

# بررسی ولتاژهای بازگشتی گذرا ناشی از کلید زنی بانک خازنی در نیروگاه بادی متصل به شبکه‌ی قدرت با در نظر گرفتن مدل حالت گذرای سیستم زمین

نسیم اکبری کفشگری<sup>۱</sup>، نبی‌اله رمضانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشگاه علم و فناوری مازندران، nasim.akbari90@gmail.com

<sup>۲</sup> گروه برق، دانشگاه علم و فناوری مازندران، n\_ramezani@iust.ac.ir

چکیده – در این مقاله به بررسی ولتاژهای بازگشتی گذرای روی کلید نوع خلاء استفاده شده برای کلیدزنی بانک خازنی موازی در نیروگاه بادی متصل به شبکه‌ی قدرت پرداخته شده است. در این مطالعه شبیه‌سازی برای ساختار مختلف بانک خازنی در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن مدل فرکانس بالای سیستم زمین و تاثیر آن بر ولتاژ بازگشتی گذرای ایجاد شده در دو سر کلید با استفاده از نرم افزار *EMTP\_RV* انجام شده است. از آنجایی که این بررسی‌ها از نوع فرکانس بالاست، مدل فرکانس بالای کلیه‌ی المان‌های سیستم قدرت نظیر ترانسفورماتور، ژنراتور نیروگاه بادی، کابل، برقگیر، کلید نوع خلاء و سیستم زمین لحاظ گردیده است. نتایج نشان می‌دهد استفاده از مدل فرکانس بالای سیستم زمین به منظور پیش‌بینی اضافه ولتاژهای بازگشتی از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است.

کلید واژه- ولتاژ بازگشتی گذرا (TRV)، بانک خازنی، کلید نوع خلاء، کلیدزنی پشت به پشت، خازن متعادل‌ساز (Grading capacitor)

## ۱- مقدمه

مقادیر گذرای است که موجب به خطر افتادن مجموعه می‌شود و دومین هدف از ایجاد سیستم زمین حفظ مقدار ولتاژ مرجع برای تمام سیستم‌های الکتریکی و الکترونیکی متصل به آن است [۳]. کلیدزنی یکی از عوامل ایجاد ولتاژهای بازگشتی گذرا<sup>۲</sup> در سیستم‌های قدرت است. بررسی TRV دو سر کلید برای تعیین مقدار قابلیت تحمل کلید کاری ضروری است. بدرزاده به بررسی TRV روی کلید نوع خلاء بانک خازنی در نیروگاه بادی متصل به شبکه‌ی قدرت برای ساختار مختلف بانک خازنی در نرم‌افزار Pscad پرداخته است [۴]. از آنجایی که کلیدزنی بانک خازنی موجب ایجاد حالت گذرا در سیستم قدرت می‌شود، بنابراین مدل فرکانس بالای المان‌های سیستم قدرت ضروری است. عموماً در فرکانس‌های بالا خازن نشی المان‌ها نقش مهمی را ایفا می‌کند، که باید تاثیرشان در مدل لحاظ گردد [۵]. در این مقاله به بررسی TRV روی کلید نوع خلاء<sup>۳</sup> بانک خازنی برای ساختار مختلف بانک خازنی با لحاظ کردن مدل حالت گذرای سیستم زمین به منظور پیش‌بینی دقیق‌تر TRV پرداخته است، در حالی که در هیچ مرجعی مدل گذرای سیستم زمین برای

کلیدزنی بانک خازنی موازی به منظور جبران توان راکتیو، تنظیم ولتاژ و تنظیم ضریب توان انجام می‌شود. معمولاً در کلیدزنی بانک خازنی موازی از یک سلف سری با خازن استفاده می‌شود تا جریان هجومی را در حین برقرار شدن خازن و در حین خطای باس‌بار محدود کند [۱]. یکی از کاربردهای این حالت در هنگامی است که دو بانک خازنی به یک باس متصل‌اند و یا با فاصله‌ی کمی از هم قرار دارند که به این ساختار، کلیدزنی پشت به پشت<sup>۱</sup> گفته می‌شود. سلف سری و مقاومت ذاتی سلف موجب محدود شدن جریان و در نتیجه کاهش مقدار اضافه ولتاژها می‌شود [۲].

