

ارائه روش نوینی جهت حفاظت ترانسفورماتور کوره قوس در برابر اضافه ولتاژهای گذرای ناشی از قطع و وصل کلید خلاء

محمد رضا آسبان^۱، رضا خدارحمی^۲، احمد دغلاوی^۳

شرکت گروه ملی صنعتی فولاد ایران^{۱۳۳}

چکیده

ترانسفورماتورهای کوره قوس الکتریکی که توسط کلید خلاء قطع و وصل می گردند، عامل اصلی ایجاد اضافه ولتاژهای گذرا در سیستم می باشند. این مقاله نقش کلید خلاء نصب شده جهت قطع و وصل بالای ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی گروه ملی صنعتی فولاد ایران را مورد مطالعه و بررسی قرار می دهد، که در آن اضافه ولتاژ و جریان های گذرای ناشی از قطع و وصل کلید خلاء دارای اهمیت زیادی می باشد. شبیه سازی نرم افزاری عملکرد کلید خلاء اثبات می کند که عدم وجود یک مدار حفاظتی مناسب، باعث تاثیر زیاد اضافه ولتاژهای گذرای شدید بر روی ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی می باشد، که در این مقاله بطور کامل به این موضوع پرداخته می شود.

واژه های کلیدی: کوره های قوس الکتریکی، اضافه ولتاژهای گذرا، مدار RC، دستگاه اندازه گیری توان (ION7650)

^۱ Power_asban@yahoo.com

^۲ rkh2264@yahoo.com

^۳ ahmaddaghlavi@yahoo.com

در کارخانه فولادسازی گروه ملی صنعتی فولاد ایران، ترانسفورماتورهای کوره در یک پریود زمانی توسط اپراتور بطور مکرر قطع و وصل می گردند. بررسی ها نشان می دهد که با قطع و وصل کلید خلاء اضافه ولتاژهای شدیدی رخ می دهد، که در اثر آن ترانسفورماتورهای کوره دچار افت شدید مقاومت عایقی می گردند. اضافه ولتاژ و جریان های گذرا در ترانسفورماتور کوره های قوس الکتریکی جای تحقیق بسیار دارد، که مهمترین آنها اضافه ولتاژ زمان قطع کلید خلاء می باشد. با بررسی پدیده برش جریان می توان به طرح حفاظتی مناسبی در برابر اضافه ولتاژها رسید، که با اجرای آن بر روی ترانسفورماتور کوره می توان از مشکلات ناشی از این اضافه ولتاژها جلوگیری کرد. با استفاده از مدل پیشرفته شبیه سازی شده کلید خلاء توسط برنامه EMTP می توان طرح حفاظتی مناسبی را بدست آورد. [۲۱]

در این مقاله از مدل شبیه سازی شده قطع و وصل کلید خلاء یک ترانسفورماتور کوره قوس استفاده شده است، که دارای خصوصیات دینامیک یک کلید واقعی می باشد، و پارامترهای این مدل شبیه سازی بطور واقعی از دستگاه های اندازه گیری توان^۲ نصب شده در کارخانه فولاد سازی گروه ملی صنعتی فولاد اهواز بدست آمده است. شبیه سازی نشان می دهد که وضعیت بسته شدن کلید خلاء سبب ناپایداری شدیدی می گردد، که می تواند به سیم پیچ یا عایق ترانس آسیب برساند. بهر حال در زمان باز شدن کلید خلاء نیز اضافه ولتاژ شدیدی در ترانس کوره رخ می دهد که راه حل مناسب جهت دمپ این اضافه ولتاژها استفاده از مدار RC می باشد.

۲- حالت های ناپایدار قطع و وصل در کلید خلاء

کلیدهای خلاء با سطح ولتاژ متوسط جهت قطع و وصل بالای ترانسفورماتور کوره ها در حالت بی باری استفاده می شوند، که برای قطع و وصل قسمتی از مدار بکار می روند. از خصوصیات بسیار خوب کلیدهای خلاء برگشت پذیری سریع عایقی بعد از هر قطعی می باشد.

