Scientific-Research Quarterly Journal of Technical Science
Khatam Al-Nabieen University
Volume 1, Issue 1, Winter 2024

Introduction and review of Transient Recovery Voltages and its case simulation in EMTP_RV software

Abdallah Halimi[1]

Abstract
Transient recovery voltage (TRV) is one of the characteristics inherent in the power system, and its maximum and increasing speed are important factors that affect the switching process in the power system. When a power system has characteristics of TRV, it means that the voltage is higher than the tolerance range of the switches and the circuit breakers may not interrupt the fault current. In this article, the types of overvoltages in the power system have been investigated first. In the following, overvoltages caused by switching (an important phenomenon in the power network) are introduced. The importance of investigating this issue is the effect of these overvoltages during the operation of power switches, which are affected by the existence of different structures, the occurrence of different errors with different waveforms and structures due to the complexity of power networks. The presence of these different waveforms will have a direct effect on the performance of the power switches, which may not be able to withstand these stresses and the circuit may fail. On the other hand, the failed operation of the keys in error conditions will have the possibility of causing damage to the network during critical conditions. In the continuation of this research, in order to observe the stresses resulting from keying, case simulation has been done in EMTP_RV transient mode software.
Keywords: recovery overvoltage, switch, peak voltage, RRRV.

[1] Master's student of power systems at K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

فصلنامه علمی - تحقیقی علوم فنی
دانشگاه خاتم‌النبیین(ص)
سال اول ، شماره‌ی اول، زمستان ۱۴۰۲
صفحه ۸۵-۶۱

معرفی و بررسی اضافه‌ولتاژهای بازگشتی و شبیه‌سازی موردی آن در نرم‌افزار EMTP_RV

عبدالله حلیمی[۱]

چکیده

ولتاژ بازیابی گذرا (TRV) یکی از مشخصه‌های ذاتی در سیستم قدرت است که حداکثر و سرعت افزایش آن از عوامل مهمی هستند که بر روند کلیدزنی در سیستم قدرت تاثیر می‌گذارند. هنگامی که یک سیستم قدرت دارای ویژگی‌هایی از TRV باشد به این معنا است که ولتاژ از محدوده تحمل کلیدها بیشتر بوده و ممکن است کلیدهای مدار، جریان خطا را قطع نکنند. در این مقاله، ابتدا انواع اضافه‌ولتاژها در سیستم قدرت بررسی شده است. در ادامه، اضافه‌ولتاژهای ناشی از کلیدزنی (پدیده‌ای مهم در شبکه قدرت) معرفی شده است. اهمیت بررسی این موضوع، تاثیر این اضافه‌ولتاژها هنگام عملکرد کلیدهای قدرت می‌باشد که به دلیل پیچیده بودن شبکه‌های قدرت از وجود ساختارهای متفاوت، وقوع خطاهای مختلف با شکل موج‌ها و ساختارهای متفاوت تاثیر می‌پذیرند. وجود این شکل موج‌های مختلف بر عملکرد کلیدهای قدرت تاثیر مستقیم خواهد داشت که ممکن است کلیدها قابلیت تحمل این تنش‌ها را نداشته و قطع مدار ناموفق باشد. از سوی دیگر، عملکرد ناموفق کلیدها در شرایط خطا امکان به بارآورن خسارت به شبکه در هنگام شرایط بحرانی را خواهد داشت. در ادامه این پژوهش، برای مشاهده تنش‌های حاصل از کلیدزنی به شبیه‌سازی موردی در نرم‌افزار حالت گذرایی EMTP_RV پرداخته شده است.

واژگان کلیدی: اضافه‌ولتاژ برگشتی، کلید، پیک ولتاژ، RRRV.

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد سیستم‌های قدرت، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

۱. مقدمه

گسترش شبکه‌های انتقال و افزایش روزافزون مصرف برق و انرژی، احداث خطوط انتقال برق با ظرفیت ۲۰۰۰ تا ۵۰۰۰ مگاوات را ایجاب می‌نماید. تنها با استفاده از ردیف ولتاژهای بالا و متناسب با قدرت و مسافت، افزایش ظرفیت انتقالی خطوط امکان‌پذیر می‌باشد، به همین دلیل احداث شبکه‌های سراسری انتقال انرژی به طول چندین هزار کیلومتر با ردیف ولتاژهای ۷۵۰ تا ۱۲۰۰ کیلوولت و ظرفیت چند ده هزار مگاوات در کشورهای بزرگ عمومی شده است و مطالعات و تحقیقات مداوم به منظور استفاده از ردیف ولتاژهای بالاتر در دست انجام می‌باشند.

تامین عایق‌بندی کافی و مطمئن هادی‌های ولتاژ بالا در خطوط انتقال و تجهیزات فشار قوی مانند ترانسفورماتورها، راکتورها، کلیدها و غیره در طی فعالیت شبکه و تغییرات آن، یکی از مسائل عمده‌ی خطوط انتقال انرژی و استفاده از ردیف ولتاژهای بالا است.

عبور ولتاژ شبکه از مقدار نامی خود و ظهور ولتاژهای لحظه‌ای موجی با دامنه بیش از ولتاژ دی‌الکتریک ماده عایق، به اضافه‌ولتاژ در شبکه موسوم می‌باشد. ازآنجاکه بروز اضافه‌ولتاژ در شبکه اجتناب‌ناپذیر است، بنابراین احتمال وقوع قوس الکتریکی در عایق‌بندی و ماده عایق وجود دارد. کاهش درصد بروز قوس‌ها و اتصال‌های کوتاه مستلزم شناخت کامل اضافه‌ولتاژ، انواع مختلف، شرایط ایجاد و نحوه تاثیر آن‌ها در عایق‌بندی شبکه می‌باشد. در صورت برخورداری از چنین شناختی، انتخاب مشخصات مناسب شبکه و تجهیزات موجود در آن امکان‌پذیر می‌گردد. کلیه اضافه‌ولتاژهای ظاهر شده در شبکه براساس شکل یا نحوه‌ی تغییرات آنان به شرح زیر تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱-۱. اضافه‌ولتاژهای پایدار

تجهیزات درون سیستم انتقال می‌توانند ولتاژهایی حدود ٪۵ بیشتر از ولتاژهای نامی را برای دوره‌های زمانی طولانی (چند دقیقه یا بیشتر) تحمل کنند. موسسه استانداردهای ملی آمریکا (ANSI)، حداکثر ۱۲۱ کیلوولت را برای سیستم ۱۱۵ کیلوولتی و حداکثر ۳۶۲ کیلوولت را برای سیستم ۳۴۵ کیلوولت در نظر می‌گیرد. این استاندارد، حداکثر ولتاژ سیستم را به این صورت تعریف می‌کند که " بالاترین ولتاژ سیستمی که تحت شرایط کار معمولی رخ می‌دهد که تجهیزات و سایر اجزا جهت کار مداوم، رضایت‌بخش و بدون هرگونه ایراد برای آن طراحی شده‌اند، را حداکثر ولتاژ سیستم گوییم. "

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

۱-۲. اضافه‌ولتاژهای موقت

اضافه‌ولتاژهای موقت، افزایش ولتاژ شبکه و تجاوز آن از مقدار اسمی فرکانس (۵۰ هرتز) را شامل می‌گردند. افزایش ولتاژ اسمی شبکه تا بیش از مقدار اسمی آن برای مدت طولانی ادامه نیافته و با توجه به پیش‌بینی‌های صورت گرفته در شبکه، مقدار اسمی خود را در فاصله زمانی معین باز می‌یابند. به عنوان مثال در فاصله برقراری جریان عیب یا در فاصله زمانی بی‌باری خط، ولتاژ شبکه از مقدار اسمی خود تجاوز کرده یا به صورت اضافه‌ولتاژ موقت ظاهر می‌گردد.

به دلیل فاصله زمانی کم و موقتی بودن این افزایش ولتاژ، آن را اضافه‌ولتاژ موقت می‌نامند. اضافه‌ولتاژهای موقت تا زمانی که علت اصلی بروز آنان رفع شود یا تجهیزات اتوماتیک کنترل ولتاژ شروع به کار کنند، ادامه می‌یابند. این اضافه‌ولتاژها معمولا در پی تغییر شکل شبکه ظاهر می‌گردند. تغییر شکل شبکه به عللی چون بروز عیب، قطع و وصل خطوط، جدا شدن بارهای اکتیو و راکتیو عمده، وارد و خارج شدن ترانسفورماتورها، راکتورها، مانور اشتباه در شبکه، تنظیم نابجای دستگاه‌های کنترل ولتاژ ترانسفورماتورها، ژنراتورها و غیره و بروز برخی پدیده‌ها در شرایط خاص نظیر پدیده‌های رزونانس و فرورزونانس روی می‌دهند.

