

Reduction of overvoltage occurred in the switching of wind power plants using of surge arresters

Ali Ebrahimi, *MSc*

Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran
ali09217241129@gmail.com

Received: 24 April 2024

Revised: 13 August 2024

Accepted: 19 August 2024

Abstract:

Due to the problems associated to the fossil fuel-based power plants, such as pollution production, climate change, global warming and warning about price change, the use of renewable power plants especially wind power plants in the power grid is increasing day by day. Due to large changes in the grid load and also changes in wind speed, wind power plants are regularly switched in the grid, which is done by vacuum switches. Due to the switching of these power plants, overvoltages occur in the power grid. The main factor causing overvoltage during switching is the reconnection of the switch when the contacts open, so that these overvoltages are in some cases so high that they can lead to insulation failure in some equipment including wind turbines, switches, insulators, protective equipment, measuring equipment and cables. Therefore, these overvoltages should be investigated. In this article, the modeling of switches and wind power plants in power system transient studies is examined in order to study the effect of switching these power plants, which leads to overvoltages. Then, using a lightning arrester, the overvoltage caused by the switching of the wind power plant is reduced. In order to simulate these overvoltages, EMTP-RV software, which is one of the powerful software in the field of power system transient analysis, has been used.

Keywords: wind power plants, switching, overvoltage, surge arrester, EMTP-RV software

Corresponding Author: Ali Ebrahimi

Corresponding Author Address: Department of Electrical Engineering- Kazerun Branch -Islamic Azad University- Kazerun, Iran

کاهش اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی نیروگاه بادی توسط برقگیر

علی ابراهیمی، کارشناسی ارشد

گروه برق، واحد کازرون، دانشگاه آزاد اسلامی، کازرون، ایران
ali09217241129@gmail.com

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۹

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۲/۰۵

چکیده: به دلیل مشکلات ناشی از سوخت‌های فسیلی به مانند آلودگی زیست محیطی، تخریب لایه ازن، گرم شدن کره زمین و تغییرات آب و هوایی، استفاده از نیروگاه‌های تجدیدپذیر مختلف از جمله نیروگاه‌های بادی در شبکه قدرت روز به روز در حال افزایش است. به دلیل تغییرات زیاد در بار شبکه و همچنین تغییرات سرعت باد، نیروگاه‌های بادی مرتباً در شبکه کلیدزنی می‌شوند که این کار توسط کلید خلا انجام می‌شود. به دلیل کلیدزنی این نیروگاه‌ها در شبکه برق اضافه ولتاژهایی اتفاق می‌افتد. اصلی ترین عامل ایجاد اضافه ولتاژ در هنگام کلیدزنی، بحث وصل مجدد کلید در زمان باز شدن کنتاکت‌ها می‌باشد بطوریکه این اضافه ولتاژها در برخی موارد آنقدر زیاد است که شکست عایقی در برخی تجهیزات از جمله توربین بادی، کلیدها، مقره‌ها، تجهیزات حفاظتی، تجهیزات اندازه‌گیری و کابل‌ها را می‌تواند به دنبال داشته باشد. بنابراین این اضافه ولتاژها باید مورد بررسی قرار بگیرد. در این مقاله مدل‌سازی کلیدها و نیروگاه‌های بادی در مطالعات حالت گذرای سیستم قدرت مورد بررسی قرار گرفته تا بتوان اثر کلیدزنی این نیروگاه‌ها را که منجر به اضافه ولتاژ می‌گردد مطالعه نمود. سپس با استفاده از برقگیر، اضافه ولتاژ ایجاد شده ناشی از کلیدزنی نیروگاه بادی کاهش داده می‌شود. به منظور شبیه‌سازی این اضافه ولتاژها از نرم‌افزار EMTP-RV که یکی از نرم‌افزارهای قوی در زمینه تحلیل حالت گذرای سیستم قدرت می‌باشد استفاده شده است.

کلمات کلیدی: نیروگاه‌های بادی، کلیدزنی، اضافه ولتاژ، برقگیر، نرم‌افزار EMTP-RV

نام نویسنده‌ی مسئول: علی ابراهیمی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کازرون - دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون - دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

با توجه به افزایش روزافزون نیاز به انرژی و محدودیت منابع فسیلی از یک سو و همچنین افزایش آلودگی‌های زیست محیطی ناشی از سوزاندن این منابع از سوی دیگر، استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر را بیش از پیش با اهمیت‌تر و گسترده‌تر نموده است. انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد که از گذشته‌های دور ذهن بشر را به خود معطوف کرده است. در سال ۲۰۰۶ برای اولین بار در اتحادیه‌ی اروپا رشد تولید برق از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر بیش از رشد تولید برق از منابع فسیلی بود. از سال ۲۰۰۱ تا ۲۰۰۸ میلادی ظرفیت تولید برق با استفاده از انرژی بادی در دنیا از ۱۸۰۰۰ مگاوات به ۹۲۰۰۰ مگاوات افزایش یافته است، از سال ۲۰۰۰ تاکنون این صنعت سالانه حدود ۲۵ درصد رشد کرده و هر سه سال دو برابر شده است و این در شرایطی است که رشد اقتصاد جهان از یک تا دو درصد در سال بیشتر نیست [۱]. بنابر گزارش‌های بخش انرژی آمریکا در سال ۲۰۱۶ توان ۲۷ درصدی به انرژی‌های بادی این کشور اضافه شده است. همچنین کشور انگلستان پروژه‌ی ساخت ۳۰۰ توربین بادی دور از ساحل با مجموع توان ۱/۸ گیگا وات را از سال ۲۰۱۶ آغاز نموده است.

