Journal of Industry Parts Manufacturers
https://ghs.science-journals.ir
E ISSN: 2717-2767

مجله قطعه سازان صنعت
http://science-journals.ir
شاپا الکترونیکی: ۲۷۱۷-۲۷۶۷

بررسی اهمیت کلیدزنی در مزارع بادی و اعمال اضافه ولتاژهای مخرب بر آن و تامین استانداردهای مجاز

[1]محمد مهدی دهقانی، دانشجوی کارشناسی ارشد برق قدرت، مؤسسه آموزش عالی پاسارگاد، شیراز
mohammadmehdi.borna@gmail.com

[2] میرقائدی، استاد مدعو، مؤسسه آموزش عالی پاسارگاد، شیراز
amir_ghaedi_63@yahoo.com

چکیده

به دلیل هزینه گزاف تجهیزات مورد استفاده در مزارع بادی، درک و ارزیابی اضافه ولتاژهای اعمال شده به آنها ناشی از کلید زنی، بسیار حائز اهمیت بوده و باید سعی شود در نقاط حساس شبکه، اضافه ولتاژها را محاسبه کرده و نسبت به حفاظت تجهیزات، اقدامات لازم صورت پذیرد.توان تلف شده در قوس کلید خلا پس از باز شدن کنتاکتها، عموما از سمتی تامین می شود که اینرسی بالاتری داشته باشد. در این مقاله به دلیل بالا بودن اینرسی شبکه بالادست (شین بی نهایت) تمام توان قوس از آن منبع تامین گردید. هرچه تعداد توربین های بادی در شبکه افزایش یابد، باید ظرفیت خطوط و ترانسفورماتورها نیز به تبع آن افزایش پیدا کنند. اما ولتاژ شبکه همواره ثابت خواهد بود. این موضوع بیان می کند که افزایش توان تولیدی مزارع بادی، بر اضافه ولتاژها نقشی ندارد و تنها توان قوس را تحت الشعاع قرار می دهد .استفاده از برقگیر در سمتی که اینرسی کمتری دارد، باعث می شود تا اضافه ولتاژها به شدت کاهش یابند و پایداری شبکه سریعتر حاصل شود. با توجه به نتایج شبیه سازی و مقایسه کلید خلا و SF6 ملاحظه می شود در سمتی که کلید خلا به نیروگاه بادی متصل شده است، اضافه ولتاژها شدیدتر می باشد و در سمتی که به شبکه بالا دست متصل هستند، اضافه ولتاژها کمتر هستند که به دلیل ظرفیت بالای شبکه بالادست می باشد. با توجه به اینکه کلیدهای SF6 از رسانایی حرارتی بیشتری برخوردارند، لذا می توانند بهتر از کلیدهای خلاء اضافه ولتاژها را دفع کنند.

واژه‌های کلیدی: اضافه ولتاژها، ترانسفورماتورها ،کلید خلا، پایداری شبکه، شبکه بالادست

سال ۲، شماره ۴ (پیاپی: ۸)، زمستان ۱۴۰۰، صفحه از ۱-۱۲

مقدمه

انرژی باد، انرژی حاصل از هوای متحرک می باشد. باد به وسیلهٔ گرمای غیر یکنواخت که سطح کرهٔ زمین که حاصل عملکرد خورشید است، به وجود می‌آید. از آنجایی که سطح زمین از خشکی ها و آب های بسیار تشکیل شده‌است، اشعهٔ خورشید به طور غیریکنواخت جذب آنها می شـــود. وقتی خورشید در طول روز می‌تابد، هوای روی سرزمین‌های خشکی سریع تر از هوای روی سرزمین‌های آبی گرم می‌شـــود. هوای گرم روی خشـــکی گرم شـــده و بالا می‌رود و هوای خنک تر و ســـنگین تر روی آب جای آن را می‌گیرد که این فرآیند بادهای محلی را می‌سازد. در شکل (۱) می توان این رفتار را مشاهده نمود.

در شب، از آنجا که هوا روی خشکی سریع تر از هوای روی آب خنک می‌شود، جهت باد برعکس می‌شود [۱]. به همین طریق بادهای بزرگ جوی که زمین را دور می‌زنند، به دلیل اینکه هوای ســـطحی نزدیک استوا در اثر گرمای خورشید بیشتر از هوای قطب شمال و جنوب گرم می شـــود، به وجود می‌آیند. چون تا زمانی که خورشـــید به زمین می‌تابد، باد به طور پیوسته تولید می شود، آن را منبع انرژی تجدید شونده می‌نامند. امروزه، انرژی بادی عمدتاً برای تولید برق به کار برده می‌شود.

شکل (۱) نحوه تولید باد در اثر تغییرات دما [۱]