به طور خلاصه این اضافه‌ولتاژها به علل کلی زیر روی می‌دهند:

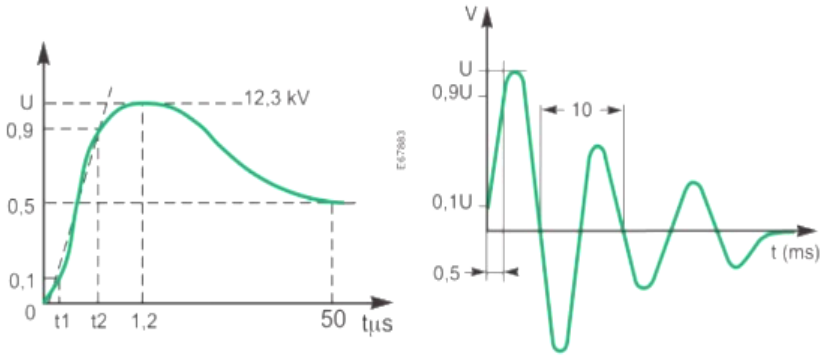
- بروز عیوب مختلف در شبکه
- قطع و وصل کلید ها و تغییر بارهای اکتیو و راکتیو
- بروز رزونانس و فرورزونانس در شبکه
- قطع فازها
- بروز نوسانات (power swing)
- اضافه‌ولتاژ بی‌باری خط

۱-۳. اضافه‌ولتاژهای موجی

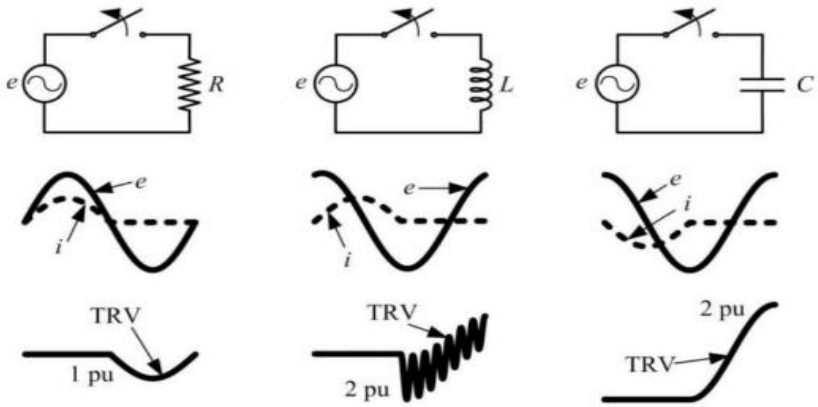
این نوع از اضافه‌ولتاژها به صورت موج در ولتاژ شبکه ظاهر گشته و با سرعتی نزدیک به سرعت نور در طول هادی منتشر می‌گردند، که در شکل‌های ۱ و ۲ نشان داده شده‌اند. این موج طی انتشار خود در طول هادی، تغییر شکل داده و دچار افزایش دامنه با سرعت ثابت بر حسب کیلوولت بر میکروثانیه می‌شود. اضافه‌ولتاژهای موجی از طریق دو منبع گوناگون در شبکه ظاهر می‌گردند:

- اضافه‌ولتاژهای ناشی از رعد و برق
- اضافه‌ولتاژهای ناشی از قطع و وصل (کلیدزنی)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل ۱: شکل موج یک صاعقه و اضافه‌ولتاژ آن در شبکه



شکل ۲: اضافه‌ولتاژهای ناشی از انواع کلیدزنی در شبکه

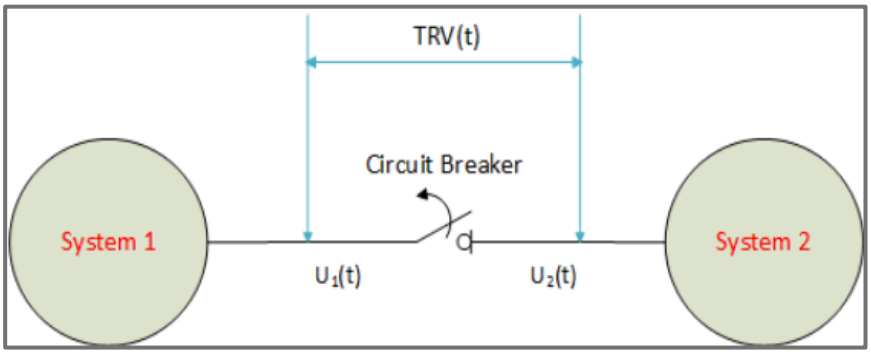
۲. اضافه‌ولتاژ بازگشتی (TRV)

یکی از شایع‌ترین پدیده‌ها در سیستم قدرت که به خوبی معرفی نشده است " ولتاژ بازگشتی گذرا " یا Transient Recovery Voltage (TRV) نام دارد. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که یک وقفه در تامین جریان رخ می‌دهد. به عبارت دیگر، زمانی که توسط کلید قطع‌کننده، یک قسمت از شبکه که دچار خطای اتصال کوتاه شده جدا می‌شود، ولتاژ در دو سر پل‌های کلید افزایش می‌یابد که بزرگی این ولتاژ گاهی تا دو برابر مقدار ولتاژ نامی هم می‌رسد. TRV به مشخصه‌های سیستمی که قطع‌کننده در آن وجود دارد و نوع خطایی که کلید را وادار به واکنش کرده، بستگی دارد. مشخصه‌های سیستم عبارتند از: نوع بارها، نوع اتصال کابل‌ها و خطوط و نوع سیستم زمین. شدیدترین TRV معمولا به پل‌های اولیه کلید وارد می‌شود که قسمت دارای خطا را از شبکه جدا می‌کند. از ویژگی‌های این اضافه‌ولتاژ می‌توان به فرکانس بالای آن اشاره نمود که با توجه به رابطه زیر داریم:(J. C. Das, 2010).

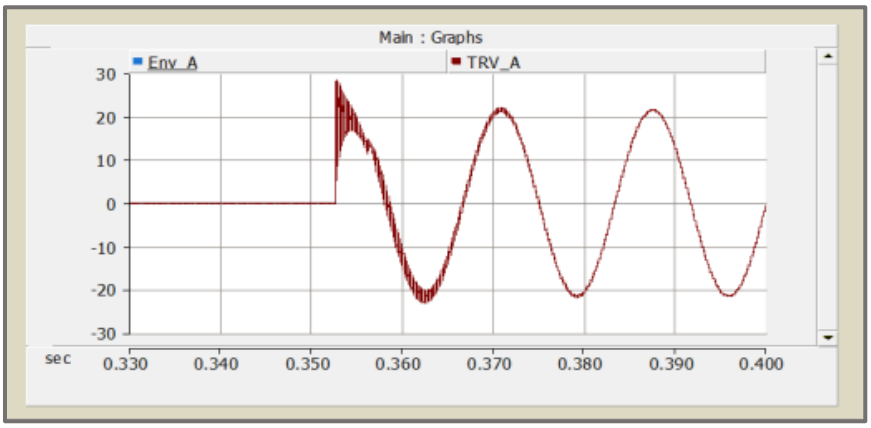
$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (۱)$$

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

که در آن fn فرکانس طبیعی شبکه، L و C به ترتیب اندوکتانس و ظرفیت معادل مدار هستند.



شکل ۳: اختلاف ولتاژ بین دو سر کلید و نمایش TRV

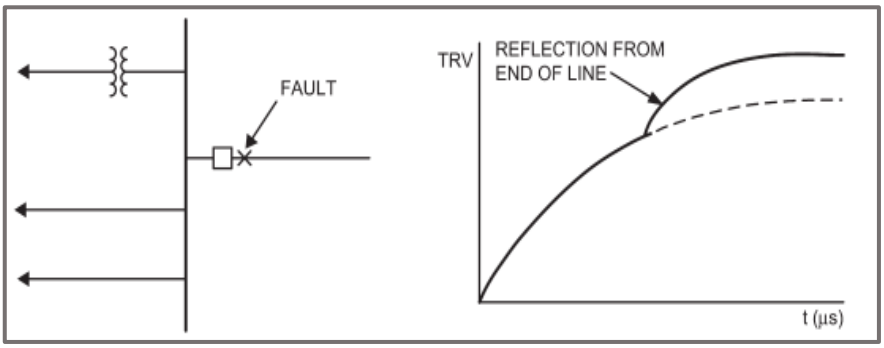


شکل ٤: نمونه‌ای از شکل موج TRV

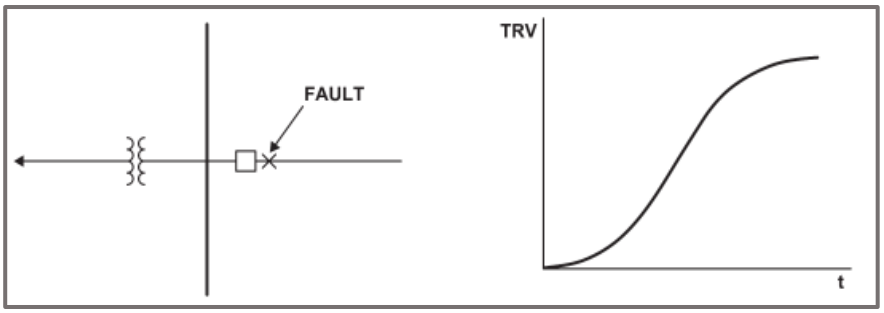
از دیگر پارامترهای مهم TRV می‌توان به نرخ افزایش شیب و پیک آن اشاره نمود که محاسبه نرخ اولیه افزایش بسیار مهم است که به دلیل پدیده‌های امواج سیار و بازتاب‌های متعدد، این کار چندان ساده نیست؛ زیرا موج روی دو سیستم که توسط کلید قطع می‌شود، تحت تاثیر قرار می‌گیرد. پروفیل‌های ولتاژ بازیابی را می‌توان برای جریان‌های خطا، حداکثر و حداقل و جریان‌های خطای در محدود ترانسفورماتور در نظر گرفت. جریان‌های بدون خطا نیز می‌توانند از انواع مقاومتی، القایی و خازنی باشند که پیکربندی مدار در بروز انواع این جریان، نقش مهمی را ایفا می‌کند. به عنوان مثال، مشخصات ولتاژ بازیابی در خطاهای ترمینال (نزدیک کلید) و خطاهای خط کوتاه (SLF) (خطاهای خیلی نزدیک به کلید یعنی در محدوده ۲۰۰ تا۲۰۰۰ متر) متفاوت است. نمایه‌های TRV می‌توانند با توجه به مشخصات سیستم به یک یا ترکیبی از شکل‌های زیر ظاهر شوند. (IEEE Standard C37.011, 2011).