۲-۱- حالت وصل کلید خلاء

بسته شدن بریکر خلاء در کوره با سطح ولتاژ متوسط در شکل ۱ نشان داده شده است. در نقطه شکست بین کنتاکت ها در زمان بسته شدن تدریجی قطب های کلید پدیده قوس مجدد رخ می دهد که باعث افت ولتاژ شدید بین کنتاکت ها و هادی شدن مسیر، و بوجود آمدن جریان با فرکانس بالا می گردد. ویژگی این پدیده این است که به تدریج اندازه جریان کم شده و با یک شیب $(A/\mu s)$ ^۳ به صفر می رسد و کلید خلاء جریان را قطع می کند. در نتیجه ولتاژ برگشتی گذرا از استقامت عایقی بین کنتاکت ها تجاوز کرده و سبب قوس مجدد می گردد. [۳ و ۲۱] این فرایند تا قبل از قرار گرفتن کامل کنتاکت ها در وضعیت وصل، چندین بار اتفاق می افتد.

^۲ Power measurement ION7650

^۳ Amper/ micro second

۲-۲- حالت قطع کلید خلاء

اضافه ولتاژهای ناشی از قطع کلید خلاء در شکل ۱ مقدار زیادی می باشد، از ویژگی های خاص خلاء، قطع جریان های مغناطیسی حالت بی بار که همراه با جریان فرکانس بالا و ولتاژ ناپایدار است، می باشد. زمانی که اندازه جریان به جریان برش (Ich) برسد جرقه در خلاء ناپایدار و خاموش می شود، و جریان پیک به صفر سقوط می کند و ولتاژ ناگهان به اندازه di/dt بالا می رود. فرکانس نوسان در شکل ۲ نمایش داده شده است.

برای ترانسفورماتور با سطح ولتاژ متوسط، قطع جریان توسط کلید خلاء می تواند باعث تولید اضافه ولتاژهای خیلی شدیدی گردد. در زمان قطع جریان توسط کلید خلاء، انرژی مغناطیسی (W_{mag}) و انرژی الکتریکی (W_{elec}) در قسمت های قطع شده از مدار، بوسیله اندوکتانس سیم پیچ های ترانسفورماتور، جریان برش، ظرفیت خازنی کابل ها و ولتاژ کابل تعیین می گردد. از این رو اندوکتانس و انرژی مغناطیسی نسبت به ظرفیت خازنی و انرژی الکتریکی، مقدار زیادی می باشند. اضافه ولتاژهای رخ داده در شکل ۲ طبق رابطه زیر بدست می آیند.

$$W_{mag} = \frac{1}{2}LI^2 = W_{elec} = \frac{1}{2}CU^2 \rightarrow U = I_{ch}\sqrt{\frac{L}{C}} \quad (1)$$

همچنین جریان برش از رابطه زیر بدست می آید:

$$I_{ch} = (\omega \cdot i \cdot \alpha \cdot \beta)^q \quad (2)$$

ω : فرکانس شبکه، I : دامنه جریان، $\alpha = 6.2 \cdot 10^{-16}$ ، $\beta = 14.3$ ، $q = -0.07512$

L ، C توسط فرکانس نوسان تعیین می شوند. [1,2,3]

در لحظه جدا شدن سه فاز کلیدها، اندازه جریان به صفر می رسد و اضافه ولتاژ فاز به فاز (خط) بیش از اندازه بالا می رود که می تواند به عایق ترانسفورماتور آسیب برساند، و برای جلوگیری از این آسیب، بایستی حفاظت مناسبی را برای آن در نظر گرفت.

۳- مقدمه ای از یک مدل شبیه سازی شده

۳-۱- مطالعه بروی شبکه

شبکه برق ترانسفورماتور کوره قوس فولاد سازی در شکل ۳ نشان داده شده است. مدار RC در شکل ۳ در کنار ترانسفورماتور نصب نشده است، به همین دلیل توانایی دمپ موج های بلند اضافه ولتاژهای را ندارد.

