاه، ممان اینرسی حول محور پاندول و میرایی و سختی پیچشی می باشند.



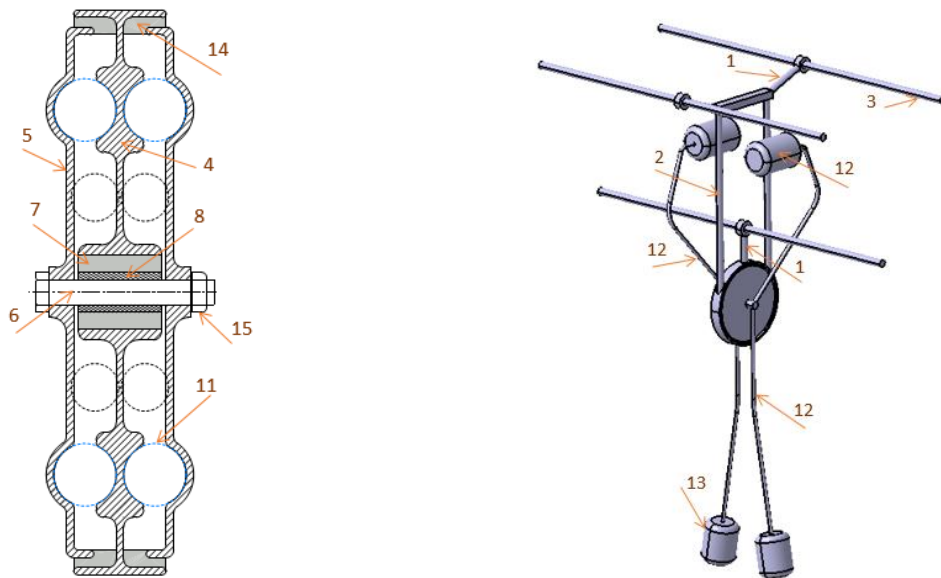
شکل ۱: شماتیک واقعی و دینامیکی دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ

به منظور بررسی استحکام مکانیکی دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ در برابر انواع بارهای استاتیکی و دینامیکی، مدل سه بعدی آن با توجه به نقشه های طراحی شده، در نرم افزار ABAQUS تهیه و توزیع تنش/ کرنش آن به روش اجزای محدود مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج شبیه سازی مشخص نمود که سازه طراحی شده دارای ضریب اطمینان ۱٫۸۹ می باشد.

در طراحی و در محاسبه پارامترهای پاندول، علاوه بر مسائل فنی، برخی محدودیت های کاربردی نیز در نظر گرفته شده است. تمرکز جرم دستگاه بر روی کابل نباید باعث ایجاد فشار بیش از حد در جهت عمودی گردد

بر اساس مطالعات انجام شده، جرم کل دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ نباید بیشتر از ۰/۱ جرم کابل‌های باندا باشد). همچنین، پاندول بایستی طوری طراحی شود که جرم بالائی در هنگام نوسان با کابل پائینی باندا برخورد نکند. علاوه بر این، فاصله ایمنی جرم پائینی با زمین یا بانداهای زیرین بایستی رعایت شود. با هدف بهینه سازی طرح و رعایت ملاحظات میدان الکتریکی خطوط فشار قوی، وجود لبه‌های تیز که موجب تمرکز میدان و تشدید پدیده کرونا می‌گردد بطور کامل حذف گردیده است. در نهایت، به منظور جلوگیری از خوردگی کلیه سطوح بدنه و پاندول تحت گالوانیزاسیون قرار می‌گیرند.