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

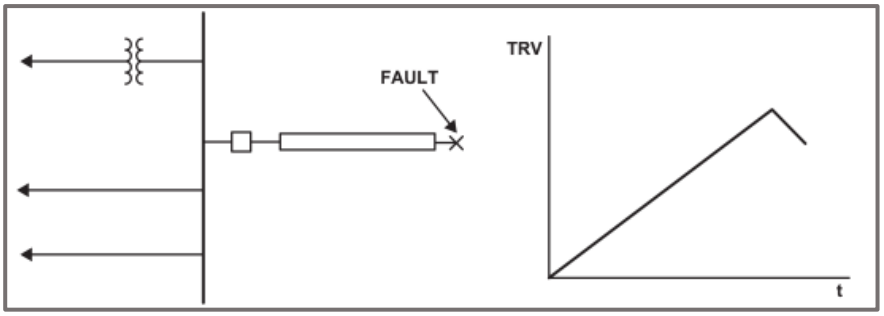
- هم‌فرکانس با منبع (Power supply frequency)
- میرایی (Overdamped)
- نوسانی (Oscillatory)
- دندان اره‌ای یا مثلثی (Traingular)



شکل ۵: شکل موج TRV نمایی



شکل ٦: شکل موج TVR نوسانی



شکل ۷: شکل موج مثلثی یا دندان اره‌ای

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

۲-۱. اولین فاز قطع‌کننده (Firt pole to clear)

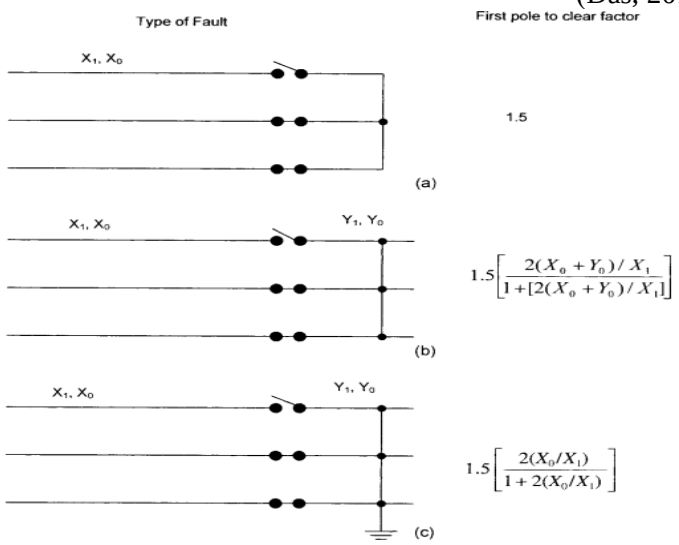
TRV به ولتاژی اطلاق می‌شود که در فاز اول قطعکننده اعمال گردد؛ زیرا به طور کلی در اکثر مواقع مقداری بالاتر از ولتاژ اعمال شده در دو فاز دیگر قطع‌کننده وجود دارد که پس از مدتی از بین می‌روند. یک خطای سه فاز زمین نشده را در نظر بگیرید. در این حالت ولتاژ در فازهای قطع‌کننده، برای اولین فاز قطع‌کننده ۱/۵ برابر ولتاژ فاز خواهد بود؛ زیرا قطع قوس به دلیل ۱۲۰ درجه جابجایی فازها، در سه فاز همزمان نیست. بنابراین، از نظر تئوری، ولتاژ فرکانس توان اولین فازی که پاک می‌شود ۱/۵ برابر ولتاژ فاز بوده و ممکن است از ۱/۵ تا ۲ برابر متغیر باشد (به ندرت می‌تواند از ۳ برابر تجاوز کند) که با استفاده از اجزای متقارن قابل محاسبه است. شکل ۸، فاز اول را نشان می‌دهد که تجهیزات شبکه، خطاهای ترمینال سه فاز را پاک می‌کنند. ضریب اولین قطبی که خطای سه فاز به زمین را پاک می‌کند به صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:(J. C. Das, 2010)

$$\frac{3}{2} \times \frac{2X_0/X_1}{1+[2X_0/X_1]} \qquad (۲)$$

برای خطاهای بدون تماس با زمین، عبارت زیر را می‌توان نوشت:

$$\left[\frac{3}{2} \times \frac{2(X_0+Y_0)X_1}{1+[2(X_0+Y_0)/X_1]}\right] \qquad (۳)$$

که در آن X_1 و X_0 راکتانس‌های توالی مثبت و صفر سمت منبع هستند. در حال حاضر، برای مدارشکن‌های بالای ۱۰۰ کیلوولت با سیستم‌های زمین جامد، ضریب اولین فاز قطع‌کننده ۱/۳ است که با توجه به نوع خطا متفاوت می‌باشد. به طور مثال برای یک قطع‌کننده ۵۵۰ کیلوولت، خطای ترمینال ۱/۳ و برای خطای خط کوتاه و خطای خارج از فاز، این مقدار ۲ است.(J. C. Das, 2010)



شکل ۸: (a) ضریب اولین فاز قطع کننده - خطای ترمینال سه فاز، عدم اتصال به زمین. (b) خطای سه فاز در سمت بار. (c) خطای سه فاز به زمین در سمت بار

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

با افزایش فرکانس طبیعی، ظرفیت قطع هر یک از کلیدهای قدرت در شبکه کاهش می‌یابد. با این حال، می‌توان با اطمینان بیان کرد که در این حالت کاهش ظرفیت قطع مدارشکن‌ها در مقایسه با کاهش توان اتصال کوتاه، سرعت کمتری دارد. ساده‌ترین راه برای مستقل کردن ظرفیت شکست از فرکانس طبیعی، تأثیرگذاری بر نرخ افزایش ولتاژ بازیابی (RRRV) توسط مقاومت‌ها در کنتاکت‌های مدارشکن‌ها است. با این حال، ممکن است موقعیت‌های خاصی وجود داشته باشد که ظرفیت قطع یک مدارشکن در آن کاهش یابد یا به یک مدارشکن با ظرفیت قطع بالاتر نیاز باشد. TRV یک پارامتر مهم برای مشخصات کلیدهای مدار است که استانداردهای ANSI/IEEE و IEC، پارامترهای TRV را در ساختار رتبه‌بندی کلیدها مشخص می‌کنند..(IEEE Standard C37.011, 2011)

۲-۲. خطای ترمینال و TRV تک فرکانسی

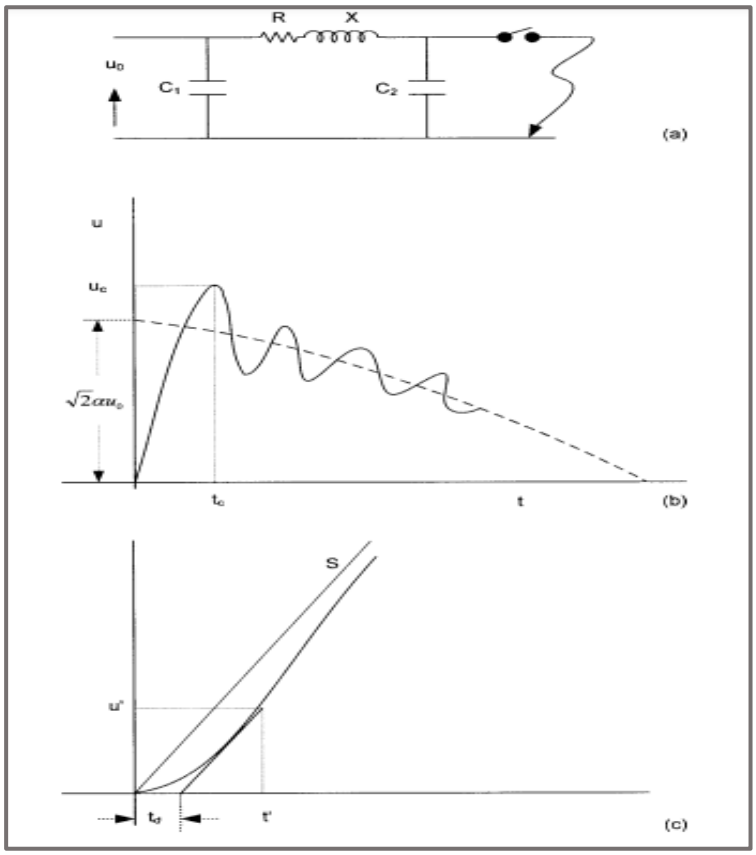
مداری شامل یک گذرای تک فرکانسی برای یک خطای ترمینال در سیستمی متشکل از خازن‌ها و اندوکتانس‌های توزیع شده، رخ می‌دهد. در این حالت، خطای ترمینال به عنوان خطای نزدیک به قطع‌کننده مدار تعریف می‌شود و راکتانس بین خطا و قطع‌کننده مدار ناچیز است که از آن صرف نظر می‌شود. TRV می‌تواند در محدوده ۲۰ تا ۱۰۰۰۰ هرتز متفاوت باشد. ثابت‌های سیستم قدرت یعنی مقاومت، اندوکتانس و ظرفیت خازنی در شکل ۸ نشان داده می‌شود. این مدار ممکن است به خوبی نشان دهنده مدل $\prod$ یک خط انتقال باشد. همچنین شکل ۹-b پارامترهای اساسی ولتاژ بازیابی گذرا را برای یک خطای ترمینال در شبکه ساده شده

نرخ افزایش ولتاژ بازیابی (RRRV = S) مماس بر ولتاژ بازیابی گذرا است که از نقطه صفر ولتاژ بازیابی گذرای ذاتی (ITRV) شروع می‌شود. TRV می‌تواند با طراحی و عملکرد قطع‌کننده مدار تغییر کند، از این رو TRV اندازه گیری شده در پایانه‌های دو قطع‌کننده مدار می‌تواند متفاوت باشد. مشخصات سیستم قدرت با نادیده گرفتن اثر قطع کننده‌ها محاسبه می‌شود که به معنای این است هنگام عبور جریان نامی از یک مدارشکن ایده‌آل، امپدانس ترمینال صفر بوده و هنگام قطع جریان اتصال کوتاه، امپدانس ترمینال آن فوراً به بینهایت تغییر می‌کند. سپس TRV را ولتاژ بازیابی گذرای ذاتی می‌نامند. شکل ۹-c نمای بزرگ شده‌ای از شیب را نشان می‌دهد که در چند میکروثانیه اول رفتار ولتاژ ممکن است با تاخیر زمانی t_d توصیف شود که به خازن زمین مدار بستگی دارد. تأخیر زمانی t_d در شکل ۹-c به صورت تقریبی برابر با معادله زیر است:(J. C. Das, 2010)

$$t_d = CZ_0 \qquad (٤)$$

که در آن C ظرفیت خازنی پراکندگی نسبت به زمین و Z_0 امپدانس موجی سیستم است. همچنین استاندارد IEC، افزایش خطی ولتاژ را با امپدانس موجی ٤٥٠ اهم و بدون تأخیر زمانی در نظر می‌گیرد.(J. C. Das, 2010)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل a-۹ نشان می‌دهد.(J. C. Das, 2010)

شکل ۹: مشخصات ولتاژ بازیابی گذرا در یک خطای ترمینال. (a) پیکربندی سیستم. (b) مشخصات ولتاژ بازیابی. (c) منحنی TRV اولیه، خط تاخیر و RRRV به صورت S نشان داده شده است.