۳-۲- مدل کلید خلاء

برای شبیه سازی دینامیک مدل کلید خلاء از برنامه شبیه ساز EMTP^۴ استفاده می کنیم، پارامترهای این مدل توسط دستگاه های اندازه گیری نصب شده بطور واقعی بدست آمده اند. به هر حال این مدل دارای پایداری استاتیک در جریان برشی و جریان های فرکانس بالا می باشد، دستگاه های اندازه گیری نشان می دهند که با باز شدن کامل کنتاکت ها، استقامت عایقی آنها به ۱۲۰KV می رسد. کنتاکت ها در ۶ ms با شیب^۵ ۲۰v/μs بسته می شوند، و شیب بحرانی خاموش کردن جریان در ۱۰۰A/μs تنظیم شده است.

۴- شبیه سازی قطع و وصل کلید خلاء

۴-۱- شبیه سازی وصل کلید خلاء

عملکرد ترانسفورماتور کوره در حالت بی باری قبل از شروع هر سیکل ذوب توسط کلید خلاء در شکل ۳ نشان داده شده است. همچنین نتیجه شبیه سازی جریان و ولتاژ فازها در شکل ۴ و نتیجه ولتاژهای فاز به فاز و جریان سیم پیچ ترانسفورماتور در شکل ۵ نشان داده شده است.

در شکل ۴ مشخص است که استقامت عایقی کنتاکت ها در لحظه بسته شدن در برابر ناپایداری ولتاژ و جریان بهتر از بخش ۲ می باشد. و همچنین ماکزیمم جریان در فاز ۲ به ۳۵۰۰A می رسد، که مقدار کمی از این جریان صرف ظرفیت کابل ها و مقدار زیادی از آن مسیر خود را از مدار RC می بندد. که در شکل ۵ نشان داده شده است. طبق شکل ۵ در لحظه بسته شدن کلید خلاء، ولتاژهای با فرکانس بالا بین فازهای سمت ثانویه کلید که تاثیر آن مستقیماً بر روی ترانسفورماتور کوره می باشد، قرار می گیرند. شکل ۴ و ۵ نتیجه شبیه سازی وضعیت بسته شدن کلید خلاء با وقوع اضافه ولتاژهای بالا در زمان جرقه مجدد که می تواند بروی عایق ترانسفورماتور فشار بیاورد را نشان می دهد. در ضمن گراف سبز رنگ در شکل ۴ و ۸ ولتاژ فاز A,B مربوط به مشخصه دی الکتریک قطع و وصل کلید خلا می باشد، که طبق روابط $U=A(t-topen)+B$ و $U=A(tclose-t)+B$ در لحظه قطع و وصل کلید شبیه سازی شده و در شکل ۶ و ۷ نشان داده شده است. $B=0$, $A=20 \text{ v}/\mu\text{s}$

۴-۲- شبیه سازی قطع کلید خلاء

برای شناخت اضافه ولتاژهای شدید زمان باز شدن کلید از یک مدل شبیه سازی استفاده کردیم که جریان مغناطیسی ترمینال های کلید خلاء ۲۰A و جریان برش نیز از رابطه ۲ حدود ۶A می باشد. [۶و۵] مدل شبیه سازی شده اضافه ولتاژهای شدید که در زمان باز شدن کلید خلاء رخ داده است در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است. شکل ۸ جریان

و ولتاژ فازها و شکل ۹ ولتاژهای فاز به فاز را نشان می دهد. بطوریکه کنتاکت های کلید به کندی از هم جدا می شوند و جریان در یک نقطه برش خورده و بعد از آن قوس خاموش می شود. در نتیجه ولتاژ بصورت ضربه ای با دامنه نوک تیز بالا می رود. زمانیکه این ولتاژ از استقامت عایقی فاصله خلاء بین قطب ها کلید تجاوز کند، جریان با فرکانس بالا مسیر باریکی را برای هدایت خود می بندد. در این لحظه جریان کاهش و ولتاژ افزایش می یابد، و این فرایند دوباره تکرار می گردد.