همانطور که در شکل (۲) نشان داده شده است، دستگاه موضوع این اختراع، از طریق کلمپ‌های (۱) و بدنه (۲) به کابل‌های (۳) باندا شده از خط انتقال متصل می‌گردد. این دستگاه شامل یک مجموعه صفحات داخلی (۴) و بیرونی (۵) است که بطور هم‌مرکز بر روی یک پیچ تنظیم (۶) نصب شده‌اند. صفحات بیرونی نسبت به پیچ تنظیم ثابت شده‌اند؛ صفحه داخلی توسط یک بوش الاستومری (۷) و بوش برنزی (۸) روی یک پیچ تنظیم قرار گرفته و بصورت صلب به هاب وصل شده است. روی صفحات دو سری تورفتگی با پروفایل خاص (۹) و (۱۰) تعبیه شده که هر سری در امتداد دوایری با شعاع متفاوت و هم‌مرکز با پیچ تنظیم ایجاد شده‌اند. تورفتگی‌های متناظر روی صفحات بیرونی و درونی بصورت جفت بر هم منطبق می‌شوند؛ درون هر جفت تورفتگی الاستومرهای کروی (۱۱) قرار گرفته که در حالتی اصطکاکی با صفحات درگیر می‌شوند. بر روی هر کدام از صفحات بیرونی یک پاندول قرار گرفته که محور نوسان آن منطبق بر محور پیچ تنظیم است؛ پاندول‌ها از بازو (۱۲) و وزنه‌های (۱۳) تشکیل شده است. مجموعه دیسک‌های بیرونی و داخلی بوسیله پوشش الاستومری مقاوم (۱۴) آب‌بند شده است؛ بگونه‌ای که امکان نفوذ آب یا گردوغبار به داخل مجموعه (جایی که گوی‌ها داخل مسیرها قرار گرفته‌اند) وجود ندارد. مهره (۱۵) نیز از نوع قفل‌شونده طراحی شده، بطوریکه پس از تنظیم، هم به پیچ و هم به صفحه بیرونی قفل خواهد شد.



شکل ۲: اجزای دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ

کلمپ‌ها طوری طراحی شده‌اند که بواسطه آرموراد به هادی وصل شوند تا هیچ‌گونه آسیبی از طرف دستگاه به کابل‌ها وارد نشود. صفحات، دایروی شکل بوده و تورفتگی‌ها نیز بصورت کانالهایی با انتهای گرد هستند که بر محیط دایره متناظر گسترش داده شده‌اند؛ در هر ربع صفحه، یک کانال تورفتگی ایجاد شده است. مقطع عرضی هر تورفتگی عمود بر محور طولی دارای پروفایل خاصی است که نشیمنگاهی برای گوی‌های الاستومری می‌باشد و در مقطع طولی دارای شکلی مقعر با انتهایی گرد است که عمق کانال‌ها از مرکز به سمت انتها کاهش می‌یابد.

هر پاندول از یک اهرم و دو وزنه در انتهای اهرم ساخته شده که به دیسک بیرونی بطور صلب متصل شده و حول محور دیسکها نوسان می‌کند. بکارگیری وزنه‌ها در بالا و پایین باعث می‌گردد توزیع اینرسی مطلوبی حاصل آید، درحالی‌که مرکز جرم پاندول از محور دوران فاصله زیادی پیدا نمی‌کند. بدین ترتیب، پایداری مجموعه بیشتر می‌گردد. اهرم‌بندی بگونه‌ای طراحی شده که به سادگی بر روی دیسک‌ها بیرونی قابل نصب بوده و در حین نوسان با کابل‌ها هیچگونه تداخلی نداشته باشد.

عمل دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ برپایه اجزای انعطاف‌پذیر اتلاف‌دهنده استوار می‌باشد. در اثر چرخش صفحات داخلی و بیرونی نسبت به هم، انرژی در الاستومرهای کروی ذخیره شده که بلافاصله آن را آزاد می‌سازد و بدین ترتیب فنریت سیستم تامین می‌شود. این اثر با تغییر پروفایل تورفتگی‌ها قابل افزایش است. ضمن آنکه بخشی از فنریت توسط آزادسازی انرژی گرانشی پاندولها تامین می‌گردد. هنگامیکه الاستومرهای

کروی در داخل تورفتگی‌ها تغییر شکل می‌دهند یا در تماس با جداره صفحات می‌غلتنند، هدررفت انرژی قابل توجهی در اثر اصطکاک مولکولی الاستواره و نیز اصطکاک تماسی با جداره ایجاد می‌شود که این میرایی سیستم را تامین می‌کند. بطور کلی عمل الاستومرهای کروی در کانال تورفتگی بزرگتر میرایی سیستم را تامین کرده، درحالی‌که عمل الاستومرهای کروی در کانال تورفتگی واقع در شعاع کوچکتر سختی سیستم را تامین می‌نماید. زاویه دوران پاندول نسبت به باندل محدود و متناسب با طول کانال تورفتگی‌ها می‌باشد. در عمل هرچه زاویه چرخش صفحه بیرونی نسبت به صفحه بیرونی افزایش یابد، تغییرشکل الاستومرهای کروی بیشتر شده و هرچه الاستومرها بیشتر تغییرشکل یابند بازدهی سیستم افزوده می‌شود.