کشور ما ایران با توجه به گستردگی زیاد، تنوع آب و هوای گوناگون، کوه‌های مرتفع، دشت‌های پهناور و سواحل طولانی، مناطق باد خیز فراوانی داشته و از این نظر رتبه اول را در بین کشورهای منطقه دارا است. ایران همگام با پیشرفت جهانی از سال ۱۳۷۳ با نصب دو توربین بادی به ظرفیت ۵۵۰ کیلووات به باشگاه کشورهای صاحب فناوری تولید برق از باد پیوست. در حال حاضر نیروگاه بادی ۱۰۰ مگاواتی منجیل در استان گیلان در حال بهره‌برداری بوده و نیروگاه بادی ۲۸/۳ مگاواتی بینالود شامل ۴۳ توربین ۶۶۰ کیلو واتی در استان خراسان رضوی در حال بهره‌برداری می‌باشد [۲]. گذراهای ناشی از کلیدزنی در توربین‌های بادی در طول شرایط مختلف کاری یکی از مهمترین عوامل بررسی و مطالعات هماهنگی عایقی در مزرعه‌های بادی محسوب می‌شود. همچنین مدل‌های ارائه شده از استانداردهای بین المللی برای در نظر گرفتن برخی شرایط در مزرعه‌های بادی فراساحلی کافی نمی‌باشند. برای سالیان طولانی تنها صاعقه سبب بوجود آمدن پالس‌های نوک تیز، در بازه‌های میکروثانیه بوده است. این پالس‌های موجی در نقاط اتصال منعکس می‌شوند و سبب بوجود آمدن اضافه ولتاژهای بالا می‌گردند. اضافه ولتاژهای ناشی از صاعقه که سبب آسیب رساندن به عایق تجهیزات می‌شدند با استفاده از برقگیر کاهش می‌یافتند و تا حدودی که برای تجهیزات مضر نباشد آن‌ها را کم می‌کرد. بنابراین این تجهیزات در مقابل صاعقه کار آمد بود. تحقیقات بیشتر در این زمینه لازم نبود تا زمانی که شکست‌های عایقی تجهیزات با سطح ولتاژ پایین مشاهده شدند. این شکست‌های عایقی ناشی از گسترش و استفاده‌ی درایوها در موتور القایی بود [۳].

یکی دیگر از موارد افزایش شکست عایقی به دلیل گسترش استفاده از نیمه رساناهای بکار رفته در الکترونیک قدرت بود. ترانزیستورها که مشخصه‌ی کلیدزنی سریعی دارند سبب بوجود آمدن پالس‌های با زمان خیز کوتاه می‌شدند که این IGBT ها در اینورترهای PWM برای تغییر سرعت موتورهای القایی استفاده می‌شدند. زمان خیز این پالس‌ها می‌توانستند خیلی کم، کمتر از ۰/۱ میکرو ثانیه باشند [۴]. دلیل دیگر افزایش شکست عایقی، گسترش کلیدهای استفاده شده در شبکه‌های قدرت می‌باشد. کلیدهای استفاده شده در شبکه تاثیر منفی قوی بر روی عایق تجهیزات داشتند. یکی از این نوع کلیدها، بریکرهای خلاء بودند که مشخصه قطع بالا و بازیابی دی‌الکتریک بالا داشتند [۵]. بریکرهای خلاء قیمت نگهداری کم، استقامت بالا و بهترین عملکرد را در سطح ولتاژ پایین تر از ۲۴ کیلوولت دارا می‌باشند [۶]. با این وجود گزارش‌های زیادی در سراسر دنیا حاکی از شکست عایقی ترانسفورماتورها به دلیل استفاده از کلیدزنی کلیدهای خلاء اعلام شده است [۷-۱۱]. این در حالی است که ترانسفورماتورهای مذکور تمام تست‌های استاندارد را قبل از نصب گذرانده بودند. با این وجود مطالعات دیگر نشان می‌دهد که تنها کلیدهای خلاء نیستند که سبب بوجود آمدن اضافه ولتاژهایی خطرناک برای ترانسفورماتورها می‌شوند، بلکه کلیدهای با گاز SF6 هم همین ویژگی‌ها را دارند [۱۲]. ده سال مطالعات طولانی که شامل تشخیص شکست هزاران ترانسفورماتور در یکی از شرکت‌های بیمه انجام شده است نشان می‌دهد که گذراهای فرکانس بالا دلیل اصلی شکست‌های عایقی می‌باشند، بر طبق این مطالعه ۳۳/۹ درصد از شکست عایقی ترانسفورماتورها ناشی از گذراهای فرکانس بالا می‌باشد [۱۳]. برخی از مطالعات در مورد چگونگی تولید اضافه ولتاژهای بالا در سیم پیچ‌های داخلی ترانسفورماتور می‌باشند که عامل اصلی شکست عایقی ترانسفورماتورها در گذراهای فرکانس بالا هستند. همانطور که در برخی مطالعات در مورد موتورهای