در شکل ۸ ولتاژ بین کنتاکت ها کلید در فاز ۳ به دامنه ماکزیمم ۸۵KV می رسد، در حالیکه استقامت عایقی بین کنتاکت ها در وضعیت کاملاً" باز ۱۲۰KV می باشد. که این امر نشان می دهد کلید خلاء در برابر اضافه ولتاژها دارای استقامت خوبی می باشد. همچنین در شکل ۸ ماکزیمم جریان به ۸۰۰A در فاز ۳ می رسد. این جریان در لحظه بسته شدن کلید خلاء مسیر خود را از مدار RC^۱ می بندد و به سیم پیچ های ترانسفورماتور نمی رسد. در این آزمایش اضافه ولتاژهای فاز به فاز دارای دامنه ای حدود ۱۱۸ KV می باشد که در شکل ۹ نشان داده شده است. بنابراین اضافه ولتاژهای خط نسبت به اضافه ولتاژهای فاز بسیار زیاد می باشند، که می توانند سبب آسیب جدی به عایق ترانسفورماتور گردند.

۵- روش حفاظت توسط مدار RC

۵-۱- عملکرد بدون مدار RC

در شکل ۳ عملکرد ترانسفورماتور کوره در یک پرپود کوتاه از زمان بدون مدار RC و برقریر نشان داده شده است، که ترانسفورماتور متحمل چندین وضعیت سخت کاری شده است. بررسی دقیق روی ترانسفورماتور کوره نشان داده که ضعف شدید عایقی نتیجه اضافه ولتاژهای زیاد می باشد. که نمونه شبیه سازی شده آن در شکل ۴ آمده است. با این وجود احتمال بروز چنین وضعیتی بسادگی با تکرار قطع کلید خلاء وجود دارد. شدت چنین اضافه ولتاژها به عوامل مختلفی در لحظه قطع از جمله وضعیت خلاء بین کنتاکت ها و ... بستگی دارد. [۷۶و۴]

در شکل ۹ اضافه ولتاژ در یک محدوده ای از فرکانس به ۱۱۸ KV می رسد. (شبکه ۳۳KV) اضافه ولتاژهای فاز به فاز در بسیاری موارد سبب قوس بین دوفاز کلید در داخل سلول نیز می گردند، که این قوس سبب بروز اتصال کوتاه دوفاز و قطع شبکه می گردد. این اضافه ولتاژها بدلیل پیشانی ضربه ای سبب بروز اتصال حلقه در سیم پیچ تب چنجر و کاهش سطح عایقی ترانس و طول عمر آن می شوند، افزایش ولتاژ و تکرار آن به مرور سبب کاهش سطح عایقی سرکابل ها و در نهایت شکست عایقی آنها می گردد.

^۱-Snubber circuit

۵-۲- عملکرد با مدار RC

جهت حفاظت تجهیزات در برابر چنین اضافه ولتاژهای شدیدی به یک مدار RC نیاز داریم، که این مدار RC بایستی کنار ترانسفورماتور کوره نصب گردد. که در شکل ۱۰ نمایش داده شده است.