در سال‌های اخیر استفاده از نیروگاه‌های بادی رو به توسعه است و تلاش‌های زیادی برای افزایش قابلیت اطمینان این نوع تولید انرژی انجام شده است. سیستم زمین مانند الکترودهای عمودی یا افقی و شبکه‌ی سیستم زمین نقش مهمی در افزایش قابلیت اطمینان مجموعه و حفاظت قطعات الکتریکی صنعت و نیروگاه دارد. هدف اول از ایجاد هر سیستم زمین جلوگیری از

<sup>۲</sup> . Transient recovery voltages (TRV)

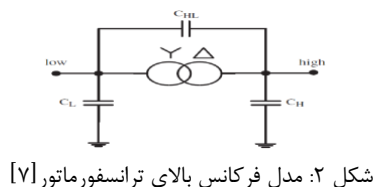
<sup>۳</sup> . vacuum circuit breaker (VCB)

<sup>۱</sup> . Back to back switching

سیم‌پیچ‌های فشار قوی و فشار ضعیف  $C_{HL}$  می‌باشد. اغلب مقدار خازن  $C_L$  و  $C_{HL}$  بزرگتر از مقدار خازن  $C_H$  می‌باشند، زیرا در ولتاژهای بالا به عایق کردن بیشتری بین سیم‌پیچ‌ها و بین سیم‌پیچ و هسته نیاز می‌باشد.

نتایج نشان می‌دهد که  $C_L$  سه برابر بیشتر از  $C_H$  و  $C_{HL}$  چهار برابر بیشتر از  $C_H$  می‌باشد [۶].

$$C_{HL} > C_L > C_H \quad (2)$$



شکل ۲: مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور [۷]

### ۳-۲- مدل فرکانس بالای کابل

معمولاً در مزارع بادی از کابل‌های سه هسته‌ای در اتصالات مختلف شبکه استفاده می‌شود. در این مطالعات کابل سه هسته‌ای با یک غلاف فلزی در نظر گرفته می‌شود. فرض قابل قبولی که اغلب اوقات استفاده می‌شود این است که به جای کابل سه هسته‌ای با تک غلاف از سه تا کابل تک هسته‌ای با تک غلاف استفاده شود [۵]. برای مدلسازی حالت گذرا لازم است، مقاومت هسته در ضریب بزرگی ضرب شود و پارامترهای زمین مانند نفوذپذیری نسبی و مقاومت زمین در نظر گرفته شوند. همینطور غلاف کابل برای کاهش امواج گذرا زمین می‌شود [۸].

### ۴-۲- مدل فرکانس بالای برقگیر

مدل فرکانس بالای برقگیر ارائه شده مطابق استاندارد IEEE و منحنی ولتاژ-جریان آن در شکل ۳ نشان داده شده است. در مدل برقگیر مقاومت  $R_0$  به منظور جلوگیری از نوسانات عددی و خازن  $C$  نمایانگر خازن خارجی برقگیر در ارتباط با ارتفاع آن می‌باشد [۹]. لذا با استفاده از ابعاد فیزیکی برقگیر می‌توان مقادیر پارامترها را مطابق روابط زیر محاسبه کرد:

$$L_0 = 0.2 \frac{d}{n} [\mu H] \quad (3)$$

$$R_0 = 100 \frac{d}{n} [\Omega] \quad (4)$$

$$L_1 = 15 \frac{d}{n} [\mu H] \quad (5)$$

$$R_1 = 65 \frac{d}{n} [\Omega] \quad (6)$$

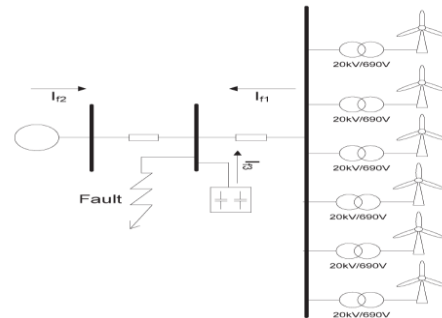
$$C = 100 \frac{n}{d} [PF] \quad (7)$$

در روابط فوق  $d$  ارتفاع ستون‌های برقگیر و  $n$  تعداد ستون‌های موازی برقگیر می‌باشد [۱۰].

کلیدزنی بانک خازنی در نظر گرفته نشده است. این شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار EMTP\_RV انجام شده است.