ماشـــین‌های بادی ۳۰ تا ۴۰ درصـــد انرژی متحرک باد را به برق تبدیل می‌کند، یک دستگاه مولد نیروی زغال سوز، حدود ۳۰ تا ۳۵ درصـــد انرژی شیمیایی زغال را به الکتریسیته ی قابل استفاده تبدیل می‌کند. واژهٔ گنجایش، به توانایی دستگاه نیرو در تولید برق بر می‌گردد. یک دستگاه نیرو با گنجایش صد درصد، تمام روز و هر روز هفته با تمام نیرو کار می‌کند. در چنین شرایطی هیچ وقتی برای تعمیر یا ســـوخت گیری صرف نمی‌شود، که این چنین چیزی طبق قانون دوم ترمودینامیک برای هر دستگاهی غیرممکن است. مشخصاً دستگاه های زغالی اگر تمام روزهای سال و به طور شبانه روزی کار کنند، دارای ظرفیت ۷۵ درصد خواهند بود. دستگاه‌های نیروی باد متفاوت از دســـتگاه های مولد نیروی ســـوخت سوز هستند. بهره‌وری آنها به میزان و سرعت باد بستگی دارد. بنابراین ماشین‌های بادی نمی‌توانند در طول ســـال به طور ۲۴ ســـاعت کار کنند. یک توربین بادی در یک مزرعه‌ی بادی شاخص معمولا ۶۵ تا ۸۰ درصد شـــبانه روز کار می‌کند، اما این مقدار معمولاً کمتر از گنجایش کامل خود است، زیرا سرعت باد همیشه در بیشترین مقدار خود نیست. بنابراین عامل گنجایش حدود ۳۰ تا ۳۵ درصـــد بازده کل تعریف می شـــود. حتی اگر در علم اقتصاد نیز بخش عظیمی از گنجایش را داشته باشند، این امر خود اقتصادی نیست، زیرا تصمیم در این مورد براساس خروجی الکتریسیته در هر دلار، سرمایه‌گذاری به حساب می آید [۳]. یک ماشین بادی می‌تواند ۱/۵ تا ۴ میلیون کیلو وات ساعت (kWh) برق در سال تولید کند. این میزان برق برای ۱۵۰ تا ۴۰۰ خانه در ســـال کافی اســـت. مثلا در کشـــور امریکا، ماشین های بادی ۱۰ میلیارد کیلو وات ساعت انرژی در سال تولید می کنند. انرژی بادی حدود ۰/۱ درصد برق ملت را که مقدار کمی هست، تأمین می‌کند. این میزان برق برای کارهای خانگی یک میلیون خانه که به اندازهٔ شهرهای شیکاگو و ایلی نویز است، کافی می باشد.

کالیفرنیا بیشترین برق بادی را نسبت به سایر ایالت‌ها تولید می‌کند و تگزاس، منیسوتا و آیوا بعد از آن قرار دارند، ۱۳۰۰ ماشین بادی

موجود بیشتر از یک درصد برق کالیفرنیا را که حدود نصف میزان برق تولیدی در یک دستگاه نیروی هسته‌ای می باشد، تولید می‌کنند [۴]. در سه سال گذشته گنجایش باد کل جهان بیش از دو برابر شده است. متخصصان انتظار دارند در چند سال بعد، تولید انرژی از ماشین های بادی، سه برابر شود. هند و بسیاری از کشورهای اروپایی در حال برنامه‌ریزی برای تأسیس صنایع بادی جدید هستند. بسیاری از طرحهای جدید باد به علت عدم کنترل قانونی صنعت برق به تعویق درآورند. شرکت‌های خدماتی رفاهی و اجتماعی اطمینان نداشتند که چقدر عدم کنترل[1] روی تکنولوژی‌های جدید تأثیر می‌گذارد. با این وجود سرمایه گذاری روی انرژی بادی به علت هزینهٔ کم و تکنولوژی در حال پیشرفتش، در حال افزایش است. باد در حال حاضر یکی از رقابتی‌ترین منابع برای تولید است. نشانه ی امیدوار کننده ی دیگر برای صنعت بادی تقاضای مصرف کننده برای انرژی‌های سبز است. بسیاری از شرکت‌های خدماتی به تازگی به مصرف کنندگان اجازه داده که به طور داوطلبانه برای برق تولید شده از منابع تجدیدپذیر پول بیشتری بدهند. صنعت بادی برای برگشت به حالت تعویق یا موازنه درآمده است. یک برآورد کلی این گونه می‌گوید که ۷۲ تراوات (TW) انرژی باد بر روی زمین وجود دارد که پتانسیل تبدیل به انرژی الکتریکی را دارد و این مقدار قابل ترقی نیز هست.

۲- محدودیت‌های بهره برداری از نیروگاه بادی

میزان انرژی الکتریکی تولیدی توسط نیروگاه‌های بادی می‌تواند به شدت به چهار مقیاس زمانی، ساعت به ساعت، روزانه و فصلی وابسته باشد. این میزان به تحولات آب و هوایی سالیانه نیز وابسته است، اما تغییرات در این مقیاس زیاد محسوس نیستند. از آنجایی که برای ایجاد ثبات در شبکه، میزان انرژی الکتریکی تامین شده و میزان مصرف باید در تعادل باشند، از این جهت تغییرات دائم در میزان تولید این ضرورت را به وجود می‌آورد که از تعداد بیشتری نیروگاه بادی برای تولیدی متعادل‌تر در شبکه استفاده شود. از طرفی ادواری بودن طبیعی تولید انرژی باد موجب افزایش هزینه‌های تنظیم و راه اندازی می‌شود و (در سطوح بالا) ممکن است نیازمند اصول مدیریت تقاضای انرژی یا ذخیره‌سازی انرژی باشد. از ذخیره‌سازی با استفاده از نیروگاه‌های آب تلمبه‌ای یا دیگر روش‌ها ذخیره سازی برق در شبکه می‌توانند برای به وجود آوردن تعادل در میزان تولید نیروگاه‌های بادی استفاده کرد، اما در مقابل استفاده از این روش‌ها موجب افزایش ٪۲۵ هزینه‌های دائم اجرای چنین طرح‌هایی می‌شوند. ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی موجب به وجود آمدن تعادل بین دو بازه زمانی کم مصرف و پر مصرف خواهد شد و از این جهت میزان صرفه‌جویی، عاید از ذخیره‌سازی انرژی هزینه‌های اجرای آن را جبران می‌کند. یکی دیگر از راهکارهای ایجاد تعادل در تولید و مصرف، سازگار کردن میزان مصرف با میزان تولید با استفاده از ایجاد تعرفه‌های متفاوت زمانی برای مصرف‌کننده‌هاست [۵].