طرح اساسی جهت تخلیه انرژی مغناطیسی ذخیره شده در سیم پیچ ترانسفورماتور، انتخاب ظرفیت خازنی Cs که ۳۵ درصد انرژی ذخیره شده در سیم پیچ را اصلاح می کند، از رابطه تقریبی زیر بدست می آید.

$$C_s = \frac{89.1 S_n I_{mag}}{U^2 f} \quad (۳)$$

توان نامی ترانس Sn بر حسب MVA، ولتاژ نامی شبکه U بر حسب KV، فرکانس شبکه F= 50 HZ

جریان مغناطیسی = درصدی از جریان نامی Imag

Cs در رنج ۰.۱ تا ۰.۳ میکروفاراد قرار دارد، که حد اولیه آن برای شیب صعودی ولتاژ در جهت اصلاح قوس استفاده می شود. خازن ها به تنهایی در کنترل اضافه ولتاژهای شدید در زمان قطع کلید ناتوان اند، که با استفاده از مقاومت سری Rs جبران می شود، که توسط این رابطه محاسبه می شود.

$$R_s \geq 2 \sqrt{\frac{L_c}{C}} \quad (۴)$$

مجموع اندوکتانس ها L_c ، مجموع ظرفیت خازنی کابل ها و خازن C_s ، رنج نرمال R_s نیز حدود چندین 10Ω می باشد. علاوه بر این برقگیرهایی را نیز می توان بروی فاز به فاز ترمینال های اولیه ترانسفورماتور نصب کرد. جریان و ولتاژ سه فاز، در زمان باز شدن کلید خلاء با استفاده از مدار RC که C_s و R_s آن طبق روابط ۳ و ۴ محاسبه شده اند در شکل ۱۱ و ولتاژهای فاز به فاز در شکل ۱۲ نمایش داده شده است. با قرار گرفتن مدار RC شکل ۱۱ نشان می دهد که ولتاژ عبوری کلید از سطح عایقی کنتاکت ها بیشتر نخواهد شد و دیگر ناپایداری جریان و در نتیجه برش جریان اتفاق نمی افتد. بنابراین مدار RC اضافه ولتاژها را محدود می کند. [۷ و ۸]

شکل ۱۲ نیز با قرار گرفتن مدار RC دامنه نرمال اضافه ولتاژهای فاز به فاز را نشان می دهد. در صورتیکه بدون مدار RC اضافه ولتاژهای فاز به فاز بسیار شدیدتر بودند. منحنی های شکل ۱۳ ثابت می کنند که با مدار RC احتمال اضافه ولتاژ شدید وجود ندارد، که می توان گفت اضافه ولتاژهای فاز به فاز در یک شبکه KV ۳۳ حد ماکزیمم آن تقریباً "۱.۶ برابر ولتاژ نامی می گردد، که نسبت به شکل ۱۰ بسیار کمتر می باشد. در نمونه ای که از اثر واقعی برش جریان در زمان اضافه ولتاژ که توسط دستگاه های اندازه گیری توان گرفته و بررسی شده است با انجام سویچینگ جریان با فرکانس بالا در یک فاز به دو برابر فازهای دیگر می رسد، که ناشی از ظرفیت خازنی اتصالات کابل ها است، که به جریان فرکانسی شبکه اضافه شده و سبب ایجاد فشار بروی یک نقطه می گردد و نهایتاً در آن نقطه جریان به صفر (برش

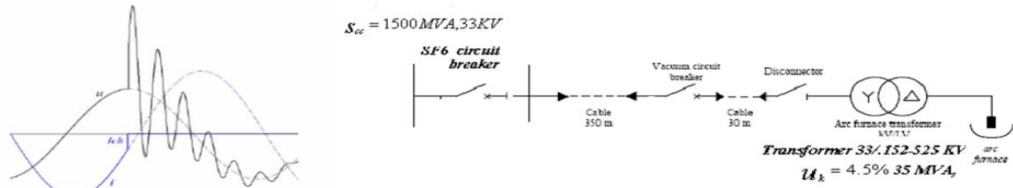
جریان) می رسد. که با باز شدن کلید خلاء اضافه ولتاژهای فاز به فاز بالایی رخ می دهد که این نوع ترانسفورماتور جهت بالا بردن سطح حفاظت و استقامت دی الکتریک به استفاده از برقگیر در همه فازها و بین فازها نیاز دارد. بنابراین ترکیب برقگیر و مدار RC حفاظت بسیار خوبی برای ترانسفورماتور کوره در برابر اضافه ولتاژها می باشد. شکل های ۱۳ و ۱۴ مقایسه بین استفاده از برقگیر بین فازها، فاز به زمین با کاربرد مدار RC و بدون استفاده از برقگیر می باشد که نشان می دهد ترکیب این تجهیزات باعث کاهش بیشتر دامنه ولتاژ در حدود چندین کیلو ولت می شود.