### ۲- سیستم مورد مطالعه

سیستم شبیه‌سازی شده شامل شش توربین بادی دو مگاوات متصل به شبکه‌ی توزیع بیست کیلو ولت است. شکل ۱ ساختار سیستم مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۱: سیستم مورد مطالعه [۴]

در این سیستم از بانک خازنی با ظرفیت ۱.۶۷ مگاوار استفاده شد و همچنین خطای سه فاز به زمین در باس‌بار مشخص شده در زمان صفر اتفاق می‌افتد و این خطا در زمان ۶۰ میلی ثانیه از بین می‌رود و بانک خازنی پشت به پشت در زمان ۸۰ میلی ثانیه از مدار خارج می‌شود.

### ۱-۲- مدل فرکانس بالای ژنراتور آسنکرون دوسو تغذیه

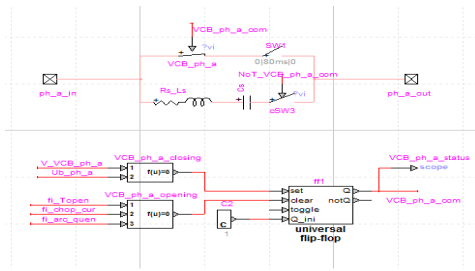
در فرکانس بالا معمولاً خازن‌های ناشی نقش مهمی ایفا می‌کنند. خازن‌های ناشی ژنراتور القایی شامل خازن سیم‌پیچ استاتور به بدنه  $C_{sf}$ ، خازن سیم‌پیچ استاتور به روتور  $C_{sr}$  و خازن روتور به بدنه  $C_{rf}$  است. هنگامی که بدنه زمین شده باشد، زیرنویس  $f$  با  $g$  جایگزین می‌شود. مقدار خازن بین سیم‌پیچ استاتور به بدنه ۳۰ تا ۱۰۰ برابر بزرگتر از خازن بین استاتور و روتور است. معمولاً رابطه‌ی زیر برای مقادیر واقعی ظرفیت‌های خازنی مذکور برقرار است [۵]:

$$C_{sf} \gg C_{rf} \gg C_{sr} \quad (1)$$

بنابراین می‌توان از خازن‌های بین سیم‌پیچی استاتور به روتور و روتور به بدنه در مقایسه با خازن بین سیم پیچ استاتور به بدنه صرف نظر کرد. مقدار خازن فاز به زمین سیم پیچ استاتور برای ماشین القایی ۳ مگاوات تقریباً ۹۳ نانو فاراد است.

### ۲-۲- مدل فرکانس بالای ترانسفورماتور

در مطالعات گذرا، خازن‌های ناشی ترانسفورماتور باید در مدلسازی در نظر گرفته شوند. مقدار این خازن‌ها با اندازه‌گیری در ترانسفورماتورهای واقعی بدست می‌آیند. خازن‌های ترانسفورماتور شامل خازن بین سیم‌پیچ فشار ضعیف به زمین  $C_L$ ، خازن بین سیم‌پیچ فشار قوی به زمین  $C_H$  و خازن بین



شکل ۴: مدل فرکانس بالای کلید نوع خلا در EMTP\_RV

که در شکل فوق  $V\_VCB\_Ph\_a$  مقدار لحظه‌ای ولتاژ VCB فاز  $a$ ،  $U\_Ph\_a$  ولتاژ قابل تحمل VCB فاز  $a$  که ۳۷ کیلو ولت فرض شده است. همچنین  $FI\_Topen$  هنگامی یک می‌شود که  $t > t_{open}$  باشد. در ضمن  $FI\_Chop\_Cur$  هنگامی یک می‌شود که رابطه‌ی زیر برقرار گردد:

$$|i_{ph-a}(t)| < i_{ph-a}^{chop} \quad (10)$$

که در رابطه‌ی ۱۰  $i_{ph-a}(t)$  مقدار لحظه‌ای جریان گذرنده از VCB فاز  $a$  و  $i_{ph-a}^{chop}$  مقدار قطع مجازی جریان فاز  $a$  را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است  $FI\_arc\_quen$  در صورت برقراری رابطه‌ی زیر مقدار یک به خود می‌گیرد:

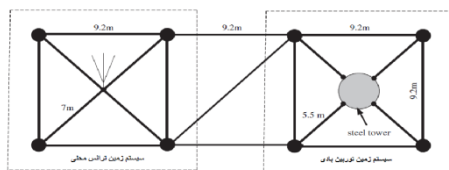
$$\left| \frac{di_{ph-a}(t)}{dt} \right| < \frac{di_{ph-a}^{quen}}{dt} \quad (11)$$

در رابطه‌ی فوق  $\frac{di_{ph-a}(t)}{dt}$  مقدار مشتق جریان گذرنده از

فاز  $a$  در زمان گذر از صفر بوده و  $\frac{di_{ph-a}^{quen}}{dt}$  مقدار قابلیت قطع جریان فرکانس بالای VCB می‌باشد [۱۱].

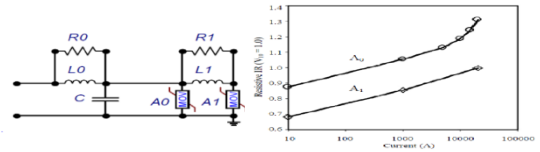
## ۲-۶- مدل فرکانس بالای سیستم زمین

سیستم زمین مورد استفاده شامل الکترودهای عمودی و افقی به صورت زیر می‌باشد:



شکل ۵: سیستم زمین مورد استفاده

که برای الکترودهای عمودی از مدار معادل شکل ۶ استفاده شده است. فرض شده است که الکترود عمودی دارای طول ۳ متر می‌باشد که به سه قطعه‌ی یک متری با قطر ۲.۵۴ سانتی‌متر تقسیم شده است.



شکل ۳: مدل فرکانس بالای برقی‌گیر و منحنی‌های ولتاژ-جریان

## ۲-۵- مدل فرکانس بالای کلید نوع خلاء (VCB)

بر اساس استانداردهای موجود سه پارامتر مهم VCB شامل مقدار قطع مجازی جریان (current chopping)، قابلیت تحمل VCB و قابلیت قطع جریان فرکانس بالا می‌باشد که باید در پیاده‌سازی در نظر گرفته شود.

پارامتر اول، مقدار قطع مجازی جریان به پارامترهای مختلفی از قبیل مواد کنتاکت‌ها و امپدانس مشخصه‌ی بار وابسته است. در مدل پیاده شده برای این پارامتر مقدار ثابت ۵ آمپر فرض شده است.

پارامتر مهم دیگر که در نمایش VCB باید در نظر گرفته شود قابلیت تحمل دی‌الکتریک است. این مشخصه به فاصله‌ی بین کنتاکت‌ها وابسته است و با سرعت جدا شدن کنتاکت‌ها تغییر می‌کند. تابع خطی پیاده شده برای مشخصه قابلیت تحمل دی‌الکتریک کلید به صورت زیر است:

$$u = A(t - t_{open}) + B \quad (8)$$

که در رابطه‌ی فوق  $t_{open}$  زمان شروع جدا شدن کنتاکت‌ها،  $A$  سرعت افزایش قابلیت تحمل کلید و  $B$  قابلیت تحمل ولتاژ گذرا قبل از جداسازی کنتاکت‌ها می‌باشند. پارامتر سوم، قابلیت قطع جریان فرکانس بالا می‌باشد که می‌توان آن را با رابطه‌ی ۹ نشان داد:

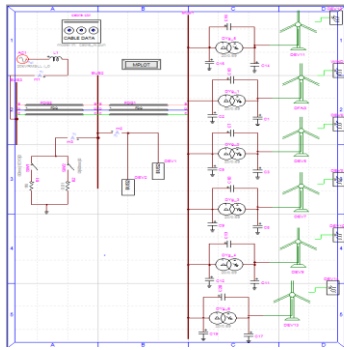
$$\frac{di}{dt} = C(t - t_{open}) + D \quad (9)$$

در این رابطه  $C$  سرعت افزایش قابلیت قطع جریان فرکانس بالای VCB و  $D$  قابلیت قطع VCB قبل از جدا شدن کنتاکت‌ها می‌باشند. مقادیر پارامترهای  $A$  و  $B$  و  $C$  و  $D$  وابسته به نوع VCB است. لازم به ذکر است مقدار قابلیت قطع جریان فرکانس بالا ۳۵۰ آمپر بر میکرو ثانیه فرض شده است.