اهمیت حفاظت از اضافه ولتاژ ها در نیروگاه های بادی

اضافه ولتاژ های ظاهر شده در نیروگاه های بادی و تاثیر آنان در عمر و دوام ایزولاسیون تجهیزات فشار قوی در راستای هماهنگی عایقی بهینه مورد مطالعه قرار گرفته است. تاکنون اضافه ولتاژ های پدید آمده در شبکه ی قدرت نیروگاه بادی کمتر مورد توجه بودند و به دلیل اینکه فرض می شد که دامنه ی آنها محدود است، مطالعات کمی در این زمینه صورت گرفته است. اما با گذشت زمان و پیشرفت دانش، ثابت شده است که برخلاف این نظر، دامنه ی بزرگ اضافه ولتاژ ها در نیروگاه بادی می تواند به عنوان یک تهدید جدی و خطرناک در عایق بندی داخلی تجهیزات، شناخته شود. حال باید توجه داشت که دامنه ی اضافه ولتاژ ها در شبکه های توزیع به حدود ۲ تا ۲/۵ پریونیت با فرکانس ۵۰ هرتز می رسد. به همین دلیل نیز درصد حوادث روی داده ناشی از اضافه ولتاژ ها و اختلال در عایق بندی در مقایسه با درصد حوادث مشابه در شبکه های انتقال، در صورت رعایت دستورالعمل ها و پیش بینی های استاندارد ناچیز می باشد. با این همه، تاثیر اضافه ولتاژ ها در عمر و استقامت عایقی سایر تجهیزات نیروگاه بادی را نیز می توان در ردیف اضافه ولتاژ های بدخیم نظیر اضافه ولتاژ های خطوط انتقال در نظر گرفت. در کلیه ی مطالعات انجام شده، تاکید عمده بر اضافه ولتاژ های ناشی از قطع و وصل کلید ها و بروز قوس های طولی و عرضی در شبکه و تاثیر آنها بر کاهش عمر عایق بندی تجهیزات فشار قوی شبکه و بروز حوادث، بسیار مداوم بوده است. در مورد اضافه ولتاژ های موقت با فرکانس ۵۰ هرتز و اضافه ولتاژ های موجی و تخلیه ی جوی (که در ادامه با جزییات بیان خواهند شد)، دستورالعمل ها و مقررات خاص به منظور انتخاب سطح استقامت عایقی و

[1] Deregulation

مشخصات مناسب تجهیزات موجود به کار برده می شود و وظیفه و مسئولیت طراحان و سازندگان از یک طرف و بخش بهره برداری از طرف دیگر، از جمله روش های کاهش دامنه ی اضافه ولتاژ ها و هم آهنگ بودن سطح عایقی با آنها و ... روشن و مشخص می باشد. در عوض در قبال اضافه ولتاژ ناشی از قطع و وصل کلید ها، باز شدن هادی های ارتباطی، jumper ها و خطا های اتصال به زمین که همراه با قوس[2] می باشند، هیچ گونه توصیه و دستورالعمل مشخصی در استاندارد ها ارائه نشده است. لذا هر گونه عدم کنترل در دامنه و مشخصات این نوع اضافه ولتاژ ها، به طور مستقیم عمر و دوام عایق بندی تجهیزات شبکه را تهدید می نماید و باعث بروز عیب و صدمه ی غیر عادی و قابل توجه به آنها می گردد. بنابراین اضافه ولتاژ ها نقش تخریبی بسیار مهمی در قابلیت اطمینان شبکه و سلامت مردم ایفا می کنند که باید به درستی و با استفاده از روش های صحیح از وقوع آن ها جلوگیری به عمل آورد. از این نظر، در این پایان نامه تاکید عمده معطوف به اضافه ولتاژ های موجی ناشی از قطع و وصل گذرا و تاثیر آنها بر عمر استقامت عایقی ترانسفورماتور ها، توربین های بادی، ژنراتور ها، کلید های قدرت و ... بوده است [۱۳–۱۵]. مطالعات به هم پیوستگی سیستم قدرت از آن جهت حائز اهمیت است که از تامین بخشی از نیاز های شبکه توسط نیروگاه های بادی اطمینان حاصل گردد.

این مطالعات معمولا شامل پخش بار، بررسی خطا ها، کلید زنی، کنترل توان راکتیو و ... می باشد. این بررسی ها اطلاعاتی درباره ی ریسک های اعمالی ناشی از اضافه ولتاژ های موقت و گذرا بر اجزای نیروگاه های بادی در اختیار ما قرار می دهد. برای طراحی یک نیروگاه بادی قابل اعتماد و مناسب، بررسی ماکزیمم مقدار و مشتق (گرادیان) بر حسب زمان اضافه ولتاژ ها با دقت کافی امری مهم و ضروری به نظر می رسد. برخی از بهربردار های شبکه اهداف دقیقی را به منظور مطالعه ی دامنه و مدت زمان مجاز اضافه ولتاژ های موقت دنبال می کنند. حال برای برآورده کردن آن اهداف، بررسی حالات گذرایی که در آنها اضافه ولتاژ های موقت و خطرناکی به وقوع می پیوندد، لازم و حیاتی است. اجزای مختلف نیروگاه بادی مانند ترانسفورماتورها و ماشین های الکتریکی و ... در محدوده های فرکانسی مختلف، رفتار های غیر یکسانی را از خود نشان می دهند. برای مثال رفتار غالب یک سیم پیچ این گونه است که در فرکانس های پایین خاصیت سلفی و در فرکانس های بالا، خاصیت خازنی از خود نشان می دهد. مقاومت کابل ها نیز بر اثر افزایش فرکانس، طبق اثر پوستی افزایش می یابد و اثر میرا کنندگی به وجود می آورد. همچنین در مورد کلید های خلا و SF6، در نظر گرفتن اثر سیستم بر عملکرد آنها (نوع اغتشاشی که منجر به پاسخ کلید ها می شوند) و همچنین اثر آنها بر سیستم مانند مقاومت خود کلید و یا خازن موازی شده با کلید، امری ضروری به نظر می رسد. در این میان باید این نکته را نیز مد نظر قرار داد که ابزار های شبیه سازی حالات گذرای الکترو مغناطیسی، دقت کافی را در مدل کردن اجزای اصلی شبکه ی قدرت نیروگاه بادی در محدوده های فرکانسی لازم ندارند، لذا در برخی موارد استفاده از مدل تعریف شده به وسیله ی کاربر می تواند در بالا بردن دقت شبکه برای لحاظ کردن مدار معادل اجزا، نقشی تاثیر گذار ایفا کند.