می‌توان اظهار نمود که دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ دارای سه بخش مجزا می‌باشد که عبارتند از: ۱- مجموعه بدنه، کلمپ‌ها و صفحات داخلی، ۲- مجموعه پاندول و صفحات بیرونی و ۳- الاستومرهای کروی داخل کانال‌های تورفتگی. اینرسی کل دستگاه و فاصله مرکز جرم آن تا مرکز باندل به عنوان عامل اصلی در تنظیم فرکانس پیچشی خط عمل می‌کند. میرایی و یا عبارتی میزان اتلاف انرژی از سیستم، وابسته به تعداد الاستومرهای کروی، پروفایل مسیرهای تورفتگی و تنظیم پیچ مرکزی است. عملکرد دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ به عنوان جاذب دینامیکی نیز تابعی از فرکانس تشدید آن می‌باشد که در صورتیکه این فرکانس بر فرکانس گالوپینگ خط منطبق گردد کارایی دستگاه بیشینه می‌گردد. به منظور تغییر فرکانس تشدید دستگاه تابع مشخصات پاندول است و با اصلاح طول بازوها و جرم وزنه‌ها می‌توان به فرکانس مطلوب دست یافت. اختراع جاری یک تجهیز مکانیکی است به منظور کاهش گالوپینگ خطوط انتقال سه باندل با رویکرد (i) جداسازی نوسانات پیچشی خط از نوسانات عمودی و (ii) افزودن میرایی کافی در نوسانات پیچشی خط جهت ایجاد تغییر فاز بین نوسانات پیچشی و عمودی خط که از انتقال انرژی باد به نوسانات عمودی جلوگیری بعمل می‌آورد.

دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ دارای اندازه فشرده، ساختار مکانیکی مستحکم، قابلیت نصب آسان و قابل تنظیم برای خطوط گوناگون کشور می‌باشد. آزمون‌هایی از قبیل IP53، مقاومت در برابر اوزن، هم‌آوایی فرکانسی و خستگی در دمای زیر صفر بر روی دستگاه AGT با موفقیت انجام شده است.



## مزایای اختراع ادعایی نسبت به اختراعات پیشین

مزایای دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ نسبت به تنها اختراع داخلی دمپر/جاذب ارتعاشی موسوم به دمپر ضدگالوپینگ TDD بصورت زیر می‌باشد:

- ۱- دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ برای خطوط سه باندد طراحی و ساخته شده، درحالیکه دمپر TDD برای خطوط دو باندد طراحی شده بود.
  - ۲- دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ نسل جدیدی از تجهیزات ضدگالوپینگ می‌باشد که بدلیل جایگزین کردن یک سیستم میرایی فشرده الاستومری هیستریزیستی با لاستیک‌های حجیم دمپر TDD، نواقص آن‌ها را برطرف نموده است.
  - ۳- اندازه و قیمت دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ نسبت به دمپر TDD به مقدار قابل توجهی کاهش یافته است.
  - ۴- اتلاف انرژی در دمپر TDD صرفاً ناشی از اصطکاک مولکولی اجزای الاستومری می‌باشد، درحالیکه در دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ علاوه بر اصطکاک داخلی گوه‌های الاستومری، وجود اصطکاک غلطشی بین گوی و جداره صفحات آلومینیومی نیز عامل اتلاف انرژی می‌باشد. بنابراین نه تنها میزان دمپینگ در دستگاه AGT بیشتر بوده بلکه کارایی آن در دماهای خیلی پایین (که اصطکاک داخلی به شدت افت می‌کند) بهبود یافته است.
- همچنین دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ نسبت به طرح‌های خارجی مزایای زیر را داراست:
- ۱- در طراحی دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ ملاحظات حذف تلفات حاصل از کرونا در خطوط فشارقوی در نظر گرفته شده درحالیکه در نمونه‌های خارجی این مسئله رعایت نگردیده است.
  - ۲- با توجه به ویژگی‌های خاص خطوط برق اجرا شده در کشور، طراحی و تنظیم فرکانس طبیعی دستگاه مذکور متناسب با مشخصات خطوط داخلی انجام شده که متفاوت با نمونه‌های خارجی می‌باشد.
  - ۳- با عنایت به مواد اولیه موجود در کشور و عدم وابستگی به خارج، طراحی قطعات صورت گرفته است.
  - ۴- پروفایل مسیر الاستومرهای کروی بگونه‌ای اصلاح شده که میزان اتلاف انرژی آن در هر سیکل افزایش یافته است.