۶- نتایج

شبیه سازی اثبات می کند که ضعف شدید عایقی ترانسفورماتور کوره فولادسازی حاصل از اضافه ولتاژهای لحظه باز شدن کلید خلا می باشد. یک روش مناسب برای دمپ این اضافه ولتاژها و حفاظت در برابر اثر برش جریان استفاده از مدار RC در کنار ترانس کوره قوس بعلاوه برقگیر روی ثانویه ترانس اصلی و روی ترمینال های اولیه ترانس کوره قوس می باشد. با استفاده از چنین روش حفاظتی می توانیم انتظار وقعه های کمتری را برای کارخانجات فولاد سازی داشته باشیم.

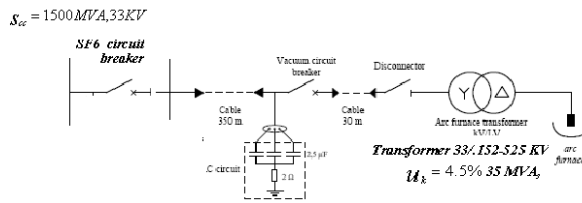
۷- مراجع

- [1] A. H. Moore, T. J. Blalock, "Extensive field measurements support new approach to protection of arc furnace transformers against switching transients", *IEEE Trans. on power apparatus and systems*, vol. 94, pp. 473-481, March 1975.
- [2] J. Kosmač, P. Žunko, "A statistical vacuum circuit breaker model for simulation of transient overvoltages", *IEEE Trans. On power delivery*, vol. 10, pp. 294-300, January 1995.
- [3] M. Popov, E. Archa, "Overvoltages due to switching off an unloaded transformer with a vacuum circuit breaker", *IEEE Trans. on power delivery*, vol. 14, pp. 1317-1326, October 1999
- [4] B. Gustavsen, —Validation of Frequency Dependent Transmission Line Models, *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 925-933, 2005
- [5] IEEE Std. C37.011, IEEE Application Guide for Transient Recovery Voltage for AC High-Voltage Circuit Breakers, 2005
- [6] IEEE Std. C37.06, IEEE Standard for AC High-Voltage Circuit Breakers Rated on a Symmetrical Current Basis – Preferred Ratings and Related Required Capabilities for Voltages above 1000 V, 2009.
- [7] [C High-V] IEEE Std. C37.04, IEEE Standard Rating Structure for Aoltage Circuit Breakers, 1999 (R2006).
- [8] J.D. Gibbs, D. Koch, P. Malkin, K.J. Cornick, "Comparison of performance of switching technologies on E Cigre motor simulation circuit", *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 4-3, July, 1989, pp.1745 –1750