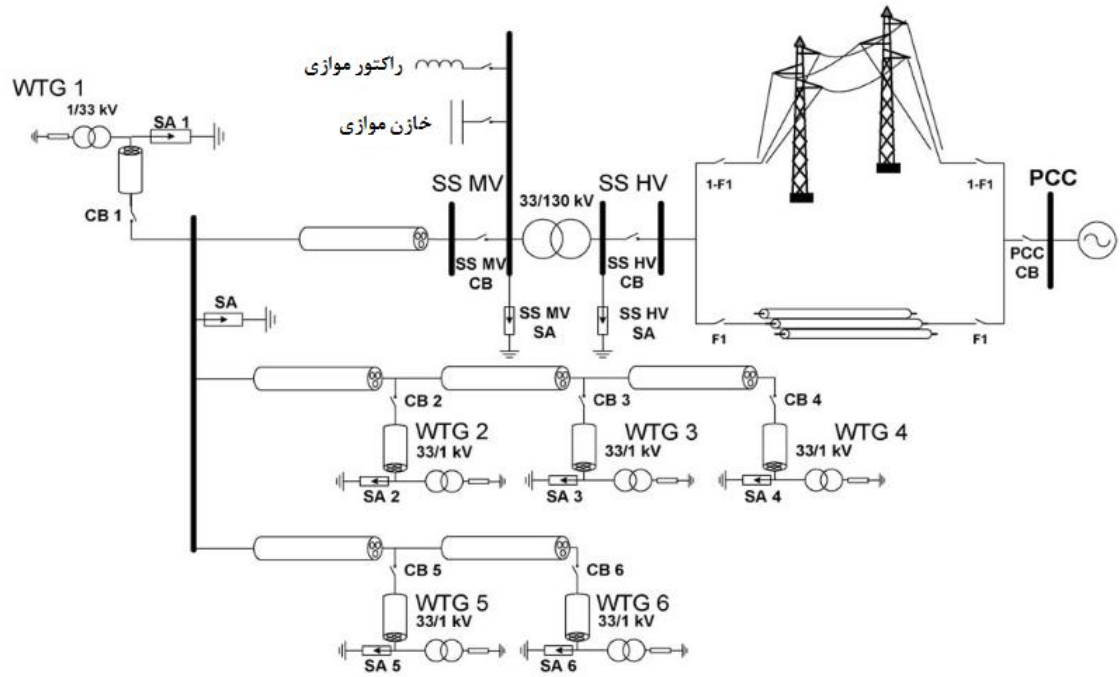
معرفی چند حالت بحرانی در نیروگاه بادی برای بررسی حالات گذرا

برای آنالیز حالت گذرای نیروگاه بادی، انجام کلید زنی های متفاوتی که بدترین شرایط را برای وقوع اضافه ولتاژ های مخرب نتیجه می دهد، امری ضروری تلقی می شود. این موضوع باعث می شود تا با دید وسیع تری بتوان به بررسی اضافه ولتاژ ها در نیروگاه های بادی پرداخت. از آنجایی که ترکیب بندی مزارع و نیروگاه های بادی منحصر به فرد و متفاوت از یکدیگر می باشند، در اینجا تنها یک نمونه از مکان های مختلف مدار شکن ها در یک نیروگاه بادی معمولی را می توان در شکل (۲) مشاهده نمود. با کمی دقت می توان فهمید که در آن، تمامی مدار شکن ها باز هستند و این موضوع برای مطالعه ی اضافه ولتاژ ناشی از بسته شدن کلید ها، باید همواره رعایت گردد. حال برای این سیستم، باز شدن کلید ها در حالات بحرانی زیر در نظر گرفته شده اند [۲۳]:

- باز شدن کلید نقطه ی اتصال نیروگاه بادی به شبکه (PCC[3])، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه بسته باشند.
- باز کردن کلید پست فشار قوی (HV[4])، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه بسته باشند.

[2] i.e. Arcing Ground Fualt
[3] Point of Common Coupling
[4] High Voltage

- **باز کردن کلید شین فشار متوسط (MV[5])، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه بسته باشند.**
- **بـــازکردن کلید نزدیکترین ژنراتور توربین بادی[6] به شـــبکه (همان WTG1 در شـــکل (۲)، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه بسته باشند.**
- **باز کردن کلید دورترین ژنراتور توربین بادی به شبکه ،در شکل (۲)، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه بسته باشند.**



شکل(۲) شمایی از یک نیروگاه بادی معمولی برای تحلیل کلید زنی [۲۳]

حالات بحرانی بسته شدن کلید عبارتند از:

- **بستن کلید PCC، در حالی که بقیه ی کلید های نیروگاه باز باشند.**
- **بستن کلید پست فشار قوی، در حالی که کلید PCC بسته و سایر کلید های نیروگاه باز باشند.**
- **بستن کلید فشار متوسط، در حالی که کلید PCC بسته و سایر کلید های نیروگاه باز باشند.**
- **بســتن کلید نزدیک ترین ژنراتور توربین بادی به شــبکه، در حالی که کلید های ســایر نیروگاه بسته و کلید های بقیه‌ی توربین ها باز باشند.**

بستن کلید دورترین ژنواتور توربین بادی به شبکه، در حالی که کلید های سایر نیروگاه بسته و کلید های بقیه‌ی توربین ها باز باشند.