القایی نشان داده شده است، جرعه‌های مکرر برای موتورهای القایی خطرناک هستند و به همین دلیل خیلی دور از انتظار نیست که همین پدیده برای عایق ترانسفورماتور نیز خطرناک باشد [۱۴-۱۵]. یک پدیده‌ی واقعی از شکست عایقی ترانسفورماتورها در یکی از مزارع بادی دانمارک بود که مجبور به تعویض تقریباً تمام ترانسفورماتورها شدند [۱۶-۱۷]. مطالعات انجام شده بر روی شکست عایقی موتورهای به علت کلیدزنی نشان می‌دهد که موج‌های تولید شده هنگام کلیدزنی ناشی از کلید هوا خیلی شبیه به کلید خلاء می‌باشد. بر طبق یکی از این مطالعات، موج‌های تولید شده توسط کلید هوا دارای دامنه‌ای در حدود ۴/۴ پریونیت با زمان صعود ۰/۲ میکروثانیه هستند، در حالی که موج‌های تولید شده ناشی از کلیدهای خلاء با دامنه ۴/۶ پریونیت ولی با زمان صعود بیشتر در حدود ۰/۶ میکرو ثانیه می‌باشند. عامل دیگر که شکست عایقی را بیشتر می‌کند کلیدزنی IGBTها و کلیدهای خلاء در حضور کابل‌ها در سیستم‌های با ولتاژ پایین و ولتاژ متوسط می‌باشد. امپدانس مشخصه‌ی کابل‌ها تقریباً ده برابر کوچکتر از امپدانس مشخصه‌ی خطوط انتقال می‌باشد که این به معنی ده برابر بودن مشتق اضافه ولتاژ گذرا است. بررسی حالت گذرا در کابل‌های با طول بیشتر از ۵۰ متر دشوارتر می‌گردد، چرا که شبیه خطوط انتقال عمل می‌کند و انتشار موج و بازگشت موج در آن دیده می‌شود. در [۱۸] مدل معادل مزرعه بادی برای انجام مطالعات حالت گذرا به دست آورده شده است. در این مقاله مطالعات حالت گذرای نیروگاه بادی برای کنترل حالت گذر از خطا انجام شده است. در [۱۹] مطالعات حالت گذرای نیروگاه بادی در هنگام اصابت موج صاعقه انجام شده است. در این مقاله هم به صورت شبیه‌سازی و هم به صورت آزمایشگاهی تحلیل گرمای ایجاد شده در پره‌های توربین بادی در هنگام برخورد صاعقه به آن انجام شده است. مقاله [۲۰] به روش تحلیلی مکانیزم ایجاد شده در حالت گذرای مربوط به اضافه ولتاژ ایجاد شده در ژنراتورهای توربین بادی با درایو مستقیم مورد بررسی قرار گرفته است. در این مقاله نیروگاه بادی به یک سیستم ضعیف متصل شده و روش کاهش اضافه ولتاژ ایجاد شده بررسی شده است.

با توجه به مقالات مرور شده و شکاف تحقیقاتی موجود در زمینه مطالعه حالت گذرای نیروگاه‌های بادی نوآوری‌های این تحقیق به صورت زیر می‌باشد:

- تحلیل حالت گذرای نیروگاه بادی در مطالعات کلیدزنی
 - بررسی استفاده از برقگیر به منظور کاهش اضافه ولتاژ نیروگاه بادی در هنگام کلیدزنی
- با توجه به اهمیت مطالعه اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی نیروگاه‌های بادی در شبکه قدرت، در این مقاله اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی نیروگاه بادی مورد مطالعه قرار می‌گیرد. به منظور کاهش این اضافه ولتاژ در این مقاله اثر استفاده از برقگیر مورد بررسی قرار گرفته است. بنابراین سازماندهی این مقاله به صورت زیر می‌باشد. در بخش دوم مدلسازی تجهیزات صورت گرفته و در بخش سوم شبیه‌سازی اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی نیروگاه بادی در محیط نرم‌افزار EMTP-RV انجام می‌شود. در این بخش اثر استفاده از برقگیر به منظور کاهش اضافه ولتاژ نیز بررسی می‌گردد. نتیجه‌گیری مقاله نیز در بخش چهارم آورده شده است.

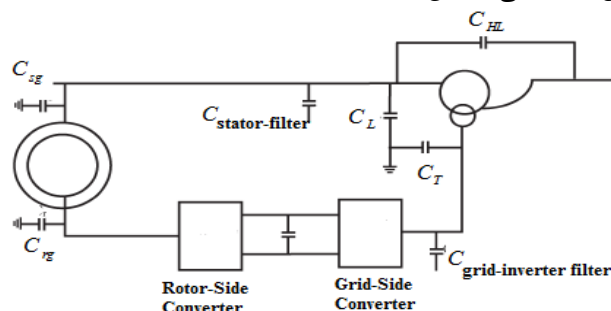
۲- مدلسازی تجهیزات در مطالعات حالت گذرا

در این بخش از مقاله، مدلسازی تجهیزات شبکه قدرت شامل نیروگاه بادی، ترانسفورماتور، کابل و برقگیر انجام می‌شود. در نیروگاه‌های بادی، خازن‌های نشی ماشین‌های القایی بطور عمده بصورت خازن سیم‌پیچ‌های استاتور نسبت به بدنه (C_{sf})، خازن سیم‌پیچ‌های استاتور نسبت به روتور (C_{sr}) و خازن روتور نسبت به بدنه (C_{rf}) تقسیم‌بندی می‌شوند. خازن بین سیم‌پیچ‌های استاتور نسبت به روتور (C_{sr}) معمولاً بین ۳۰-۱۰۰ برابر بزرگتر از خازن بین سیم‌پیچ‌های روتور و استاتور نسبت به بدنه هستند. می‌توان تقریباً زیر را برای خازن‌های نشی ژنراتور القایی دو سو تغذیه در نظر گرفت.

$$C_{sf} \gg C_{rf} \gg C_{sr} \quad (۱)$$

به دلیل وجود فاصله‌ی هوایی بزرگ استاتور و روتور و بخش‌های دندانه‌ای آن، می‌توان از خازن نشی روتور صرف نظر کرد. بنابراین می‌توان از خازن نشی بین روتور و استاتور و همچنین روتور نسبت به بدنه صرف نظر کرد. خازن نشی اصلی برای ماشین القایی تنها خازن استاتور نسبت به بدنه است که مقدار آن برای یک ترانسفورماتور ۳ مگاوات، برابر با ۹۳ نانو فاراد است.