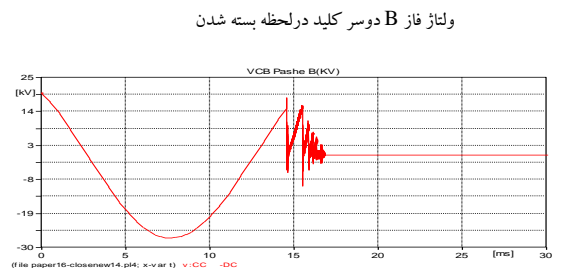
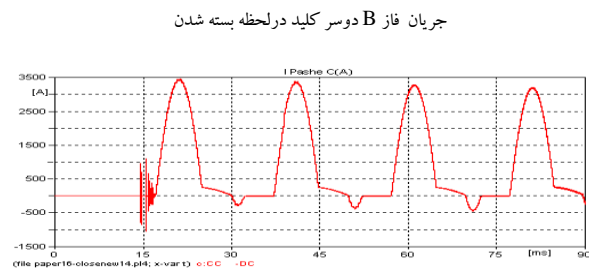
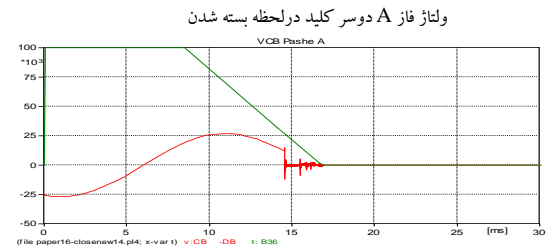
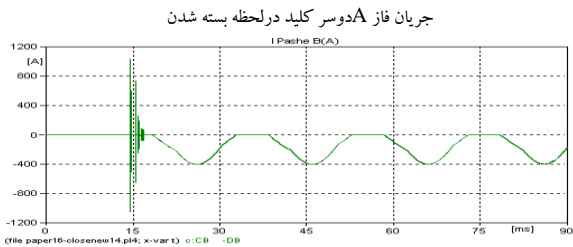
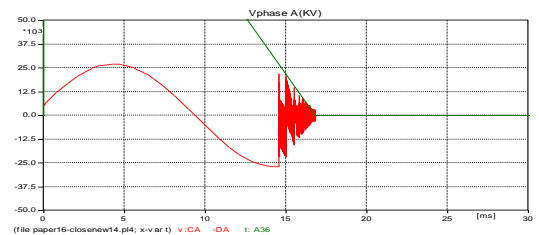
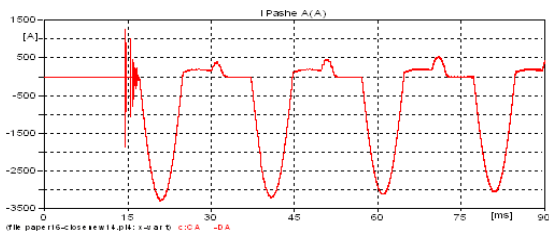


شکل ۱: قطع و وصل یک ترانسفورماتور کوره قوس الکتریکی

شکل ۲: برش جریان و اضافه ولتاژ سمت بار



شکل ۳: شبکه برق کوره قوس فولادسازی



جریان فاز A دوسر کلید در لحظه بسته شدن

ولتاژ فاز A دوسر کلید در لحظه بسته شدن

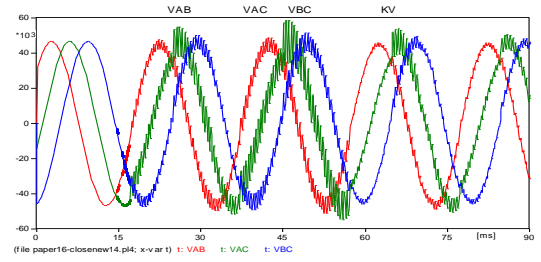
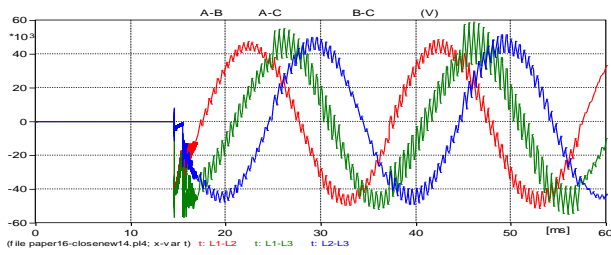
جریان فاز B دوسر کلید در لحظه بسته شدن