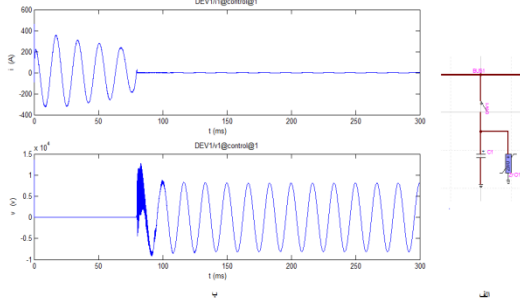
این مدل شامل شاخه‌ی RLC موازی با VCB است تا خازن نشستی فاصله هوایی، مقاومت و اندوکتانس وابسته را نشان دهد. مقدار پارامترهای شاخه‌ی RLC معمولاً به صورت زیر است:

$$L_s = 50nH \quad \text{و} \quad C_s = 100PF \quad \text{و} \quad R_s = 100\Omega$$

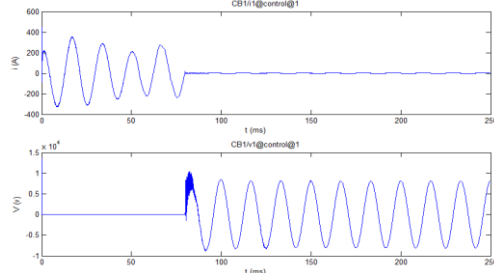
مدل پیاده شده در EMTP\_RV به صورت زیر است:



شکل ۸: مدار شبیه‌سازی شده با EMTP\_RV



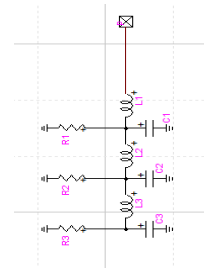
شکل ۹: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین



شکل ۱۰: جریان و ولتاژ کلید با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین همانطور که از نتایج بدست آمده مشخص است در این طرح عملکرد کلید در هر دو حالت موفق می‌باشد، ولتاژ روی کلید کمتر از قابلیت تحمل کلید است، با این تفاوت که در حالتی که مدل گذرای سیستم زمین لحاظ گردد جریان گذرا از کلید دارای مقدار کمتر و متعادل‌تری نسبت به حالت بدون سیستم زمین است.

### ۳-۲- طرح ۲ بانک خازنی: استفاده از سلف سری با خازن زمین شده

در این ساختار از یک سلف سری با خازن برای محدود کردن جریان استفاده شده است به طوری که سلف سمت منبع و خازن سمت زمین قرار دارد.



شکل ۶: مدار الکتروود عمودی

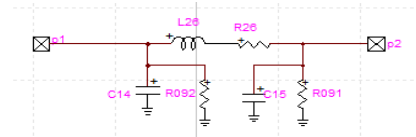
در مدل گذرای سیستم زمین فوق پارامترهای مربوط به الکتروود عمودی به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left\langle \ln \frac{4L}{a} - 1 \right\rangle [\Omega], R_n = R \times N \quad (12)$$

$$C = \frac{\epsilon_r \times L}{18} \frac{1}{\left\langle \ln \frac{4L}{a} - 1 \right\rangle} \times 10^{-9} [F], C_n = \frac{C}{N} \quad (13)$$

$$L = 2L \left\langle \ln \frac{4L}{a} - 1 \right\rangle \times 10^{-7} [H], L_n = \frac{L}{N} \quad (14)$$

همچنین برای یک هادی افقی مدل گذرای متفاوتی مطابق شکل ۷ ارائه می‌گردد.



شکل ۷: مدل مداری هادی افقی پیاده‌سازی شده در EMTP\_RV

$$C_c = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{Ln \frac{2l_c}{\sqrt{2rD}} - 1} [F/m] \quad (15)$$

$$G_c = \frac{\Pi}{\rho \left( Ln \frac{2l_c}{\sqrt{2rD}} - 1 \right)} [s/m] \quad (16)$$

$$L_c = \frac{\mu_0}{2\Pi} \left( Ln \frac{2l_c}{\sqrt{2rD}} - 1 \right) [H/m] \quad (17)$$

که  $r$  شعاع هادی برابر ۵.۶ میلی‌متر،  $l_c$  طول هادی با طول‌های متعدد و  $D$  عمق دفن هادی که ۱ متر در نظر گرفته شده است [۷].