۲-۳. TRV در مدارهای خازنی و القایی

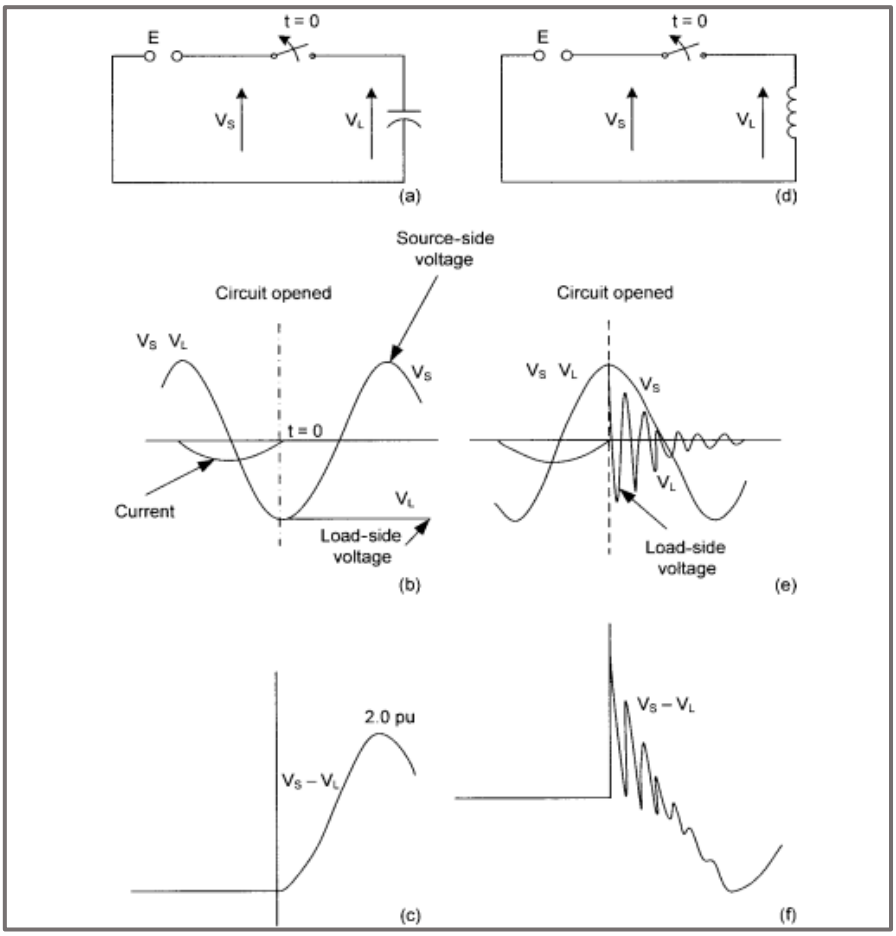
TRV در قطع مدارهای خازنی و القایی در شکل ۱۰ نشان داده شده است. زمانی که در یک مدار خازنی، جریان از صفر عبور می‌کند (شکل a-۱۰) ولتاژ سیستم روی خازن‌ها محبوس می‌شود. TRV، تفاوت ولتاژی سمت منبع و بار مدارشکن پس از ۱/۲ سیکل قطع جریان، حداکثر به ۲ پریونیت در هر فاز می‌رسد. نوسانات TRV در شکل a-۱۰ و c-۱۰ عملاً وجود ندارند؛ زیرا ظرفیت خازنی بزرگ، فرکانس نوسانی را سرکوب کرده و نرخ افزایش TRV کم است که این موضوع ممکن است باعث قطع کنتاکت‌های کلید شود. زمانی که فاصله کافی بین کنتاکت‌های کلید وجود نداشته باشد، ممکن است پدیده وصل مجدد رخ دهد. پدیده وصل مجدد به قطع ناموفق یک کلید گفته میشود. این موضوع در هنگام قطع یک بار القایی صدق

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

نمی‌کند(شکل d-۱۰، e-۱۰ و f-۱۰)؛ زیرا ظرفیت خازنی در سمت قطع شده، کم و فرکانس مدار عایق شده زیاد است. بنابراین TRV نوسانی بوده و نرخ افزایش TRV پس از قطع نسبتاً زیاد است.(J. C. Das, 2010)

در بخش قبل نمونه‌هایی از TRV تک فرکانسی ذکر شد که زمانی رخ می‌دهد که انرژی الکتریکی بین عناصر خازنی و القایی توزیع شود و پس از اتصال کوتاه هیچ خط انتقالی در باس مربوطه متصل نباشد، همچنین هیچ شارژ اولیه‌ای روی خازن یا جریان اولیه‌ای روی سلف وجود نداشته باشد. سپس ولتاژ خازن، که می‌تواند معادل TRV باشد، عبارت است از:(J. C. Das, 2010)

$$\mathrm{TRV} = \frac{V}{LC}\left(\frac{s}{s^2+\omega^2}\right)\left(\frac{1}{s^2+1/LC}\right) \qquad (۵)$$

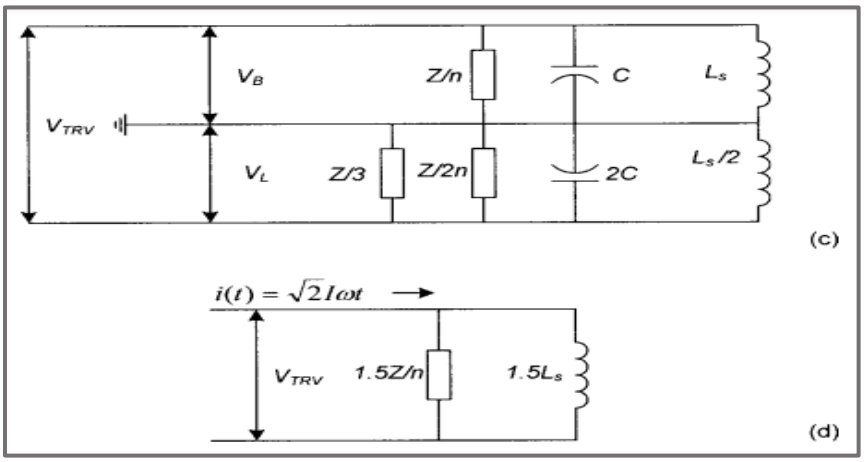


شکل ۱۰: (a)، (b) و (c) به ترتیب قطع جریان خازنی، نمودار مدار ولتاژ سمت بار و منبع و TRV. (d)، (e) و (f) به ترتیب قطع جریان القایی، نمودار مدار ولتاژ سمت بار و منبع و TRV.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

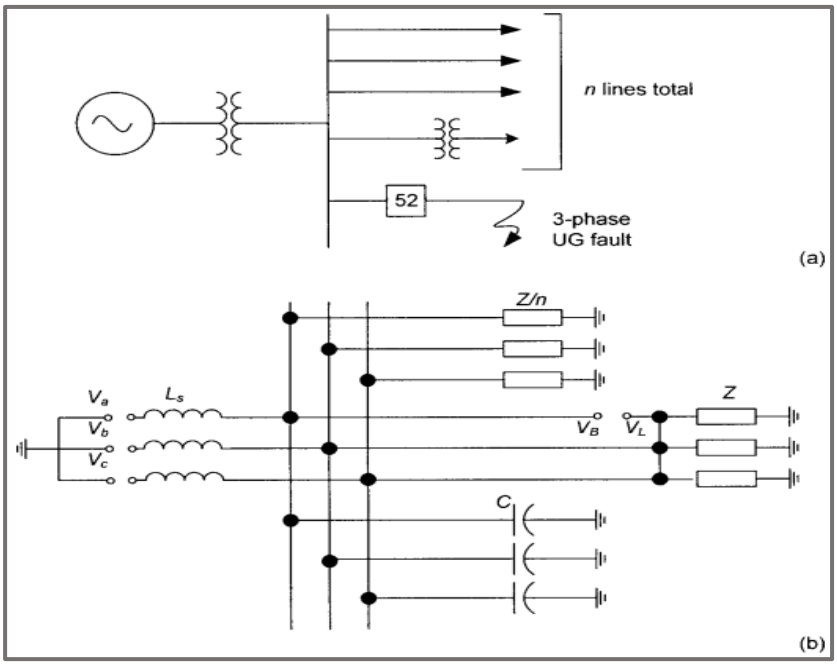
۲-٤. TRV دوفرکانسی

مداری که شامل اندوکتانس و ظرفیت خازنی در دو طرف کلید باشد باعث ایجاد TRV دوفرکانسی می‌شود. در این حالت پس از قطع خطا، هر دو مدار در فرکانس‌های خود نوسان می‌کنند و یک گذرای دوفرکانسی مرکب در سراسر کنتاکت‌های مدارشکن ظاهر می‌شود که این موضوع برای یک خطای خط کوتاه در فاصله بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر از کلید(SLF) می‌تواند رخ دهد. با توجه به تجهیزات معیوب در شبکه، این بازیابی ممکن است دارای امواج در حال حرکت باشد. در سیستم‌های بالاتر از ۱۲۱ کیلوولت قطع‌کننده‌های مدار معمولاً در مدارهایی ترکیبی استفاده می‌شوند که در آن خطاها می‌توانند توسط خطوط انتقال و ترانسفورماتورها تغذیه شوند. شکل a-۱۱ را در نظر بگیرید که در آن n خط انتقال از یک باس سرچشمه می‌گیرد. توجه داشته باشید که در پایان یکی از خطوط انتقال، ترانسفورماتور گنجانده شده است. شین اصلی از یک ترانسفورماتور تغذیه می‌شود و می‌توان راکتانس منبع را به راکتانس ترانسفورماتور اضافه کرد. همانطور که در شکل نشان داده شده است، یک خطای سه فاز زمین نشده در باس رخ می‌دهد. شکل b-۱۱ شبکه گذرا را در زمانی نشان می‌دهد که فاز اول (فاز a) خطا را قطع می‌کند در حالی که در دو فاز دیگر کلیدها هنوز بسته می‌باشند. ولتاژ فاز a به زمین، ۱ پریونیت و ولتاژ فاز b و c برابر با ۱/۲- پریونیت است. اگر ولتاژ سمت بار و سمت منبع کلید را به ترتیب V_L و V_B نشان دهیم، در واقع TRV همان تفاوت این دو ولتاژ است. برای به دست آوردن یک مدار معادل، همانطور که در شکل c-۱۰ نشان داده شده است، امپدانس موجی n خط موازی Z/n است. خطی که دارای خطا است، امپدانس موجی (Z) و ظرفیت خازنی ترانسفورماتور(C) شین و بریکر را نیز دارد که همه با هم جمع شده‌اند. در سمت باس، ولتاژ V_B با افت ولتاژ در راکتانس ترانسفورماتور(L_s)، ظرفیت باس(C) و امپدانس موجی معادل n خط به صورت موازی تعیین می‌شود. در سمت خطا نیز، مسیر از طریق فازهای b و c به صورت موازی است.