۵- آمیزه بکار رفته در تهیه لاستیک‌های دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ دارای خواص مکانیکی مناسب‌تری نسبت به نمونه‌های خارجی است.

۶- هزینه تولید دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ به مراتب ارزان‌تر از قیمت واردات نمونه خارجی می‌باشد.

### نمونه روش اجرایی

چند نمونه تولید شده از دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ در خطوط ۴۰۰ کیلوولت یاسوج - سورمق مورد استفاده قرار گرفته و نتیجه مورد انتظار حاصل گردیده است. شکل ۳ دمپرها را قرار گرفته روی خط مذکور را نمایش می‌دهد.



شکل ۳: نصب دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ

### کاربرد صنعتی اختراع

دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ برای بر روی تمامی خطوط فشار قوی سه باندا داخل کشور قابل نصب بود و از بروز گالوپینگ در این خطوط جلوگیری می‌نماید. نمونه دستگاه‌های ساخته شده براساس کابل کلرو و فرکانس گلوپینگ ۰,۶ هرتز طراحی شده‌اند؛ با توجه به قابلیت تنظیمی که در طراحی این دستگاه در نظر گرفته شده است قابل تعمیم به تمامی خطوط سه باندا کشور می‌باشد.

## ادعاها

۱- دستگاه ضدگالوپینگ پیچشی<sup>۱</sup> که به منظور کنترل پدیده گالوپینگ در خطوط انتقال فشار قوی سه باندد و برای اولین در کشور طراحی و ساخته شده است، نسل جدیدی از دمپ‌های تنظیم‌گر پیچشی<sup>۲</sup> می‌باشد.

۲- مطابق با ادعای ۱: دمپ‌تنظیم‌گر پیچشی در سال ۱۳۸۷ توسط مخترعین پژوهشگاه نیرو، با هدف مقابله با گالوپینگ خطوط دو باندد، طراحی شد و به تولید انبوه رسید. در دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ پیچشی، که طراحی خاص برای خطوط سه باندد فشار قوی کشور بوده، یک سیستم میرایی هیستریزیستی فشرده جایگزین لاستیک‌های طویل بکاررفته در دمپ‌تنظیم‌گر پیچشی شده که در نتیجه آن سایز دستگاه کوچکتر شده و میزان اتلاف انرژی آن (بوئزه در دماهای پایین) افزایش یافته است.

۳- دستگاه هیبریدی ضدگالوپینگ پیچشی از مفهوم میرایی و جابجاکردن فرکانس‌های پیچشی به طور همزمان استفاده می‌کند. این دستگاه از سه بخش اصلی تشکیل شده است: بدنه (شامل عضوهای رابط و کلمپ جهت اتصال دستگاه به هادی‌های باندد شده)، سیستم میراکننده (شامل صفحات داخلی و خارجی، پیچ تنظیم، بوش لاستیکی و الاستومرهای کروی) و مجموعه پاندول (شامل وزنه‌ها و میله‌های رابط). صفحه داخلی نسبت به پیچ تنظیم ثابت بوده و از طریق بدنه بصورت صلب به هادی‌های باندد شده متصل می‌گردد. هر کدام از صفحات بیرونی نیز بصورت صلب به پاندول متناظر متصل شده است. لاستیک‌های کروی داخل نشیمنگاهی با پروفایل خاص که بصورت تورفتگی بر روی صفحات داخلی و بیرونی تعبیه شده است، قرار می‌گیرند. این تورفتگی‌ها که بصورت جفت بر روی صفحات داخلی و بیرونی تعبیه شده‌اند مسیر غلطش گوی‌های الاستومری می‌باشد. نوسانات پیچشی هادی‌ها از طریق کلمپ‌ها و بدنه به مجموعه پاندول منتقل شده و نهایتاً توسط سیستم میرایی جذب می‌شوند.