### ۳- پیاده‌سازی سیستم

مدار شکل ۸ برای ساختار مختلف بانک خازنی در دو حالت با سیستم زمین و بدون سیستم زمین شبیه‌سازی شده است.

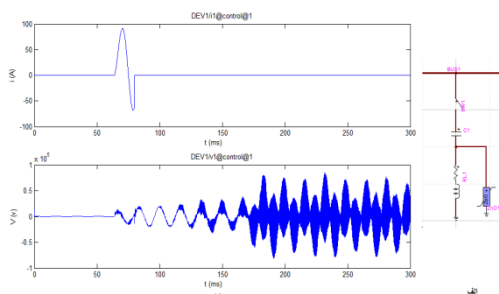
#### ۳-۱- طرح ۱ بانک خازنی: استفاده از یک خازن تنها

شکل ۹ دیگرام تک‌خطی بانک خازنی استفاده شده را نشان می‌دهد. در این طرح از یک خازن تنها برای بانک خازنی استفاده شده است.

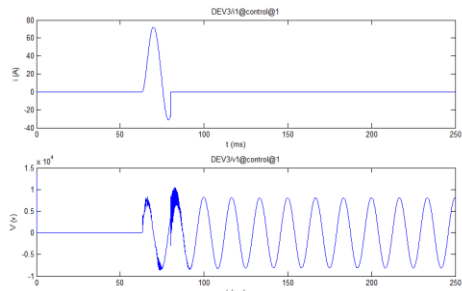
بدون سیستم زمین موجب کاهش TRV روی VCB نمی‌شود و کلید عملکرد موفقی ندارد درحالی‌که با در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین موجب عملکرد موفق VCB می‌شود.

### ۳-۴- طرح ۳ بانک خازنی: استفاده از سلف سری با سلف زمین شده

در این ساختار با جابجایی مکان قرارگیری سلف و خازن مشاهده می‌شود که تغییر چشمگیری در مقدار جریان و ولتاژ عبوری از کلید ندارد و عملکرد کلید در حالت بدون سیستم زمین ناموفق می‌باشد ولی با در نظر گرفتن سیستم زمین مانند حالات قبل با کاهش جریان عبوری از کلید عملکرد کلید موفق می‌شود.

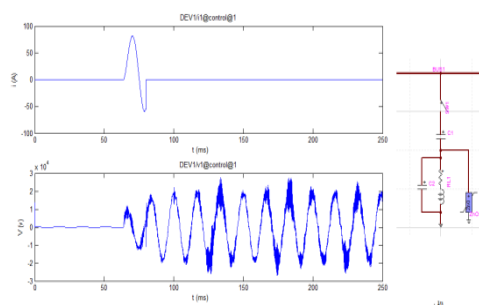


شکل ۱۵: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین

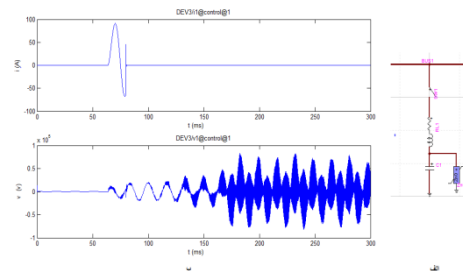


### ۳-۵- طرح ۳ بانک خازنی با اضافه شدن خازن متعادل‌ساز

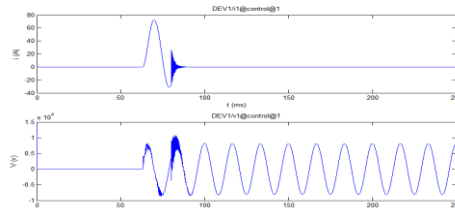
در این ساختار از خازن متعادل‌ساز با مقدار ۲۰ پیکو فاراد استفاده شده است که موجب عملکرد موفق کلید در هر دو حالت با و بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین می‌شود.