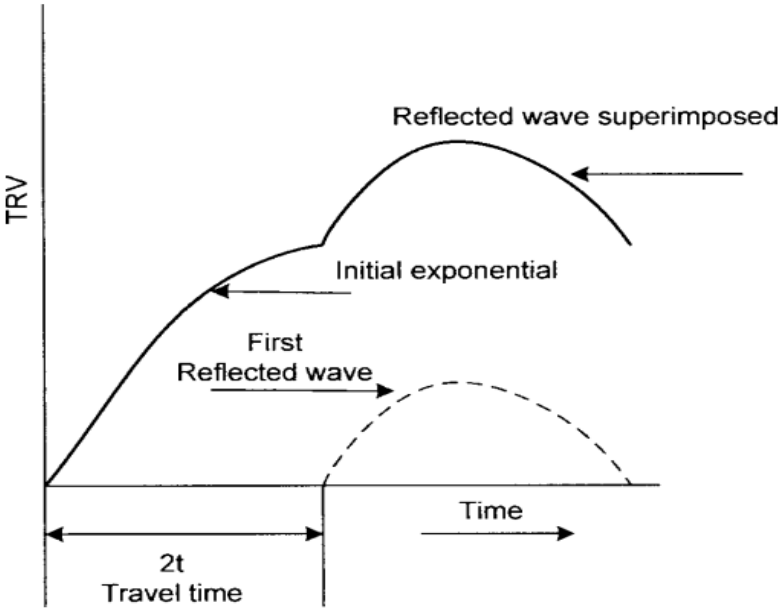


شکل c-۱۱ این موضوع را توضیح می‌دهد.(J. C. Das, 2010)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل ۱۱: (a) پیکربندی سیستم قدرت. (b) مدار معادل کشیده شده با اولین فاز برای پاک کردن خطا در حالی که دو فاز دیگر هنوز متصل هستند. (c) مدار کلی ساده شده برای تحلیل TRV. (d) ساده سازی مدار در (c) برای محاسبات TRV.



شکل ۱۲: مشخصات TRV، شکل موج معادل دوفرکانسی

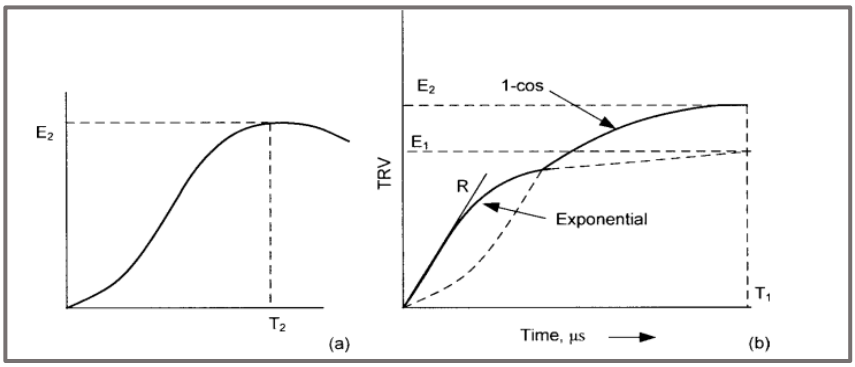
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

۳. استانداردهای ANSI/IEEE برای TRV

طبق استانداردهای ANSI/IEEE، برای قطع‌کننده‌های با ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و کمتر، ولتاژ نامی‌گذرا به صورت پوش تعریف می‌شود که مانند تعریف در استانداردها، با استفاده از مقادیر E_2 و T_2 توسط شکل موج 1-cos تشکیل می‌شود. E_2 پیک TRV است که حاصل‌ضرب ۱/۸۸ در حداکثر ولتاژ نامی در نظر گرفته می‌شود و T_2 نیز زمان رسیدن به این پیک برحسب میکروثانیه است که با توجه به نوع قطع‌کننده مدار، نوع اتصال کوتاه و درجه ولتاژ متغیر است. این موضوع در شکل a-۱۳ نشان داده شده است. همچنین برای ۱/۲ چرخه اول، جزء توان-فرکانس ثابت در نظر گرفته می‌شود و با خط مستقیم E_2 نشان داده می‌شود. منحنی شکل a-۱۳ منحنی 1-cos نامیده می‌شود. TRV تشکیل شده با پوش، توسط منحنی تعریف می‌شود.(J. C. Das, 2010)

برای قطع‌کننده‌های دارای ولتاژ ۱۰۰ کیلوولت و بالاتر، مقدار نامی TRV با ترکیب یک شکل موج نمایی (exponential) و شکل موج 1-cos نشان داده می‌شود.(شکل b-۱۳) پوش تشکیل شده توسط منحنی نمایی با خواندن مقادیر نامی E_1، R، T_1، E_2 و T_2 از استانداردها و رفتار این مقادیر در جریان نامی اتصال کوتاه قطع‌کننده به دست می‌آید. مقدار R بدون توجه به اثر خازن سمت شین، به عنوان نرخ افزایش TRV نامی تعریف می‌شود که در آن ولتاژ بازیابی در پایانه‌های قطب اول افزایش می‌یابد تا تحت شرایط نامی مشخص شده برای یک خطای سه فاز زمین نشده در سمت بار قطع شود. نرخ تقریبی نزدیک به de/dt یا مقدار شیب پوش، در این حالت نامی است اما در واقع کمی بیشتر است زیرا ظرفیت خازنی سمت باس نادیده گرفته می‌شود. معادلات به صورت زیر نوشته می‌شود:(J. C. Das, 2010)

$$e_1 = E_1\left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$
$$\tau = \frac{E_1}{R} \qquad (٦)$$
$$e_2 = \frac{E_2}{2}\left[1 - \cos\left(\pi t/T_2\right)\right]$$



شکل ۱۳: (a) منحنی 1-cos در ANSI/IEEE برای مدارشکن‌های ۱۰۰ کیلوولت و کمتر (b) پروفیل TRV در ANSI/IEEE برای مدارشکن‌های ۱۰۰ کیلوولت و بالاتر

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

جدول ۱: مقادیر نامی TRV برای سطح ولتاژ بالاتر از ۱۲۰ کیلوولت(J. C. Das, 2010)

TABLE 8-3 Specimen ANSI/IEEE Recovery Voltage Parameters of Definite-Purpose Circuit Breakers (123 kV and Above)

Rated Maximum Voltage (kV)	K Factor	Rated Short-Circuit and Short-Time Current (kA rms)	Rated Recovery Voltage: Peak Voltage, E_2 (kV), Peak	Rated Recovery Voltage: Time to Peak, T_2 (μs)	Definite-Purpose TRV Parameters at 30% of Rated Short-Circuit Current: Current (kA rms)	Definite-Purpose TRV Parameters at 30% of Rated Short-Circuit Current: Peak Voltage (kV), Peak	Definite-Purpose TRV Parameters at 30% of Rated Short-Circuit Current: Time to Peak (μs)	Definite-Purpose TRV Parameters at 7% of Rated Short-Circuit Current: Current (kA rms)	Definite-Purpose TRV Parameters at 7% of Rated Short-Circuit Current: Peak Voltage (kV)	Definite-Purpose TRV Parameters at 7% of Rated Short-Circuit Current: Time to Peak (μs)
245	1	63	431	520	19	487	30.3	4.4	505	43.8
362	1	40	637	775	12	720	40.7	2.8	745	63.2
362	1	63	637	775	19	720	37.1	4.4	745	55.7
550	1	40	968	1325	12	1094	49.0	2.8	1133	76.1
550	1	63	968	1325	19	1094	44.7	4.4	1133	63.9

٤. نمایه‌های TRV براساس استاندارد IEC

برای نمایش TRV در IEC 62271-1009، روش‌های دو و چهار پارامتری استفاده می‌شود که در استاندارد پیش‌نویس IEEE نیز پذیرفته شده است و در ادامه به آن پرداخته می‌شود.