معادلات حاکم بر قوس الکتریکی

پلاســمای قوس می تواند به وســیله معادلات نویر – استوکس، برای تفسیر فرآیند تغییرات جرم، اندازه حرکت، انرژی و معادلات ماکســول به کار روند تا روند الکترومغناطیســی – مکانیکی آن تشــریح شــود. به علاوه در نظر گرفتن فرآیند فیزیکی ستون قوس، انعکاس گرمای اهمی، خنک ســازی تشعشعی و تاثیر نیروی لونتس روی پلاسمای آن ناشی از میدان های خود القا و میدان خارجی، ضروری به نظر می رسد. معادلات حاکم بر قوس الکتریکی عبارتند از [۲۰]:

۴-۱- تعادل جرم

جرم قوس الکتریکی و گاز های درون محفظه، باید در قبل و بعد از تشکیل آن ثابت باشد. پس خواهیم داشت:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathrm{div}(\partial \vec{v}) = 0 \qquad (۱)$$

[5] Medium Voltage
[6] Wind Turbine Generator (WTG)

که در آن، ρ چگالی و $\vec{v}$ سرعت سیال است.

۴-۲- تعادل اندازه حرکت

معادله بالانس اندازه حرکت یونهای حامل انرژی قبل و بعد از برخورد به کنتاکتهای کلید عبارت است با:

$$\frac{\partial \rho v_k}{\partial t} + \mathrm{div}(\partial \vec{v}\, v_k) = -\frac{\partial P}{\partial x_k} + \sum_{n=1}^{2} \frac{\partial \left[\eta \left(\frac{\partial v_k}{\partial x_n} + \frac{\partial v_n}{\partial x_k}\right)\right]}{\partial x_n} + \left(\vec{J} \times \vec{B}\right)_k \qquad (۲)$$

که در آن، x_k و x_n مختصات کارتزین، v_k سرعت در مختصات $k\ (k = x, y)$ ، P فشار، $\vec{J}$ چگالی جریان، $\vec{B}$ چگالی شار مغناطیسی و η ویسکوزیته می باشند.

۴-۳- تعادل انرژی

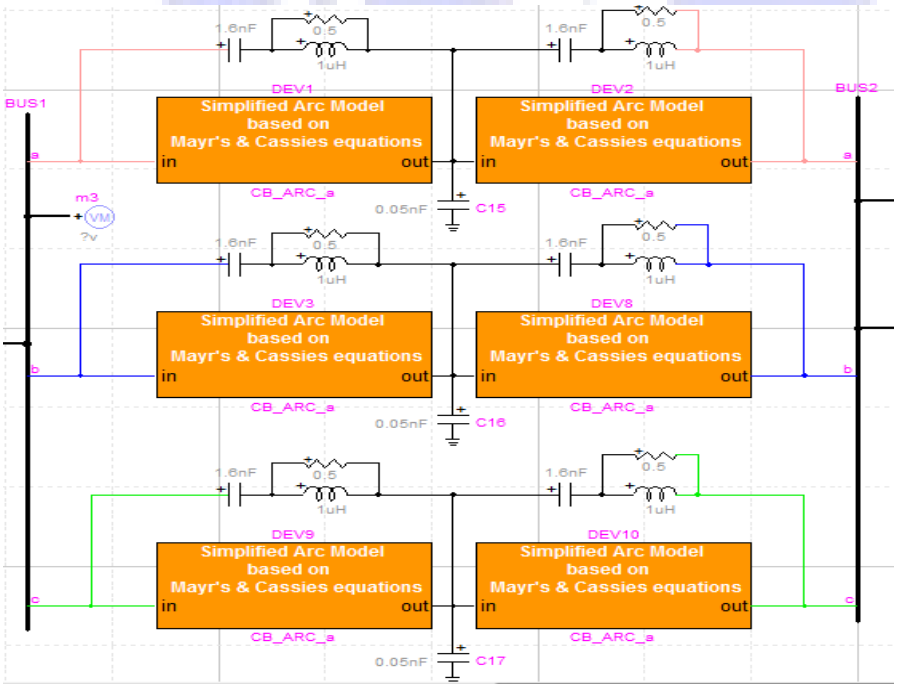
جمع جبری انرژی حرارتی، الکتریکی و مکانیکی موجود در محفظه کلید باید صفر باشد. لذا داریم:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + \mathrm{div}(\partial \vec{v}\, H) - \mathrm{div}\left(\lambda . \mathrm{grad}(T)\right) - \frac{\partial P}{\partial t} - V + S_R - \frac{J^2}{\sigma} = 0 \qquad (۳)$$

که در آن، σ هدایت الکتریکی، σ تابع تلفات ویسکوزیته، S_R خنک سازی تشعشعی، λ هدایت حرارتی و T دمای محیط می باشند.

نظریات قوس

همان گونه که پیشتر توضیح داده شد، رفتار قوس الکتریکی از قوانین فیزیکی بسیاری پیروی می کند که در نظر گرفتن همزمان همه آنها، دشواری های خاصی را برای حل مسئله به وجود می آورد. بدین منظور در ابتدا لازم است تا نظریات دانشمندان پیشین را در مورد قوس الکتریکی و رفتاز غیر خطی آن، مورد بررسی قرار دهیم. شایان ذکر است که مدل کلید و قوس آن در EMTP مانند شکل زیر می باشد:



شکل (۳) مدل قوس و کلید استفاده شده در EMTP

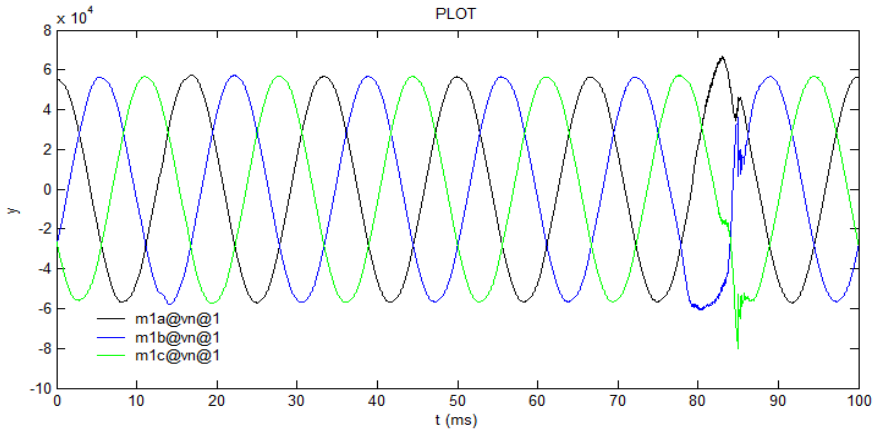
شبیه سازی انجام شده با کلید SF6 و مقایسه آن با کلید خلاء