شکل ۱۷: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین



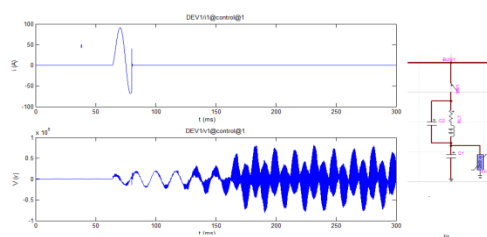
شکل ۱۱: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین



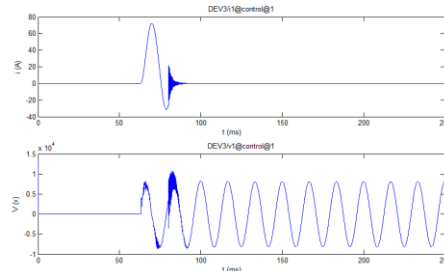
شکل ۱۲: جریان و ولتاژ کلید با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین شکل ۱۱ و شکل ۱۲ نتایج ساختار بانک خازنی طرح ۲ را در دو حالت با و بدون لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین نشان می‌دهند. همانطور که از نتایج مشخص است در شکل ۱۱ کلید عملکرد موفقی نداشته و TRV روی آن بیشتر از قابلیت تحملش (۳۷ کیلو ولت) می‌باشد ولی در شکل ۱۲، هنگامی که مدل گذرای سیستم زمین در نظر گرفته می‌شود عملکرد کلید موفق است زیرا سیستم زمین موجب کاهش سطح جریان عبوری از کلید می‌شود.

### ۳-۳- طرح ۲ بانک خازنی با اضافه شدن خازن متعادل‌ساز

در این ساختار از خازن متعادل‌ساز با مقدار ۲۰ پیکو فاراد استفاده شده است.



شکل ۱۳: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر گرفتن مدل گذرای سیستم زمین

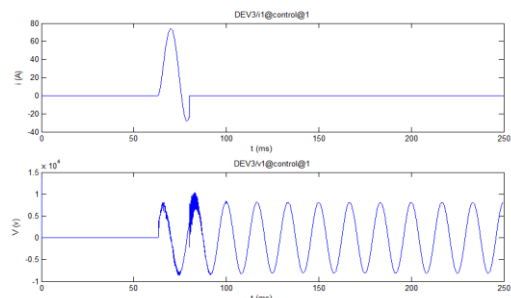


شکل ۱۴: جریان و ولتاژ کلید با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین نتایج نشان می‌دهد که استفاده از خازن متعادل‌ساز در حالت

سیستم زمین در نظر گرفته نشود، استفاده از سلف سری با خازن موجب ایجاد اضافه ولتاژهایی بیشتر از قابلیت تحمل کلید می‌شود. هنگامی که از سلف سری با خازن در سمت زمین بانک خازنی استفاده شود می‌توان با استفاده از خازن متعادل‌ساز عملکرد کلید را موفق کرد ولی استفاده از این خازن برای حالتی که سلف سمت منبع است نتیجه نمی‌دهد. استفاده از فیلتر نوع C موجب عملکرد موفق کلید بدون نیاز به روش‌های کاهش اضافه ولتاژ می‌شود. این در حالی است که پیاده‌سازی مدل گذرای سیستم زمین برای همه‌ی حالات فوق موجب کاهش جریان گذرنده از کلید می‌شود و کلید عملکرد موفق‌تری دارد. بنابراین مدل‌سازی گذرای سیستم زمین برای پیش‌بینی دقیق‌تر در محاسبه‌ی TRV کلید و مسائل عایقی مرتبط بسیار حائز اهمیت است در حالیکه در سایر منابع این مهم مورد ارزیابی قرار نگرفته است.