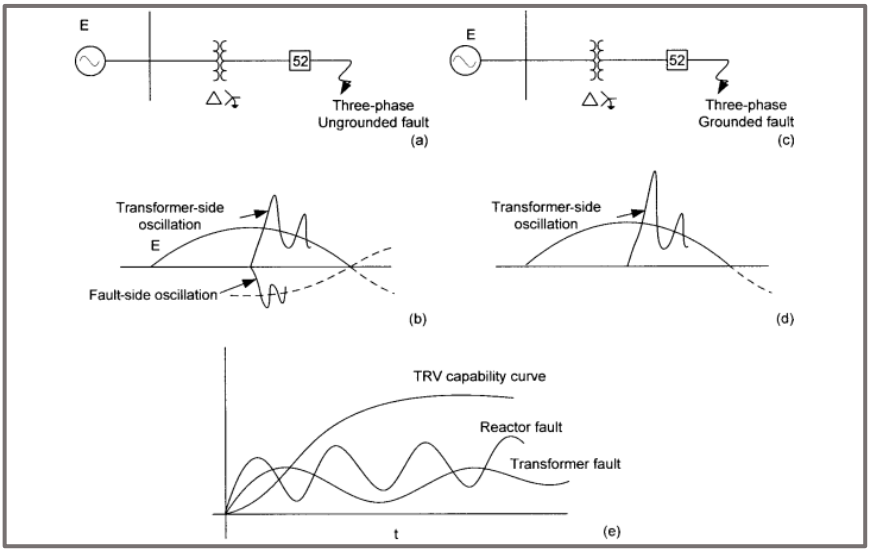
٤-١. روش چهار پارامتری

شکل ١٤ نمایش موج TRV را با روش چهار پارامتری نشان می‌دهد. استانداردها فرض می‌کنند برای سیستم‌های بالاتر از ۷۲٫۵ کیلوولت، رفع خطاهای ترمینال بالاتر از ۳۰٪ مقدار کل جریان خطا منجر به ایجاد ویژگی‌هایی در TRV می‌شود که دارای یک پوشش چهار پارامتری هستند. موج TRV دارای یک دوره اولیه افزایش بالا و سپس نرخ افزایش کم است. این شکل موج‌ها را می‌توان با چهار پارامتر زیر نشان داد:(J. C. Das, 2010)

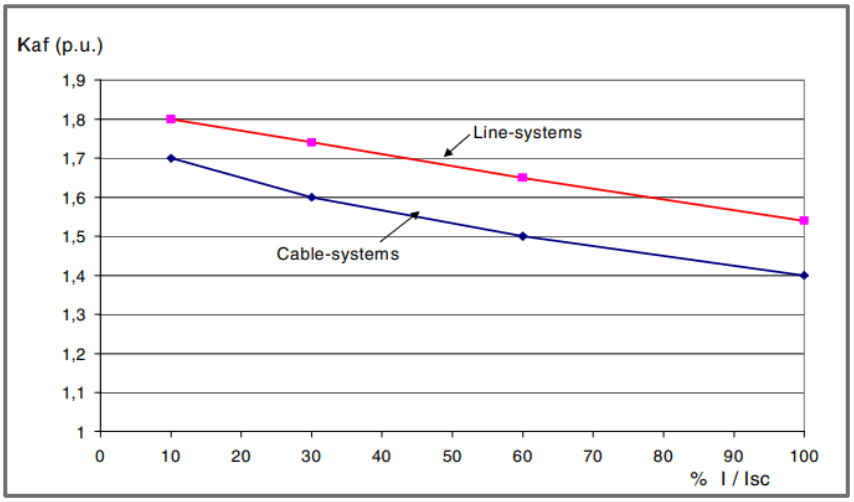
- u1 = ولتاژ مرجع اول بر حسب کیلوولت
- t1 = زمان رسیدن به u1، بر حسب میلی‌ثانیه
- uc = ولتاژ مرجع دوم، مقدار پیک TRV
- t2 = زمان رسیدن به uc، بر حسب میلی‌ثانیه

IEC مقادیر u1، uc، t1 و t2 را برای کلیدهای مدار مشخص می‌کند. ضریب دامنه(Kaf) برای حالت‌های مختلف آزمایش مانند T100، T60، T30، T10 (به ترتیب در ۱۰۰٪، ۶۰٪، ۳۰٪ یا ۱۰٪ از جریان خطا) داده شده است.(J. C. Das, 2010)

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

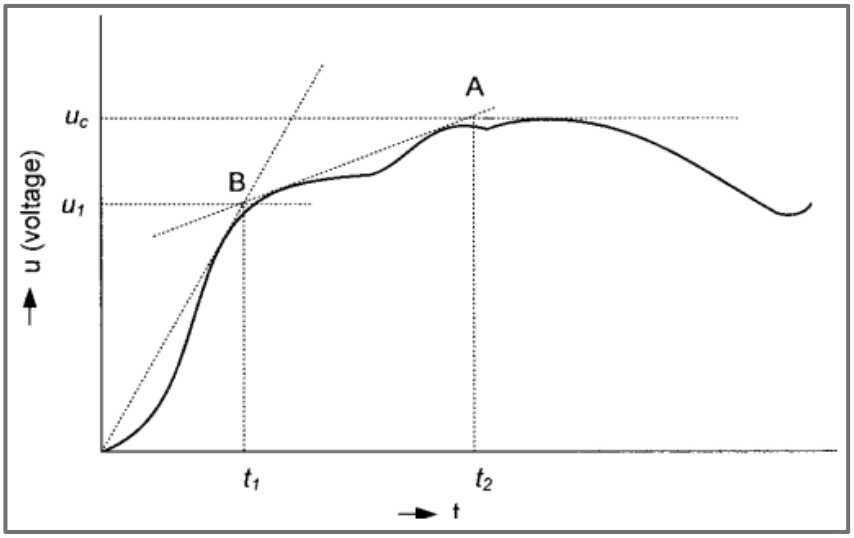


شکل ١٤: (a) خطای سه فاز زمین نشده در سمت ثانویه ترانسفورماتور با سیستم سیم‌پیچی مثلث-ستاره.(b) پروفیل. (c) خطای سه فاز به زمین در سمت ثانویه یک ترانسفورماتور با سیستم سیم‌پیچی مثلث-ستاره.(d) پروفیل TRV . (e) موقعیت‌هایی (خطاهای نزدیک ترانسفورماتور یا راکتور) که در آن TRV می‌تواند از منحنی قابلیت TRV مدارشکن‌ها فراتر رود.



شکل ١٥: ضریب دامنه(Kaf) به عنوان تابعی از جریان اتصال کوتاه(ISc جریان اتصال کوتاه نامی است)

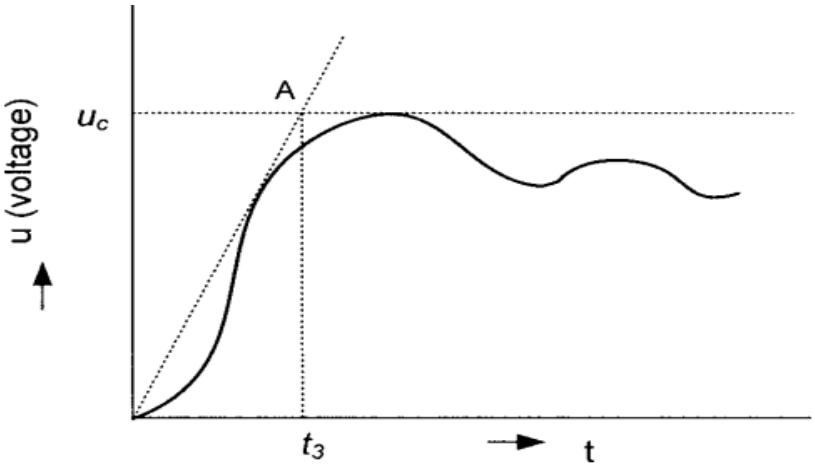
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل ١٦: نمایش چهار پارامتری TRV در IEC

٤-٢. نمایش دوپارامتری

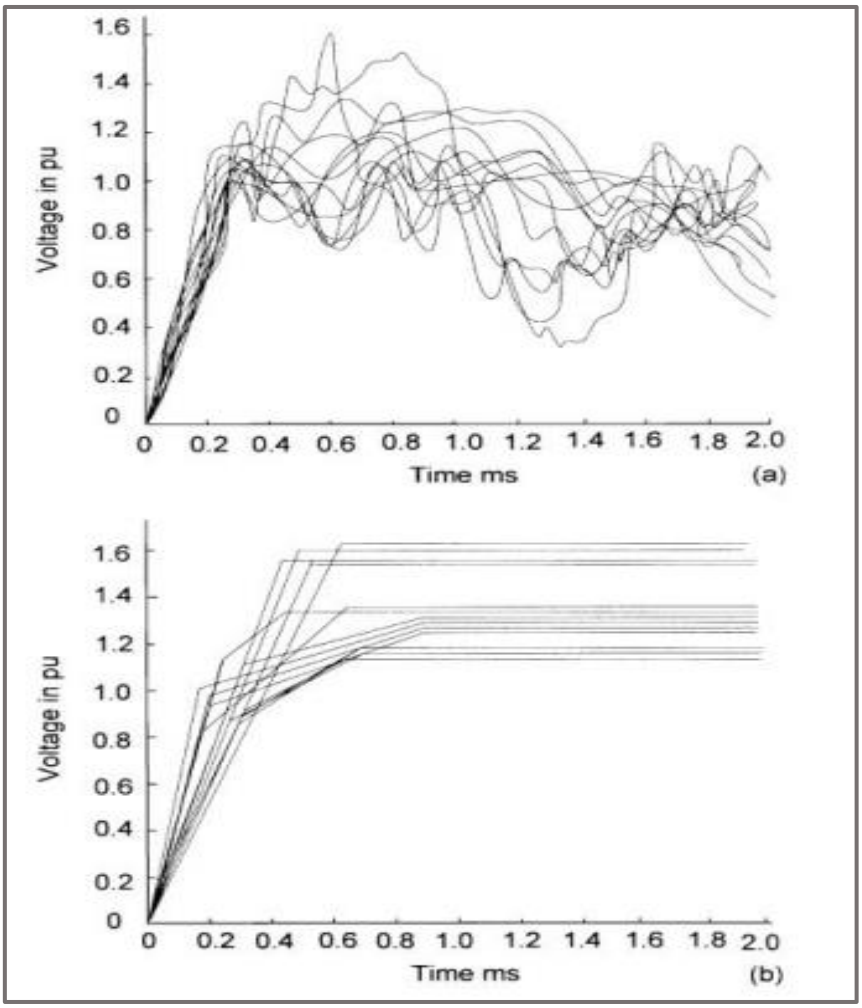
برای خطاهای ترمینال بین ۱۰٪ تا ۳۰٪ در سیستم‌های بالاتر از ۷۲/۵ کیلوولت و برای تمام جریان‌های خطای ترمینال در سیستم‌های ۷۲/۵ کیلوولت و کمتر، استاندارد، پروفیل TRV را با دو پارامتر uc و t3 در نظر می‌گیرد. شکل ۱۵ نمایش موج TRV را به روش دوپارامتری نشان می‌دهد. این شکل موج در سیستم‌های کمتر از ۱۰۰ کیلوولت یا مکان‌هایی که جریان اتصال کوتاه در مقایسه با حداکثر جریان اتصال کوتاه در سیستم کم است، رخ می‌دهد. TRV را در این حالت می‌توان تقریباً با یک فرکانس گذرا نشان داد.(J. C. Das, 2010)



شکل ۱۷: نمایش دوپارامتری TRV در IEC.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

همانطور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، نرخ اولیه افزایش TRV در بخش‌هایی که براساس روش‌های دو یا چهار پارامتری با مشخص کردن خط تاخیر ترسیم شده‌اند، قرار می‌گیرد. بنابراین، با توجه به نوع خطا، پیکربندی سیستم و مکانی که خطا در آن رخ می‌دهد و همچنین تغییر رفتار فرایند قطع کلیدهای مدار، پروفیل‌های متفاوتی از TRV می‌تواند وجود داشته باشد.(J. C. Das, 2010)



شکل ۱۸: (a) مقدار اندازه‌گیری شده‌ی TRV در یک سیستم ٤٠٠ کیلوولت. (b) بیان شده توسط روش‌های IEC.