خازن‌های ناشی ژنراتور دو سو تغذیه تاثیر بسیار کمی به دلیل اندازه‌ی کوچک آنها نسبت به فیلترهای فرکانس بالا دارند. همچنین فیلترهای فرکانس بالا در اضافه ولتاژهای فرکانس بالا به صورت مدار باز عمل می‌کنند. برای مطالعه گذراهای سیستم قدرت خازن‌های ناشی ژنراتور می‌تواند در نظر گرفته نشوند. می‌توان ژنراتور و کانورترهای آن را به صورت یک امپدانس که اندازه‌ی آن برابر با توان ژنراتور است مدل‌سازی کرد. برای بررسی موج‌های رسیده به ژنراتور باید خازن‌های آن نیز در نظر گرفته شود. در شکل ۱ تمام خازن‌های ناشی نمایش داده شده‌اند.



شکل (۱): پارامترهای ناشی در مدل گذرای ژنراتور دو سو تغذیه

مدل مناسب ترانسفورماتور برای مطالعات گذرا با مدل رایج در فرکانس قدرت آن متفاوت است. در قسمت مدل‌سازی بریکر خلاء مشاهده شد که هنگام کلیدزنی، گذراهای فرکانس بالایی به وجود می‌آیند که برای مشاهده‌ی تاثیر درست آنها به یک مدل دقیق از ترانسفورماتور برای شبیه‌سازی در حوزه‌ی زمان نیاز است. مدل ایده آل ترانسفورماتور باید مشخصه‌ی مغناطیس شوندگی غیر خطی هسته و وابستگی فرکانسی را شامل باشد که بدست آوردن چنین مدلی دشوار می‌باشد. برای مدل‌سازی ترانسفورماتور ابتدا باید فرکانس مورد نظر و مدل مربوطه را از جدول ۱ بدست آورد.

جدول (۱): راهنمای وابسته به فرکانس مدل‌سازی ترانسفورماتور

مشخصه	۱۰ کیلوهرتز تا ۳ مگاهرتز	۵۰-۶۰ هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز	۰/۱ هرتز تا ۳ کیلوهرتز	۵۰ کیلوهرتز تا ۱۰۰ مگاهرتز
امپدانس اتصال کوتاه اشباع	مهم برای انتقال موج	خیلی مهم	خیلی مهم	قابل چشم پوشی
تلفات وابسته به فرکانس هیستریزس و تلفات آهنی	قابل چشم پوشی	خیلی مهم برای برقرار کردن ترانسفورماتور	خیلی مهم	قابل چشم پوشی
خازن‌های ناشی	خیلی مهم برای انتقال موج	مهم برای انتقال موج	مهم فقط برای رزونانس	قابل چشم پوشی

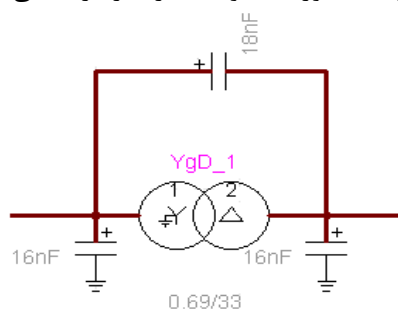
در مدل‌سازی ترانسفورماتور برای مطالعه‌ی حالت گذرا دو مدل ارائه شده است. اگر هدف مطالعه، تنها تاثیر حالت گذرا بر روی ترانسفورماتور باشد باید یک مدل دقیق با جزئیات کامل استفاده شود. برای این مطالعه‌ی دقیق باید نوع سیم‌پیچی، مشخصه‌های الکتریکی عایق ترانسفورماتور و ابعاد آن در نظر گرفته شوند. در چنین مطالعاتی ولتاژهای حلقه سیم‌پیچ‌های داخلی مطالعه می‌شود و هر کدام به عنوان یک مدار معادل مدل‌سازی می‌گردد. این مدل همچنین در سال ۱۹۵۰ میلادی استفاده شده است و نتایج دقیقی به همراه داشته است. مزیت چنین مدلی، دقیق بودن آن در تمام فرکانس‌ها است، اما تنها مشکل آن عدم در نظر گرفتن مشخصه‌ی غیر خطی هسته هنگام اشباع می‌باشد، اگرچه در هنگام مطالعه‌ی گذراهای سریع هنگام بارداری ترانسفورماتور و در بی‌باری ترانسفورماتور فقط در فرکانس‌های بیش از ۱۰۰ کیلوهرتز می‌توان ترانسفورماتور را خطی در نظر گرفت. اما مشکل اصلی برای چنین مدلی چگونگی ساختار داخلی ترانسفورماتور است که در عمل حتی برای سازندگان ترانسفورماتور وجود ندارد چرا که بعد از ساخت باید آن را باز کنند و مشخصات دقیق آن را ثبت نمایند و اگر هم