در این قسمت از شبیه سازی ها، کلید خلاء با کلید SF6 جایگذاری می شود و نتایج آن طی چندین سناریو، ارائه و تحلیل می

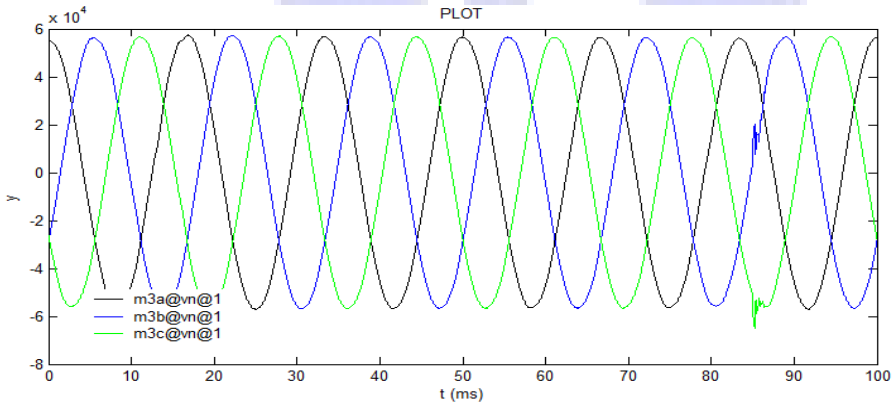
گردد.

سناریو ۱

در این ســناریو فرض می شود که کلیدهای SF6 **در** t=75 ms **باز شوند و سپس در** t=85 ms **توسط کلید** bypass **از مدار خارج گردند. نمودار اضافه ولتاژ اعمال شده به دو سمت فازهای کلید** SF6 **در شکل (۴) نشان داده شده است.**



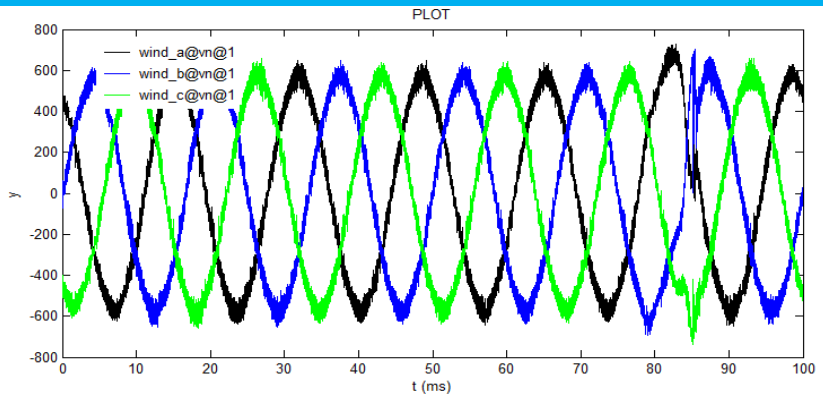
(الف)



(ب)

شکل(۴) اضافه ولتاژ اعمال شده به دو سمت فازهای کلید SF6 در سناریو ۱

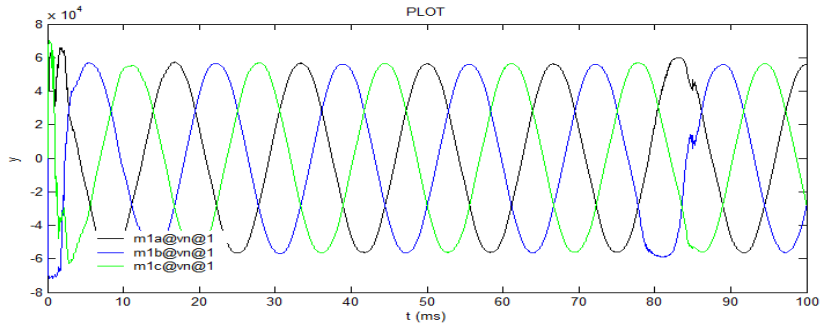
ملاحظه می‌شود در سمتی که کلید SF6 **به نیروگاه بادی متصل شده است، اضافه ولتاژها شدیدتر می‌باشد و در سمتی که به شبکه بالا دســت متصــل هســتند، اضافه ولتاژها کمتر هستند که به دلیل ظرفیت بالای شبکه بالادست می‌باشد. اضافه ولتاژ اعمال شده بر شین نیروگاه بادی نیز در شکل (۵) نشان داده می‌شود.**



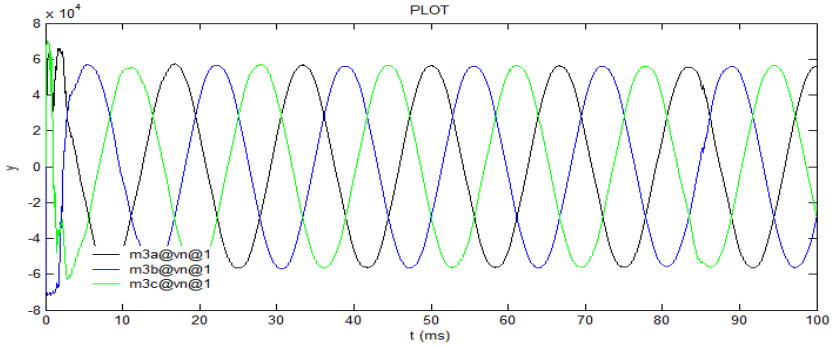
شکل (۵) اضافه ولتاژ اعمال شده بر شین نیروگاه بادی در سناریو ۱ کلید SF6

سناریو ۲

به منظور کاهش اضـــافه ولتاژ پدید آمده، از برقگیر ZNO ســـناریو قبل استفاده می شود. اکنون می توان نمودار اضافه ولتاژ اعمال شـــده بر کنتاکت‌های کلید را در شـــکل (۶) مشاهده نمود. ملاحظه می گردد که اضافه ولتاژ سمت شبکه بالادست به طور کامل از بین رفته است.