۵. مقایسه استانداردهای IEEE وIEC

همانطور که در بخش‌های قبل بررسی شد دو استاندارد IEEE و IEC تعاریف متفاوتی در رابطه با شکل موج‌های TRV ارائه کردند که در ادامه به مقایسه تفاوت‌های این دو استاندارد پرداخته می‌شود.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

- تفاوت در تعریف شکل موج‌ها

دسته‌بندی استاندارد IEEE در رابطه با شکل موج‌های TRV براساس یک تابع exponential برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ کمتر از ۱۰۰ کیلوولت و یک تابع شامل ترکیب توابع exponential و 1-cos برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ بالاتر از ۱۰۰ کیلوولت انجام شده است. اما دسته‌بندی استاندارد IEC در رابطه با شکل موج‌های TRV برای کلیدهای با محدوده ولتاژ کمتر از ۷۲٫۵ کیلوولت براساس پوش‌های دوپارامتری و برای کلیدهایی با محدوده ولتاژ بیشتر از ۷۲٫۵ کیلوولت براساس پوش‌های ٤ پارامتری ارائه شده است.

- در نظر گرفتن T_d

استاندارد IEC در این رابطه بدترین حالت را لحاظ کرده است؛ به این معنا که مقادیر خازن‌های پارازیتی سمت منبع را در نظر نگرفته، بدترین نوع RRRV را لحاظ کرده و عملا مقدار امپدانس موجی را ٤٥٠ اهم فرض کرده است.

- استاندارد IEEE C37.06 و نسخه IEEE C37.06.1

مقادیر پیک TRV برای محاسبات طبق استاندارد IEEE C37.06 از رابطه زیر پیروی می‌کنند که ضرایب Kp,Kaf که مربوط به درصد محدوده قطع جریان خطا، فاز قطع‌کننده و نوع سیستم زمین در هنگام خطا در محاسبه پیک تاثیرگذار می‌باشند.

$$U_c = k_p \times k_{af} \times \frac{U_r\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (۷)$$

اما در استاندارد IEEE C37.06.1 ضریب جدیدی با عنوان Kvd که مربوط به تاثیر ترانسفورماتور نزدیک به خطا می‌باشد، تعریف می‌شود. اثر این ترانسفورماتور براساس محدودیتی که در عبور جریان خطا نشان می‌دهد، نمایان می‌شود و با توجه به اینکه چه درصدی از جریان خطا را محدود می‌کند ضریب Kvd تعریف می‌شود. در نهایت با توجه به این تعریف، محاسبه TRV براساس رابطه زیر خواهد بود:

$$U_c = k_p \times k_{af} \times k_{vd} \times \frac{U_r\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \quad (۸)$$

٦. شبیه‌سازی موردی TRV

در این بخش از پژوهش به شبیه‌سازی موردی دو حالت از شکل موج‌های TRV در نرم‌افزار حالت گذاری EMTP_RV پرداخته می‌شود تا به درک بهتری از مفاهیم ارائه شده برسیم و شکل موج‌های حاصل از آن را هنگام وقوع در یک شبکه واقعی مشاهده کنیم.

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

جدول ۲: مقادیر تعریف شده برای TRV براساس استاندارد IEEE (IEEE Std C37.011, 2019)

Standard values of TRV represented by four parameters for terminal fault, short-line fault and out-of-phase fault test duties.												
Line No.	Rated maximum voltage (1) U_r kV, rms	Test duty	First pole to clear factor k_{pp} p.u.	Amplitude factor k_{af} p.u.	First reference voltage u_1 kV	Time µs	TRV peak value (4) (8) u_c kV	Time (2) t_2 µs	Time delay (3) t_d µs	Voltage u' kV	Time t' µs	RRRV u_1/t_1 kV/µs
	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11	Col 12
1	123	Terminal fault	1.5	1.40	113	56	211	224	2	57	30	2
2	123	Short line fault	1.0	1.40	75	38	141	152	2	38	21	2
3	123	Out-of-phase	2.5	1.25	188	113	314	452	2	94	51	1.67
4	145	Terminal fault	1.5	1.40	133	67	249	268	2	67	35	2
5	145	Short line fault	1.0	1.40	89	44	166	178	2	44	24	2
6	145	Out-of-phase	2.5	1.25	222	133	370	532	2	111	68	1.67
7	170	Terminal fault	1.5	1.40	156	78	291	312	2	78	41	2
8	170	Short line fault	1.0	1.40	104	52	194	208	2	52	28	2
9	170	Out-of-phase	2.0 (6)	1.25	208	135	347	541	2	104	70	1.54
10	245	Terminal fault	1.5	1.40	225	113	420	452	2	113	58	2
11	245	Short line fault	1.0	1.40	150	75	280	300	2	75	40	2
12	245	Out-of-phase	2.0 (6)	1.25	300	195	500	779	2	150	99	1.54

جدول ۳: مقادیر تعریف شده برای TRV براساس استاندارد IEEE (IEEE Standard C37.01, 2011)

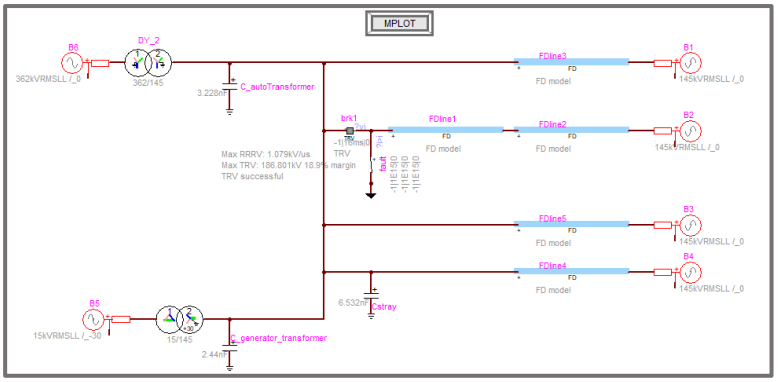
	Rated	Rated	Rated Short-Circuit	Rated Transient Recovery Voltage (1)		Definite Purpose TRV Parameters at 30% of Rated Short-Circuit Current			Definite Purpose TRV Parameters at 7% of Rated Short-Circuit Current		
Line	Maximum Voltage kV, rms (1)	Voltage Range Factor (1)	and Short-Time Current kA, rms (1)	Peak Voltage E_2 kV, peak	Time to Peak T_2 µsec	Current kA, rms	Peak Voltage kV, peak	Time to Peak µsec	Current kA, rms	Peak Voltage kV, peak	Time to Peak µsec
No.	Col 1	Col 2	Col 3	Col 4	Col 5	Col 6	Col 7	Col 8	Col 9	Col 10	Col 11
1	123	1.0	20	216	275	6	245	28.3	1.4	253	48.7
2	123	1.0	40	216	260	12	245	23.5	2.8	253	36.5
3	123	1.0	63	216	260	19	245	21.4	4.4	253	31.0
4	145	1.0	20	255	330	6	288	30.9	1.4	299	53.4
5	145	1.0	40	255	310	12	288	25.8	2.8	299	40.0
6	145	1.0	63	255	310	19	288	23.5	4.4	299	34.0
7	145	1.0	80	255	310	24	288	22.6	5.6	299	31.2
8	170	1.0	16	299	395	8	338	35.2	1.1	350	63.4
9	170	1.0	31.5	299	360	9.5	338	29.1	2.2	350	47.0
10	170	1.0	40	299	360	12	338	27.8	2.8	350	43.2
11	170	1.0	50	299	360	15	338	26.4	3.5	350	35.7
12	170	1.0	63	299	360	19	338	25.4	4.4	350	36.7
13	245	1.0	31.5	431	520	9.5	487	34.8	2.2	505	56.2
14	245	1.0	40	431	520	12	487	33.3	2.8	505	51.6
15	245	1.0	50	431	520	15	487	31.6	3.5	505	47.4
16	245	1.0	63	431	520	19	487	30.3	4.4	505	43.8
17	362	1.0	40	637	775	12	720	40.7	2.8	745	63.2
18	362	1.0	63	637	775	19	720	37.1	4.4	745	55.7
19	550	1.0	40	968	1325	12	1094	49.0	2.8	1133	76.1
20	550	1.0	63	968	1325	19	1094	44.7	4.4	1133	63.9
21	800	1.0	40	1408	1530	12	1591	60.7	2.8	1647	94.1
22	800	1.0	63	1408	1530	19	1591	55.3	4.4	1647	79.9

۶-۱. حالت نمایی (Exponential)

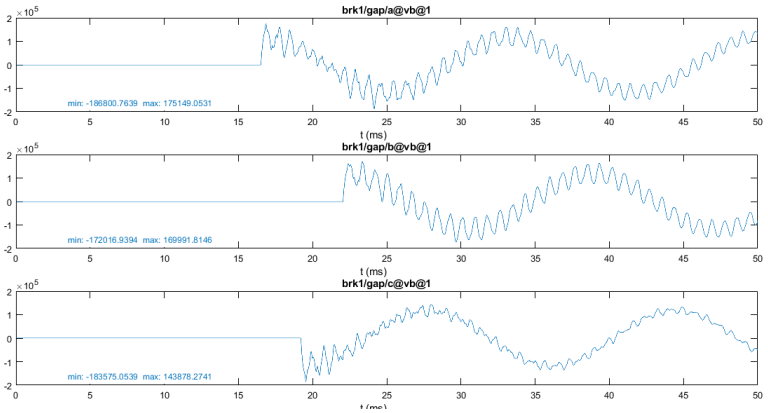
شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده این شکل موج در شکل ۱۹ مشاهده می‌شود.