### مراجع

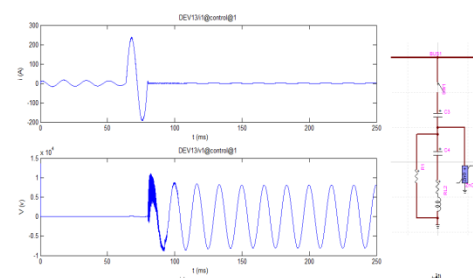
- [1] R. Natarajan, *Power System Capacitors*. London, U.K.: CRC Press, 2005.
- [2] T. A. Bellei, E. Camm, and G. Ransom, "Current-limiting inductors used in capacitor bank applications and their impact on fault current interruption," in *Proc IEEE PES T&D Conf. Expo.*, Atlanta, GA, USA, Oct. 28–Nov. 2, 2001, pp. 603–607.
- [3] D. Cavka, D. Poljak, V. Doric, R. Goic, "Transient analysis of grounding systems for wind turbines," *Renewable Energy*, Vol. 43, pp. 284–291, July, 2012.
- [4] B. Badrzadeh, "Transient Recovery Voltages Caused by Capacitor Switching in Wind Power Plants," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, no. 6, Nov./Dec. 2013.
- [5] B. Badrzadeh, M. Hgdahl, and E. Isabegovic, "Transients in wind powerplants—Part I : Modeling methodology and validation," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, no. 2, pp. 794–807, Mar./Apr. 2012.
- [6] X. Wang, P. Wilson, J. Zhou, D. Muthumuni, D. Kell, and K. Louie, "Transient Recovery Voltage Investigation in the Application of 15 KV Circuit Breaker Failure," *Proc. Int. Conf. on Power Systems Transients*. Canada, pp. 224, 2005.
- [7] Amr M. Abd-Elhady, Nehmdoh A. Sabiha, and Mohamed A. Izzularab, "High-frequency modeling of Zafarana wind farm and reduction of backflow current-overvoltages," *Proc. Int. Trans. Electro. Energ. Syst.*, Vol. 24, No. 4, pp. 457–476, April. 2014.
- [8] B. Gustavsen, J. A. Martinez, and D. Durbak, "Parameter Determination for Modeling System Transients—PartII: Insulated cables," *IEEE Trans. Power Del.*, Vol. 20, no. 3, July. 2005.
- [9] P. Unahalekaka, "Simplified Modelling of Metal Oxide Surge Arresters," in *Proc 11<sup>th</sup> EMSES*, pp.92–101, 2014. [online]. Available: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com).
- [10] J. Furgal, and S. K. Omar Dau, "Modeling of Metal Oxide Surge Arresters as Elements of Overvoltage Protection systems," *Electrotechnika I Elektronika Tom27.Zeszyt1*, 2008.
- [11] A. Borghetti, F. Napolitano, C. A. Nucci, M. Paolone, M. Sultan, and N. Tripaldi, "Transient Recovery Voltages in Vacuum Circuit Breakers Generated by the Interruption of Inrush Currents of Large Motors," *Proc. Int. Conf. On Power Systems Transients*. Netherlands, Jun. 2011.



شکل ۱۸: جریان و ولتاژ کلید با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین

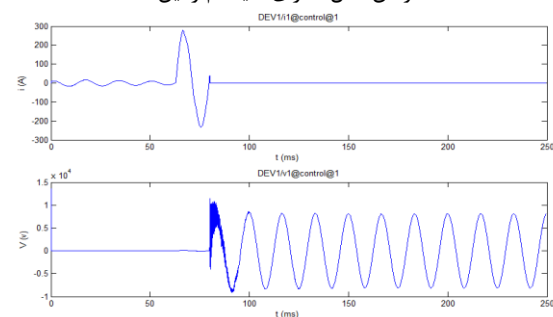
### ۳-۶ طرح ۴ بانک خازنی: استفاده از فیلتر نوع C

یکی از طرح‌هایی که برای جلوگیری از خطای عملکرد کلید وجود دارد استفاده از فیلتر نوع C به جای سلف سری با خازن می‌باشد [۴]. در این ساختار خازن کمکی به طور سری با سلف قرار می‌گیرد. خازن و سلف سری در فرکانس اصلی در حالت رزونانس می‌باشند. بنابراین امپدانس این شاخه صفر می‌باشد و مقاومت موازی اتصال کوتاه می‌شود. در واقع در این حالت در فرکانس اصلی تلفات ناچیز است و در فرکانس بالا حضور مقاومت موازی موجب کاهش جریان عبوری از کلید می‌شود. در این ساختار مقاومت موازی ۱۰۰۰ اهم و فاکتور Q، ۳۰۰ می‌باشد. همانطور که از نتایج مشخص است عملکرد کلید در هر دو حالت موفق است.



شکل ۱۹: الف- ساختار بانک خازنی ب- جریان و ولتاژ کلید بدون در نظر

### گرفتن مدل گذرای سیستم زمین



شکل ۲۰: جریان و ولتاژ کلید با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین

### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله اضافه ولتاژهای روی کلید نوع خلا برای چند ساختار رایج بانک خازنی در دو حالت با لحاظ کردن مدل گذرای سیستم زمین نیروگاه بادی و بدون سیستم زمین در حالتی که EMTP\_RV انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد در حالتی که