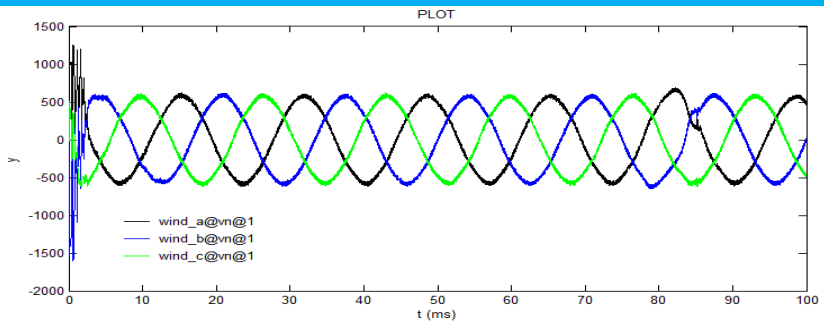
(الف)



(ب)

شکل (۶) اضافه ولتاژ اعمال شده به دو سمت فازهای کلید SF6در سناریو ۲

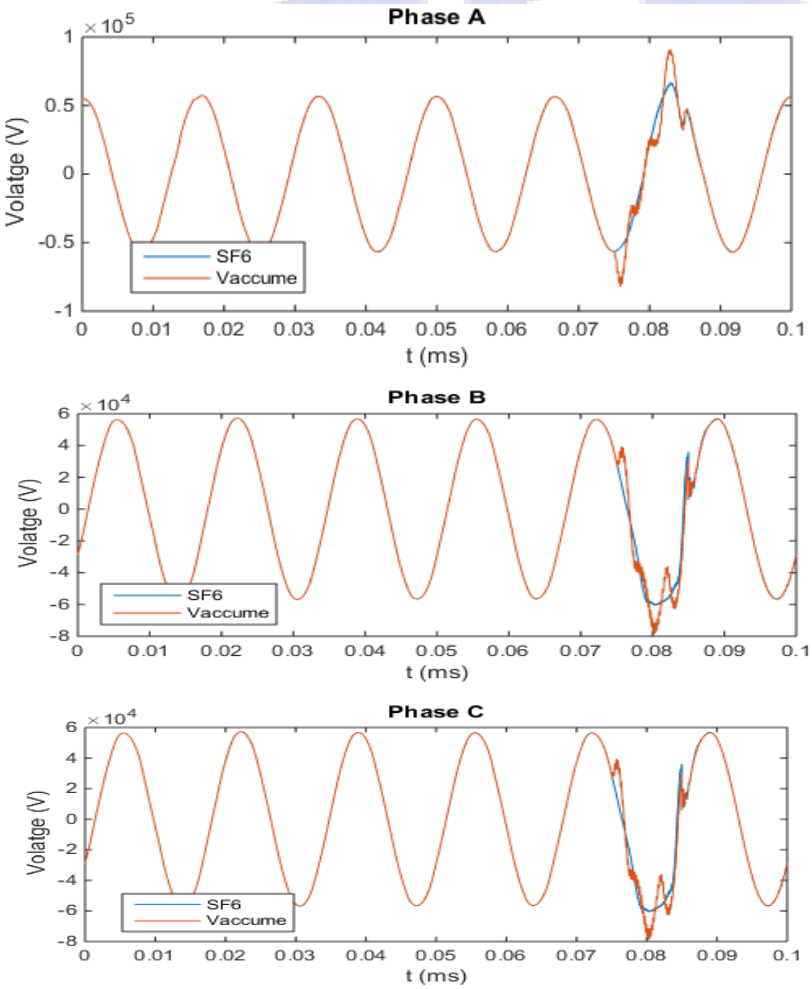
اضـــافه ولتاژ اعمال شـــده بر ترمینال مزارع بادی در شـــکل (۷) نشان داده شده است. با توجه به اینکه ولتاژ مرجع برقگیر به خوبی انتخاب شده است، اضافه ولتاژی تجهیزات نیروگاه بادی را تهدید نمی‌کند.



شکل(۷)اضافه ولتاژ اعمال شده بر شین نیروگاه بادی

۷-۳- مقایسه

با توجه به اینکه کلیدهای SF6 **از رسانایی حرارتی بیشتری برخوردارند، لذا می‌توانند بهتر از کلیدهای خلاء اضافه ولتاژها را دفع کنند. مقایسه حداکثر ولتاژ اعمال شده به کنتاکتهای کلید در شکل (۸) و جدول (۱) آورده شده است که نشان از بهتر بودن کلیدهای** SF6 **می دهد.**



شکل (۸) نمودار مقایسه اضافه ولتاژهای اعمال شده به کنتاکت کلید با استفاده از کلیدهای خلا و SF6

جدول (۱) مقایسه کلیدهای خلا و SF6 در حالت وجود تنها یک مزرعه بادی

نوع کلید	ماکزیمم اضافه ولتاژ کنتاکت سمت نیروگاه بادی	ماکزیمم اضافه ولتاژ کنتاکت سمت شبکه بالا دست
کلید خلا	92 kV	63 kV
کلید SF6	78 kV	63 kV