۴- مطابق با ادعای ۳: در سیستم میرایی دیسک داخلی از طریق یک بوش لاستیکی از جنس کلروپرن و یک بوش داخلی ضدسایش از جنس برنج به پیچ تنظیم وصل شده است. پیچ تنظیم از دو انتها به دیسک‌های

<sup>۱</sup> AGT (Anti-Galloping Torsional device)

<sup>۲</sup> (Torsional Detuning Damper) TDD

بیرونی متصل است. بین دیسک‌های داخلی و بیرونی مجموعه الاستومرهای کروی وجود دارد که با ایجاد حرکت نسبی بین دیسک‌های داخلی و بیرونی عمل دمپینگ را انجام می‌دهد.

۵- مطابق با ادعای ۴: بر روی دیسک‌های داخلی و بیرونی چند مسیر تورفتگی در امتداد دو دایره هم مرکز و با شعاع‌های متفاوت تعیین شده است. الاستومرهای کروی با غلطش فشاری درون این تورفتگی اصطکاک ایجاد می‌کنند. عمق تورفتگی‌ها از مرکز به سمت بیرون کاهش می‌یابد که این باعث افزایش میزان فنریت و دمپینگ سیستم می‌گردد.

۶- مطابق با ادعای ۴ و ۵: الاستومرهای کروی از یک آمیزه کلروپرن با خاصیت اتلافی بالا و مقاوم در برابر اوزن و در دو قطر متفاوت تولید شده‌اند. گوی‌ها با قطر کوچکتر داخل مسیرهای تورفتگی ایجاد شده بر امتداد دایره کوچکتر قرار می‌گیرند و گوی‌ها بزرگتر در مسیرهای بالاتر جای داده می‌شوند.

۷- مطابق با ادعای ۴ و ۵: تورفتگی ایجاد شده در صفحات داخلی و بیرونی کاملاً برهم منطبق بود و با ایجاد چرخش نسبی بین آنها، الاستومرهای کروی بدلیل قرار گرفتن در انهای مسیر دچار لهیدگی شده و در اثر آن بخشی از انرژی ذخیره و بخشی دیگر اتلاف می‌شود.

۸- مطابق با ادعای ۴: با شل و سفت کردن پیچ تنظیم و همچنین افزودن گوی‌های بیشتر می‌توان میزان فنریت و دمپینگ سیستم را کنترل نمود.

۹- مطابق با ادعای ۳: به هر کدام از صفحات بیرونی یک مجموعه پاندول متصل شده است. هر مجموعه پاندول دارای دو بازوی بالایی/پایینی بوده که به انتهای هر بازو جرم‌های مشخصی براساس فرکانس گالوپینگ وصل می‌گردد.

۱۰- مطابق با ادعای ۳: کلمپ‌ها بر اساس خط سه باندا و هادی کلرو طوری ساخته شده‌اند که هیچ آسیبی به کابل نمی‌رساند. همچنین، طراحی به گونه‌ای انجام شده که می‌توان کلمپ‌ها را متناسب با نوع هادی جایگزین نمود.

۱۱- فاصله مرکز باندا تا مرکز جرم دستگاه، فرکانس طبیعی دستگاه و نوع و تعداد الاستومرهای کروی سه فاکتور در تنظیم میزان جابجایی فرکانسی و جذب نوسانات پیشگی می‌باشد.

۱۲- فرکانس طبیعی نامی دستگاه ضدگالوپینگ پیشگی برابر ۰,۶ هرتز بوده که با عنایت به ویژگی‌های خطوط سه باندا اجرا شده در کشور، این فرکانس متناسب با فرکانس گالوپینگ خطوط قابل تنظیم می‌باشد.