داشته باشند از انتشار آن خودداری می‌کنند. اگر هدف از مطالعه‌ی حالت گذرا تنها تاثیر گذرا بر ترانسفورماتور به صورت یک واحد باشد می‌توان آن را بصورت یک جعبه سیاه در نظر گرفت. در فرکانس‌های کم راکتانس‌های ناشی عناصر غالب امپدانس ترانسفورماتور هستند، اما هنگامی که فرکانس زیاد می‌شود خازن‌های ناشی در پاسخ فرکانسی اهمیت پیدا می‌کنند. این مدل در مطالعات زیادی در نظر گرفته شده و ثابت شده است که برای مطالعه‌ی گذرای فرکانس بالا نتایج آن قابل قبول است. بنابراین اضافه کردن خازن‌های ناشی به مدل استاندارد ترانسفورماتور برای مطالعه‌ی کلیدزنی در بریکر و کابل و ترانسفورماتور بی‌بار یا باردار مناسب می‌باشد. اگر هدف از مطالعه، موج‌های بین اولیه و ثانویه ترانسفورماتور باشد، خازن‌های ناشی بین سیم پیچ‌های اولیه و ثانویه باید در نظر گرفته شوند. مقدار خازن‌های ناشی در ترانسفورماتور توسط شرکت‌های سازنده ارائه می‌گردد و طبق محدودیت خاصی مربوط به توان ترانسفورماتور تخمین زده می‌شوند. برای ترانسفورماتور دارای هسته مقادیر جدول ۲ استفاده می‌شود. برای ترانسفورماتورهای با عایق رزین با تخمین ۱۰ برابر کوچکتر نسبت به ترانسفورماتورهای با عایق روغن تخمین زده می‌شوند.

جدول (۲): مقدار خازن‌های ناشی بین سیم پیچ‌های فشار قوی نسبت به زمین، فشار ضعیف نسبت به زمین و فشار قوی نسبت به فشار ضعیف

خازن ناشی فشار قوی نسبت به فشار ضعیف (μF)	خازن ناشی فشار ضعیف به زمین (μF)	خازن ناشی فشار قوی به زمین (μF)	توان نامی ترانسفورماتور (MVA)
۱۷-۱/۲	۱۶-۳/۱	۴-۱/۲	۱
۱۸-۱	۱۶-۳	۱۶-۱/۲	۲
۲۰-۱/۱	۱۷-۵/۵	۱۴-۱/۲	۵
۱۱-۴	۱۸-۸	۷-۴	۱۰
۱۸-۲/۵	۲۰-۵/۲	۴/۲-۲/۸	۲۵
۱۱-۳/۴	۲۴-۳	۶/۸-۴	۵۰
۱۳-۵/۵	۱۳-۲/۸	۷-۳/۵	۷۵

در این مقاله از مدل سه فاز ترانسفورماتور استفاده شده است که در شکل ۲ قابل مشاهده است. مشخصه‌های اشباع و هیستریزس و تلفات هسته در این مدل در نظر گرفته شده است. خازن ترانسفورماتور در عمل به صورت غیریکنواخت در طول سیم پیچی توزیع شده است اما در شبیه‌سازی به صورت یکنواخت در نظر گرفته می‌شود.

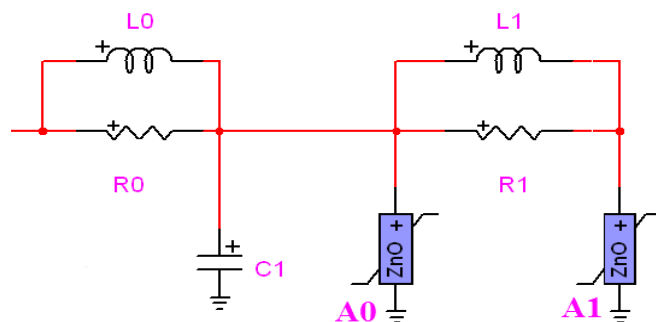


شکل (۲): مدل سه فاز گذرای ترانسفورماتور

پدیده‌ی بازگشت موج در انتهای کابل‌ها هنگامی رخ می‌دهد که زمان خیز گذرا در کابل کمتر از زمان انتشار موج باشد. سرعت انتشار موج در خطوط انتقال برابر با سرعت نور در خلاء و ۳۰۰ متر بر میکرو ثانیه می‌باشد. در حالی که این سرعت در کابل‌ها به دلیل ویژگی‌های متفاوت الکتریکی و مغناطیسی آن در حدود ۲۰۰ متر بر میکرو ثانیه است. هنگامی که یک کابل به ترانسفورماتور متصل می‌شود زمان خیز موج ولتاژ در کابل از رابطه‌ی ثابت زمانی کابل که حاصل ضرب مقاومت در ظرفیت خازن است، بدست می‌آید و چون خازن ناشی ترانسفورماتور در حدود نانو فاراد است بنابراین زمان خیز موج ولتاژ در حدود

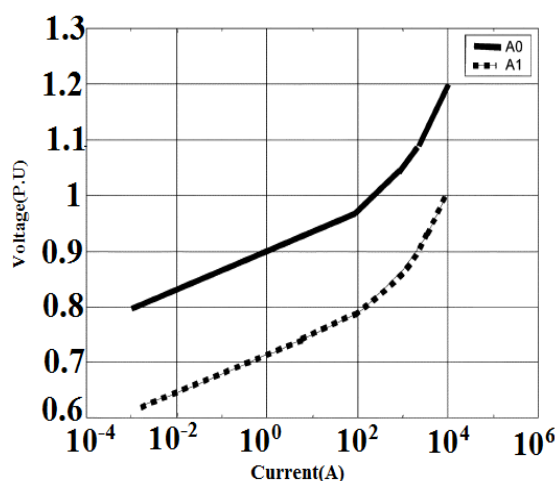
۱۰۰ نانو ثانیه می‌شود. این در حالی است که امپدانس موجی کابل در حدود چند صد اهم است. این بدین معنی است که در کابل‌های با طول چند صد کیلومتر پدیده‌های انتشار و انعکاس موج وجود دارد. بنابراین به مدلی دقیق که بتواند این مشخصات را نشان دهد، نیاز است و از مدل‌های کابل با پارامترهای فشرده باید اجتناب کرد. مدل‌های کابل به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند: مدل‌های بر پایه پارامترهای فشرده و مدل‌هایی که از پارامترهای توزیع شده استفاده می‌کنند، که به مدل‌های موج انتقالی معروف هستند. انواع مدل‌های کابل عبارتند از: مدل نامی π ، مدل پارامتر ثابت، مدل وابسته به فرکانس، مدل عمومی خط یا مدل فازی وابسته به فرکانس.