نتیجه گیری

در این مقاله هدف مطالعه حالت گذرای سیستم قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی است که از طریق کلید خلأ به شبکه قدرت قطع و وصل می‌شوند. با توجه به تغییرات سرعت باد که سبب تغییر توان تولیدی این نیروگاه‌ها می‌گردد به‌طور مرتب این نیروگاه‌ها قطع و وصل می‌شوند و همین کلیدزنی این نیروگاه‌ها توسط کلید خلأ اضافه ولتاژهایی را در شبکه قدرت ایجاد می‌کند که در این تحقیق هدف مطالعه این اضافه ولتاژها، شبیه‌سازی آن‌ها در محیط نرم‌افزار EMTP-RV**، ارائه روش‌های کاهش این اضافه ولتاژها و بررسی کارایی این روش‌ها در کاهش اضافه ولتاژ ایجاد شده از طریق شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار ذکرشده می‌باشد. به‌طور کلی می‌توان اهمیت مطالعات حالت گذرا در شبکه قدرت و بررسی اضافه ولتاژها و اضافه جریان‌های ایجاد شده به منظور جلوگیری از آسیب دیدن تجهیزات گران‌قیمت سیستم قدرت تأثیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر بر سیستم قدرت از جمله بر اضافه ولتاژ ایجاد شده در این سیستم ناشی از قطع و وصل نیروگاه‌های بادی و تعیین میزان اضافه ولتاژ ایجاد شده در شبکه قدرت با حضور نیروگاه‌های بادی ارائه روش‌های مناسب جهت کاهش اضافه ولتاژ ایجاد شده است. با توجه به نتایج شبیه سازی و مقایسه کلید خلا و** SF6 **ملاحظه می شود در سمتی که کلید خلا به نیروگاه بادی متصل شده است، اضافه ولتاژها شدیدتر می باشد و در سمتی که به شبکه بالا دست متصل هستند، اضافه ولتاژها کمتر هستند که به دلیل ظرفیت بالای شبکه بالادست می باشد. با توجه به اینکه کلیدهای** SF6 **از رسانایی حرارتی بیشتری برخوردارند، لذا می توانند بهتر از کلیدهای خلاء اضافه ولتاژها را دفع کنند.**

ولتاژها را دفع کنند.

مراجع

[۱] Earnest, J., & Rachel, S. (2019). Wind power technology. PHI Learning Pvt. Ltd.. of Electrical Power & Energy Systems, 99, 146-155.

[۲] Ackermann, T. (Ed.). (2012). Wind power in power systems. John Wiley & Sons.

[۳] Yan, J., Li, G., & Liu, K. (2020). Development trend of wind power technology. UMBC Student Collection.

[۴] Owens, B. N. (2019). The Wind Power Story: A Century of Innovation that Reshaped the Global Energy Landscape. John Wiley & Sons.

[۵] Tazay, A. F., Ibrahim, A. M. A., Noureldeen, O., & Hamdan, I. (2020). Modeling, control, and performance evaluation of grid-tied hybrid PV/wind power generation system: Case study of Gabel El-Zeit region, Egypt. IEEE Access, 8, 96528-96542.

[۶] Ayodele, T. R., Jimoh, A., Munda, J. L., & Tehile, A. J. (2012). Challenges of grid integration of wind power on power system grid integrity: A review. International journal of renewable energy research (IJRER), 2(4), 618-626.

[۷] Denno, K. (2018). High Voltage Engineering in Power Systems. CRC Press.

[۸] Zhou, Z., Guo, Y., Jiang, X., Liu, G., Tang, W., Deng, H., ... & Zheng, M. (2019). Study on Transient Overvoltage of Offshore Wind Farm Considering Different Electrical Characteristics of Vacuum Circuit Breaker. Journal of Marine Science and Engineering, 7(11), 415.

[۹] Zhou, J., Xin, Y., Tang, W., Liu, G., & Wu, Q. (2019). Impact factor identification for switching overvoltage in an offshore wind farm by analyzing multiple ignition transients. IEEE Access, 7, 64651-64662.

[۱۰] Wu, J., Wang, L., Ren, Z., & Guo, Y. (2019). Simulation Study on Transient Over-voltage in Power Collection Network of Offshore Wind Farm Considering Prestrike Characteristics of Vacuum Circuit Breaker. High Voltage Apparatus, 55(10), 38-43.

[۱۱] Gockenbach, E. (2021). High Voltage Engineering. In Springer Handbook of Power Systems (pp. 131-182). Springer, Singapore.

[۱۲] Rodrigues, R. B., Mendes, V. M. F., & Catalão, J. P. D. S. (2011). Protection of wind energy systems against the indirect effects of lightning. Renewable energy, 36(11), 2888-2896.

[۱۳] Sunjerga, A., Li, Q., Poljak, D., Rubinstein, M., & Rachidi, F. (2019). Isolated vs. interconnected wind turbine grounding systems: Effect on the harmonic grounding impedance, ground potential rise and step voltage. Electric Power Systems Research, 173, 230-239.

[۱۴] Madsen, P. H., & Risø, D. T. U. (2008). Introduction to the IEC 61400-1 standard. Risø National Laboratory, Technical University of Denmark.

[۱۵] BALCI, S., & HELVACI, Ö. (2019). A comparative simulation on the grounding grid system of a wind turbine with FEA software. Journal of Energy Systems, 3(4), 148-157.

[۱۶] Saadat, H. (1999). Power system analysis (Vol. 2). McGraw-hill.

[۱۷] Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. (2012). Power system analysis & design, SI version. Cengage Learning.

[۱۸] Chow, J. H., & Sanchez-Gasca, J. J. (2020). Power system modeling, computation, and control. John Wiley & Sons.

[۱۹] Abdel-Salami, M. (2018). High-Voltage Generation. In High-Voltage Engineering (pp. 519-566). CRC Press.

[۲۰] Garzon, R. D. (2002). High voltage circuit breakers: design and applications. CRC Press.

[۲۱] Naemi, M., & Brear, M. J. (2020). A hierarchical, physical and data-driven approach to wind farm modelling. Renewable Energy, 162, 1195-1207.

[۲۲] Jalali, M. (2011). DFIG based wind turbine contribution to system frequency control (Master's thesis, University of Waterloo.(

[۲۳] Badrzadeh, B., Zamastil, M. H., Singh, N. K., Breder, H., Srivastava, K., & Reza, M. (2012). Transients in wind power plants—Part II: Case studies. IEEE Transactions on Industry Applications, 48(5), 1628-1638.