- ۱۳- وزن دستگاه ابداعی حدود ۳۳ کیلوگرم می‌باشد و اجزای آن با پوشش گالوانیزه روکش شده است.
- ۱۴- دستگاه ضدگالوپینگ پیچشی آزمون مقاومت در برابر نفوذ آب و گردوخاک (IP53)، مقاومت در برابر اوزن با غلظت 50 pphm، خواص عملکردی در دمای  $-30^{\circ}\text{C}$ ، تلفات کرونا، خستگی به ازای یک میلیون دور و آزمون هم‌آوایی فرکانسی را با موفقیت گذرانده است.
- ۱۵- دو نمونه محصول دستگاه ضدگالوپینگ پیچشی بر روی خط ۴۰۰ کیلوولت یاسوج-سورمق واقع در دشت نمدان بصورت پایلوت نصب گردیده است.

جدول (۱): مشخصات قطعات دستگاه

شماره قطعه	شرح قطعه	تکنیک ساخت	مواد اولیه مصرفی
۱	وزنه ها	ریخته‌گری	فولاد
۲	بازوی پاندول‌ها	تراشکاری	فولاد
۳	صفحات بیرونی و داخلی	ریخته‌گری/CNC	آلومینیوم
۴	بازوهای اتصال کلمپ‌ها به بدنه	تراشکاری	آلومینیوم
۵	بوش ضد-اصطکاک	تراشکاری	فسفربرنز
۶	بوش لاستیکی	تزریق	لاستیک کلروپرن
۷	الاستومرهای کروی	پخت	لاستیک کلروپرن
۸	کلمپ بخش فوقانی	ریخته‌گری	آلومینیوم
۹	کلمپ بخش پائینی	ریخته‌گری	آلومینیوم
۱۰	کلمپ بخش فوقانی	ریخته‌گری	آلومینیوم
۱۱	اورینگ	تزریق	لاستیک
۱۲	پیچ تنظیم	تراشکاری	فولاد

**Title: Integrating Wind Energy to Weak Power Grids  
using High Voltage Direct Current Technology**

Edited by : Chaudhuri, Nilanjan Ray

Publisher: CRC Press

عنوان فارسی: اتصال انرژی بادی به شبکه‌های ضعیف با استفاده از تکنولوژی HVDC

سال انتشار: 2019

ناشر: Springer



این کتاب در نوع خود اولین کتابی است که یک چارچوب جامع برای اتصال مزارع بادی به شبکه‌های برق ضعیف با استفاده از تکنولوژی سیستم فشار قوی جریان مستقیم (HVDC) فراهم می‌کند. بیشترین پتانسیل انرژی بادی در مناطقی قرار دارد که معمولاً دور از مناطق مسکونی بود و از لحاظ وجود شبکه‌های قدرت به هم پیوسته دارای مشکل می‌باشند. این کتاب بر بسیاری از چالش‌هایی که صنعت مزارع بادی در زمینه اتصال انرژی بادی به شبکه‌های ضعیف و با استفاده از تکنولوژی HVDC مواجه می‌شود، تمرکز می‌کند. با استفاده از مطالعات موردی و نمونه‌های توضیحی، نویسنده یک چارچوب را برای تحلیل نظری و ریاضی تکنولوژی HVDC، کاربرد آن و اتصال موفق مزارع بادی با یک رویکرد واحد برای اتصال نیروگاه‌های بادی onshore و offshore به شبکه‌های AC موجود با استفاده از شبکه‌های MTDC (multi-terminal DC) و تحلیل گسترده از مزارع بادی onshore متصل به سیستم‌های HVDC (Line Commutated Converter) LCC و مزارع بادی offshore متصل به سیستم‌های HVDC (Voltage Source Converter) VSC، ارائه می‌دهد.

این کتاب شامل ۶ فصل می‌باشد که فصول آن به شرح زیر است.

مقدمه

مدل‌سازی و کنترل مزارع بادی مبدل اینورتری

اتصال مزارع بادی به شبکه AC با استفاده از LCC HVDC

بازیابی سیستم قدرت با استفاده از مزارع بادی مبتنی بر ژنراتور القایی از دو سو تغذیه (DFIG)

و سیستم‌های انتقال VSC-HVDC

ادغام مزارع بادی با استفاده از شبکه‌های MTDC از منظر پشتیبانی فرکانس