برای مدل‌سازی برقگیر از دو مدل کلی استفاده می‌شود که تقریباً هر دو برای مطالعات گذرا ناشی از کلیدزنی بریکر خلاء مناسب می‌باشند. این دو مدل به قرار زیر هستند: مدل IEEE برقگیر از دو مقاومت غیرخطی A_0 و A_1 مطابق شکل ۳ تشکیل شده است که به درستی می‌تواند اطلاعات عملی یک برقگیر را مدل کند. این دو مقاومت غیر خطی با یک فیلتر R-L جدا شده‌اند که برای موج‌های با پیشانی کوتاه این فیلتر امپدانس کمی دارد و این دو مقاومت غیرخطی بصورت موازی قرار می‌گیرند. برای موج‌های با پیشانی سریع مانند صاعقه یا کلیدزنی مقدار این فیلتر قابل توجه شده و جریان بیشتری از A_0 عبور خواهد کرد. این در حالی است که A_0 ولتاژ بیشتری برای جریان مشابه نسبت به A_1 دارد. منحنی مشخصه A_0 و A_1 در شکل ۴ نمایش داده شده است.



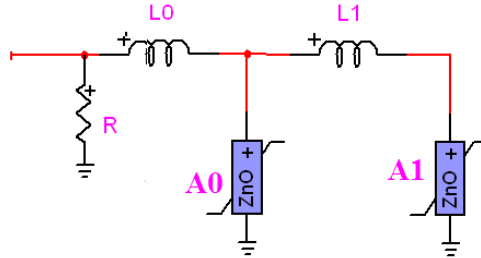
شکل (۳): مدل IEEE برقگیر

I(KA)	U(p/u)	
	A_0	A_1
۰/۰۱	۰/۸۷۵	-
۰/۱	۰/۹۶۳	۰/۷۶۹
۱	۱/۰۵	۰/۸۵
۲	۱/۰۸۸	۰/۸۹۴
۴	۱/۱۲۵	۰/۹۲۵
۶	۱/۱۳۸	۰/۹۳۸
۸	۱/۱۶۹	۰/۹۵۶
۱۰	۱/۱۸۸	۰/۹۶۹
۱۲	۱/۲۰۶	۰/۹۷۵
۱۴	۱/۲۳۱	۰/۹۸۸
۱۶	۱/۲۵۱	۰/۹۴۴
۱۸	۱/۲۸۱	۱
۲۰	۱/۳۱۳	۱/۰۰۶



شکل (۴): مشخصه‌های ولتاژ به جریان مقاومت‌های غیر خطی A_0 و A_1

در مدل دوم که مدل ساده شده است، خازن مدل IEEE به خاطر تاثیر کم آن چشم پوشی شده است و مقاومت‌های R_0 و R_1 به خاطر ناپایداری‌های عددی در محاسبات به یک مقاومت تبدیل شده است. در حقیقت این مدل، ساده شده‌ی مدل قبلی است. شکل مداری آن در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل (۵): مدل ساده شده‌ی برقگیر

پارامترهای مربوط به این مدل از فرمول‌های ۳ زیر و مقدار $R=1M\Omega$ بدست می‌آید.

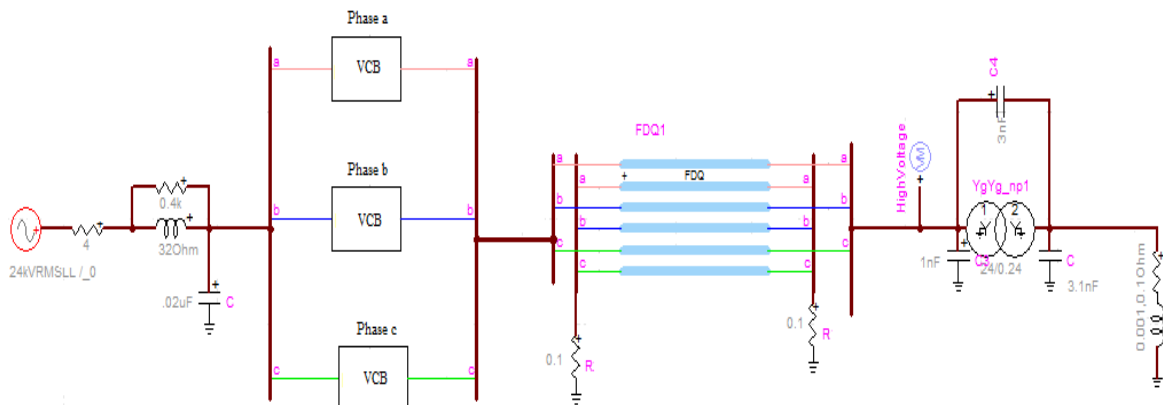
$$L_0 = (1/12) \left((U_{r1}/T_2 - U_{r8}/T_2) / (U_{r8}/T_2) \right) \cdot U_r \text{ [micro H]} \quad (6)$$

$$L_1 = (1/4) \left((U_{r1}/T_2 - U_{r8}/T_2) / (U_{r8}/T_2) \right) \cdot U_r \text{ [micro H]} \quad (7)$$

مدل ساده شده و مدل IEEE دارای دقت مناسب در مدل‌سازی هستند. اما به طور خلاصه برای موج‌های سریع $1/5 \mu s$ مدل ساده شده‌ی برقگیر دقت بالاتری نسبت به IEEE دارد. برای موج‌های سریع $20/80 \mu s$ هر دو مدل دقتی مشابه و خوب دارند. در حالی که درصد خطای مدل ساده شده برای موج‌هایی بیشتر از 20 کیلو آمپر بیشتر است. برای موج‌های آهسته $30/60 \mu s$ مدل IEEE دقت بیشتری نسبت به مدل ساده شده دارد.

۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش از مقاله، شبیه‌سازی کلیدزنی نیروگاه بادی در شبکه قدرت در محیط نرم‌افزار EMTP-RV انجام می‌شود. مدار تست در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل (۶): مدار مورد مطالعه شبیه‌سازی شده

اطلاعات مدار شبیه‌سازی شده به صورت زیر می‌باشد:

۱- شبکه 24 کیلو ولت

۲- 3 در 80 متر کابل 95 میلی‌متر مربع

۳- ترانسفورماتور ($24000/240V$) با اتصال Y_Y ground ، $630kVA$ ، امپدانس نشتی 6 درصد

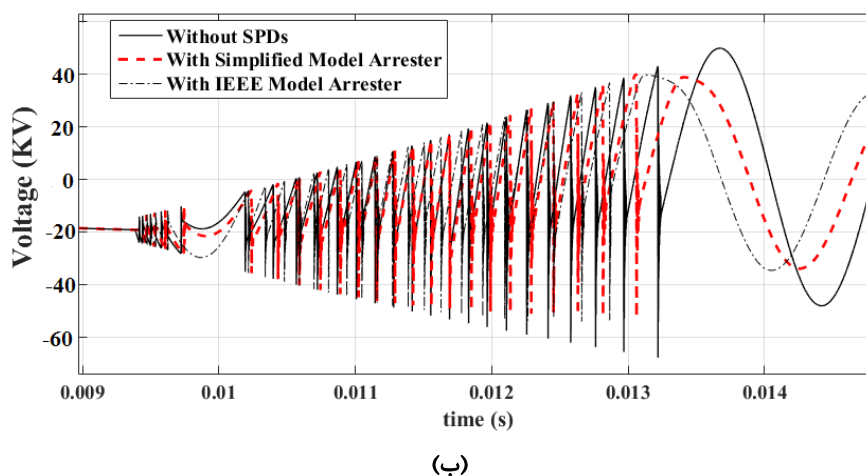
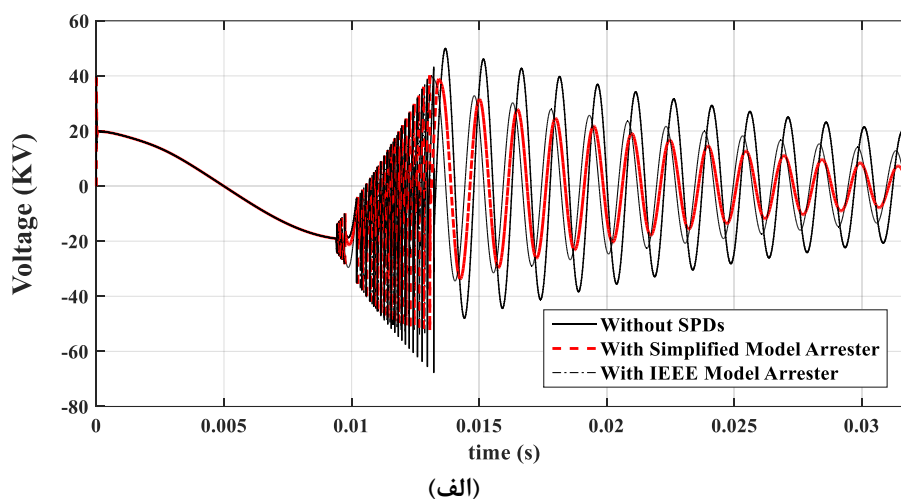
۴- بریکر ۲۴ کیلوولت با جریان چاپینگ ۳ آمپر

۵- بار القایی ۰/۱ اهم

۶- برقگیر با ولتاژ نامی ۲۵ کیلوولت که اطلاعات آن در جدول ۳ نمایش داده شده است.

جدول (۳): مشخصات برقگیر

طول ۲۸۷ میلیمتر ولتاژ نامی ۲۵ کیلوولت n=1	موج ۱/۵ میکروثانیه				
	I [kA]	۵	۱۰		
	V [kV]	۶۳/۳	۶۷		
	موج ۸/۲۰ میکروثانیه				
	I [kA]	۱	۲/۵	۵	۱۰
	V [kV]	۵۲/۲	۵۵/۳	۵۸	۶۱/۴
	موج ۳۰/۶۰ میکروثانیه				
	I [kA]	۰/۱۲۵	۰/۲۴	۰/۵	
	V [kV]	۴۵/۵	۴۷/۳	۴۹/۲	



شکل (۷): (الف) و (ب) تاثیر دو مدل IEEE و ساده شده برقگیر بر روی لحظه‌ای باز شدن بریکر

با استفاده از معادلات بیان شده، پارامترهای مدل IEEE و مدل ساده شده برقگیر بصورت جدول ۴ به دست می‌آیند.