- حالت نمایی TRV زمانی رخ می‌دهد که یک خطای سه فاز زمین نشده روی پایانه‌های کلید قدرت ایجاد شود و حداقل یک ترانسفورماتور و یک خط انتقال در سمت بدون خطای کلید وجود داشته باشد.
- شکل موج حاصل از این نوع TRV به صورت یک تابع نمایی خواهد بود.
- شبیه‌سازی حالت فوق با توجه به مقادیر داده شده برای عناصر موجود در نرم‌افزار انجام شده است.
- در این مدار یک خطای سه فاز زمین نشده بعد از مدارشکن 1 ایجاد شده است.

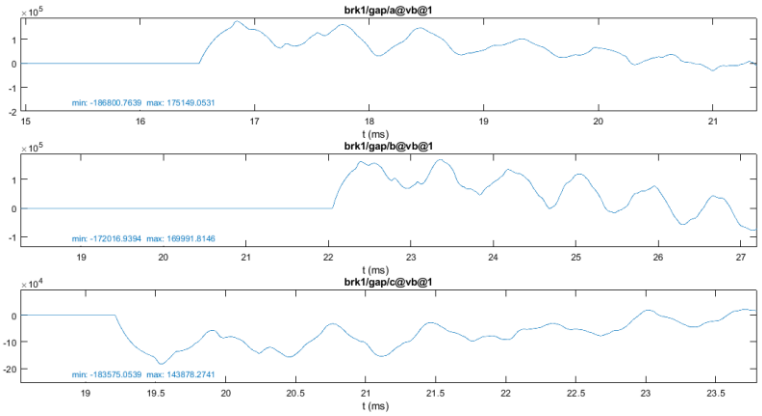
[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل ۱۹: شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده TRV در حالت نمایی



شکل ۲۰: نمایش شکل موج TRV در شبیه‌سازی شبکه معادل

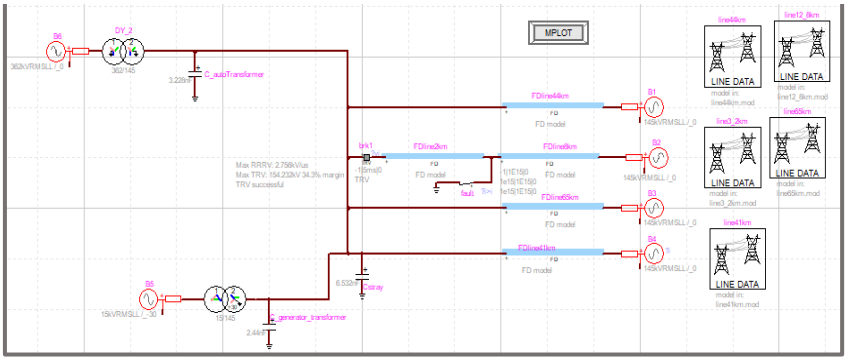


شکل ۲۱: نمای بزرگ شده از شکل شماره ۲۰

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

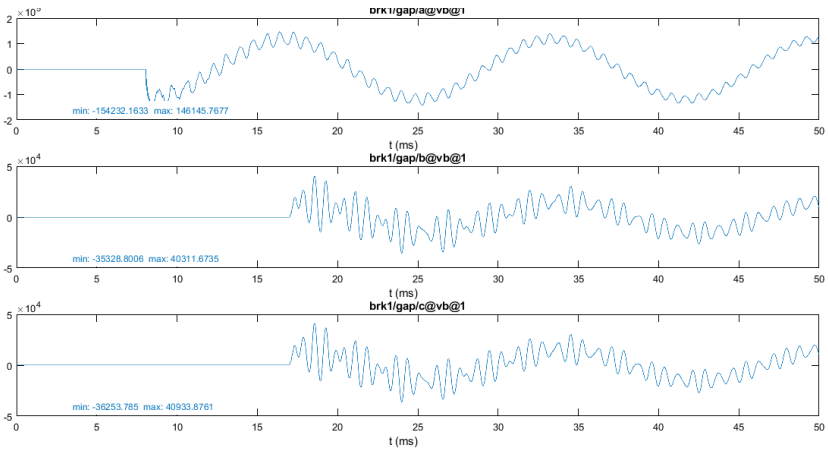
۶-۲. حالت خطای خط کوتاه (SLF)

شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده این شکل موج در شکل ۲۲ مشاهده می‌شود.



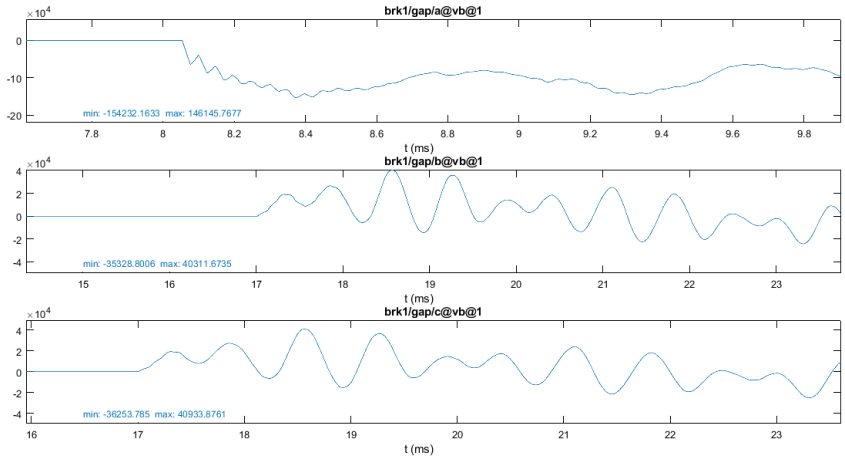
شکل(۲۲): شبکه شبیه‌سازی شده برای مشاهده TRV در حالت SLF

- در این حالت نیز TRV زمانی رخ می‌دهد که خطا از محل کلید فاصله داشته باشد (معمولا بین ۲۰۰ تا ۲۰۰۰ متر).
- شکل موج TRV در این حالت به صورت دندان اره‌ای یا مثلثی خواهد بود.
- خطای اعمال شده در فاصله ۲ کیلومتری از مدارشکن ۱ اعمال شده است.
- شبیه‌سازی حالت فوق با توجه به مقادیر داده شده به عناصر انجام شده است.



شکل ۲۳: نمایش شکل موج TRV در شبیه‌سازی شبکه

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]



شکل ۲٤: نمای بزرگ شده از شکل شماره ۲۳

۷. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ابتدا به بررسی و شناخت انواع اضافه‌ولتاژهای ممکن در شبکه قدرت پرداخته شد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها اضافه‌ولتاژهای ناشی از قطع و وصل کلیدهای قدرت می‌باشد. این اضافه‌ولتاژها دارای انواع مختلف شکل موج می‌باشند که اساس شکل‌گیری آن‌ها وابسته به پارامترهای توپولوژی شبکه موجود، نوع خطا، مقادیر جریان خطا و وجود عناصری مانند ترانسفورماتور، راکتور و خازن‌های پارازتی موجود در شبکه می‌باشد. اثرگذاری خازن‌های پارازیتی در مطالعات گذرا بسیار بااهمیت می‌باشد؛ زیرا سیستم در فرکانس‌های بالا جریان‌کشی‌های خازنی خواهد داشت که در مقدار قطع جریان خطا موثر خواهد بود. پس از بررسی و شناخت این پدیده، به استانداردهای موجود در این زمینه پرداخته شد و سپس برای درک بهتر مفاهیم و مشاهده TRV در یک شبکه واقعی، شبیه‌سازی موردی در نرم‌افزار حالت گذرایی EMTP-RV انجام شد.

۸. پیشنهادات

کلیدهای قدرت سیستم‌های عایقی متفاوتی نظیر هوا، روغن و خلا دارند که از میان آن‌ها کلیدهای خلا تا سطح ولتاژ ۷۲ کیلوولت مورد بهربردای قرار گرفته‌اند. بنابراین با توجه اهمیت ولتاژ بازگشتی گذرا در کلیدهای قدرت، زمینه‌های تحقیقاتی متعددی در این حوزه وجود دارد. از طرفی با توجه به گسترش روزافزون منابع انرژی تجدیدپذیر در جهان و نیاز جدی به تامین انرژی برق با آلودگی‌های زیست محیطی کمتر، توصیه‌ها و پیشنهادات تحقیقاتی می‌توانند به شرح زیر باشند:

۱. بررسی و تحلیل اثرگذاری فلیترهای مورد استفاده در منابع انرژی خورشیدی برروی اضافه‌ولتاژهای بازگشتی

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

۲. بررسی و تحلیل اثر گذاری سیستم‌های کابلی مورد استفاده در منابع انرژی بادی مستقر در دریاها و اقیانوس‌ها بر اضافه‌ولتاژهای بازگشتی
۳. بررسی، تجزیه و تحلیل اضافه‌ولتاژهای بازگشتی در کلیدهای خلا (vacuum circuit breaker)
۴. بررسی،تجزیه و تحلیل پارامترهای موثر بر اضافه‌ولتاژهای بازگشتی در کلیدهای قدرت مورد استفاده در پست‌های GIS

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]

فهرست منابع

J. C. Das “Transients in Electrical Systems Analysis, Recognition, and Mitigation”

IEEE Standard C37.011. Application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers; 2011.

IEEE Guide for the Application of Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers with Rated Maximum Voltage above 1000 V, IEEE Std C37.011 2019

IEEE Standard C37.01 Application guide for transient recovery voltage for AC high-voltage circuit breakers; 2011

[Downloaded from jots.knu.edu.af on 2025-08-28]