جدول (۴): پارامترهای مدل IEEE و مدل ساده شده برقگیر

پارامترهای مدل ساده شده	پارامترهای مدل IEEE
L_0 برابر با 0.447761 میکروهانری	L_0 برابر با 0.774 میکروهانری
L_1 برابر با $1/34328$ میکروهانری	R_1 برابر با $25/155$ اهم
	L_1 برابر با $5/805$ میکروهانری
	R_0 برابر با $38/7$ اهم
	خازن برابر با $258/44$ پیکوفاراد

در شکل ۷ تاثیر دو مدل از برقگیر بر روی لحظه‌ی کلیدزنی مشاهده می‌شود. همانطور که نشان می‌دهد برقگیر تنها بر کاهش دامنه‌ی اضافه ولتاژها تاثیر می‌گذارد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله اضافه ولتاژ ناشی از کلیدزنی نیروگاه‌های بادی در شبکه قدرت مورد مطالعه قرار گرفت. برای این منظور تجهیزات مختلف شبکه قدرت شامل نیروگاه‌های بادی، ترانسفورماتورها، کابل‌ها و برقگیرها در مطالعات حالت گذرای سیستم قدرت مدلسازی شدند. سپس با استفاده از نرم‌افزار EMTP-RV که یکی از نرم‌افزارهای مناسب در زمینه تحلیل حالت گذرای سیستم‌های قدرت می‌باشد پدیده کلیدزنی نیروگاه‌های بادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از شبیه‌سازی در محیط نرم‌افزار EMTP-RV نشان می‌دهد کلیدزنی نیروگاه‌های بادی در شبکه قدرت سبب بروز اضافه ولتاژ می‌گردد که استفاده از برقگیر می‌تواند در کاهش این اضافه ولتاژها موثر باشد.

References

مراجع

- [1] T. Abdulahovi, "Analysis of High-Frequency Electrical Transients in Off shore Wind Parks", Licentiate Degree, Department of Energy and Environment, Division of Electric Power Engineering, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2009.
- [2] E. Persson, "Transient effects in application of PWM inverters to induction motors", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1095-1101, 1992.
- [3] S. Wong, L. Snider, and E. Lo, "Overvoltages and reignition behavior of vacuum circuit breaker", *6th International Conference on advanced in Power system*, pp. 653-658, 2003.
- [4] P. Picot, "Vacuum Switching", *Cahier technique Schneider Electric*, no. 5, p. 4, March 2000.
- [5] D. Clare, "Failures of encapsulated transformers for converter winders at Oryx Mine", *Elektron magazine*, pp. 24-27, 1991.
- [6] A. Mazur, I. Kerszenbaum, J. Frank, "Maximum insulation stresses under transient voltages in the HV barrel-type winding of distribution and power transformers", *IEEE transactions on industry applications*, vol. 24, no. 3, pp. 427-433, 1988.
- [7] M. Olsen, "Failure analysis of siemens geafol cast-resin transformer", Danish Tech. Inst., Tech. rep, pp. 1154834-1, 2003.
- [8] D. Paul, "Failure analysis of dry-type power transformer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 3, pp. 689-695, 2001.
- [9] D. D. Shipp, T. J. Dionise, V. Lorch, and B. G. MacFarlane, "Transformer failure due to circuit-breaker-induced switching transients", *IEEE transactions on industry applications*, vol. 47, no. 2, pp. 707-718, 2011.
- [10] M. Glinkowski, "Electrical Environment of Transformers; Impact of fast transients", *Electra*, pp. 25-38, February 2005.
- [11] W. H. Bartley, "An Analysis of Transformer Failures, Part 2—Causes, Prevention and Maximum Service Life", Hartford, CT, 1997.
- [12] B. Gupta, B. Lloyd, D. Sharma, "Degradation of turn insulation in motor coils under repetitive surges", *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 5, no. 2, pp. 320-326, 1990.

- [13] G. Stone, R. Van Heeswijk, R. Bartnikas, "Investigation of the effect of repetitive voltage surges on epoxy insulation", *IEEE Transactions on energy conversion*, vol. 7, no. 4, pp. 754-760, 1992.
- [14] J. H. Larsen, H. C. Soerensen, E. Christiansen, S. Naef, P. Vølund, "Experiences from Middelgrunden 40 MW offshore wind farm", in *Copenhagen offshore wind conference*, pp.1-8. 2005
- [15] W. Sweet, "Danish wind turbines take unfortunate turn", *IEEE Spectrum*, vol. 41, no. 11, pp. 30, 2004.
- [16] B. Gupta, B. Lloyd, G. Stone, S. Campbell, D. Sharma, N. Nilsson, "Turn insulation capability of large ac motors part 1-surge monitoring", *IEEE transactions on energy conversion*, no. 4, pp. 658-665, 1987.
- [17] B. Gupta, N. Nilsson, and D. Sharma, "Protection of motors against high voltage switching surges", *IEEE transactions on energy conversion*, vol. 7, no. 1, pp. 139-147, 1992.
- [18] J. He, et al. "Transient Equivalent Modelling of a Wind Farm Based on QPSO-Based Wind Turbine Fault Ride-Through Control", *Energies*, Vol. 18, no. 5, 19961073, 2025.
- [19] L. Jiang, et al, "Numerical and experimental analysis of the lightning transient behavior of electric heating deicing control system of wind turbine blade", *Electric Power Systems Research*, Vol. 241, 111385, 2025.
- [20] X. Tian, et al. "Analytical Analysis of Mechanism and Mitigation Methods of Transient Overvoltage in Direct-Drive Wind Turbine Generators Connected to Weak Power System", *IEEE Access*, 2025.