ولتاژ فاز B دوسر کلید در لحظه بسته شدن

جریان فاز C دوسر کلید در لحظه بسته شدن

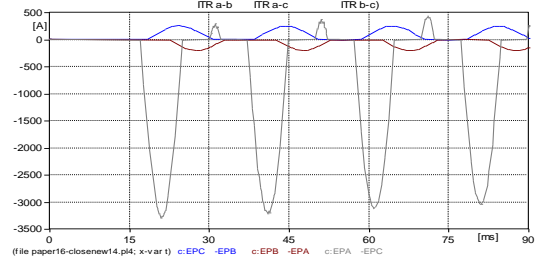
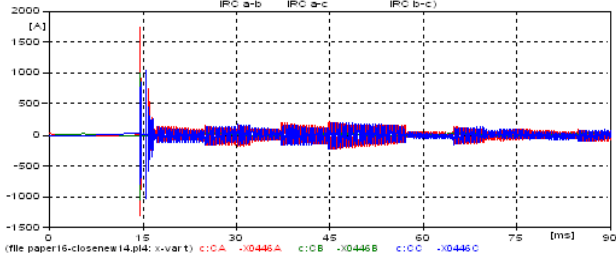
ولتاژ فاز C دوسر کلید در لحظه بسته شدن

شکل ۴: جریان و ولتاژ سه فاز کلید در لحظه بسته شدن [EMTP]



ولتاژهای خط سمت بار قبل وبعد از وصل کلید واضافه ولتاژهای فرکانس بالا

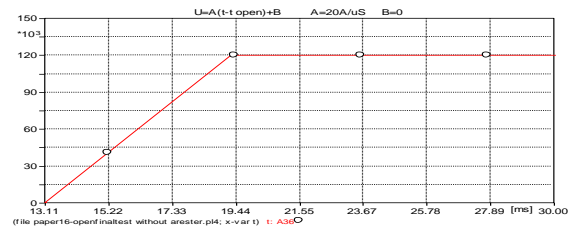
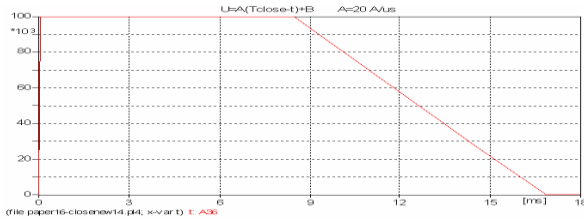
ولتاژهای خط سمت منبع قبل وبعد از وصل کلید واضافه ولتاژهای فرکانس بالا



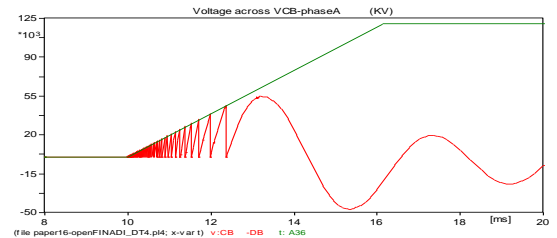
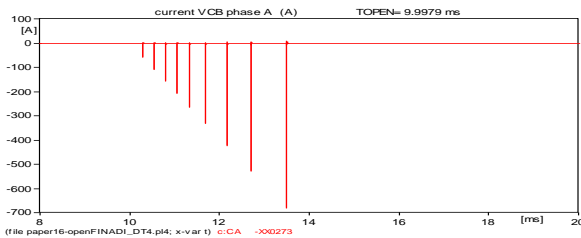
جریان های سه فازهای عبوری از مدار RC

جریان های هجومی ترانسفورماتور کوره هنگام وصل کلید

شکل ۵: ولتاژهای فاز به فاز و جریان ها در لحظه وصل کلید [EMTP]

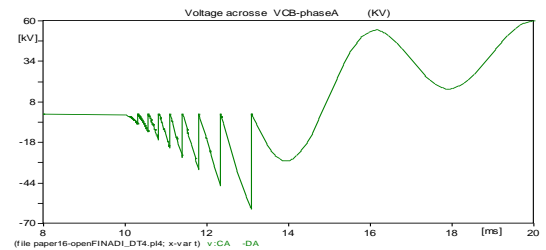
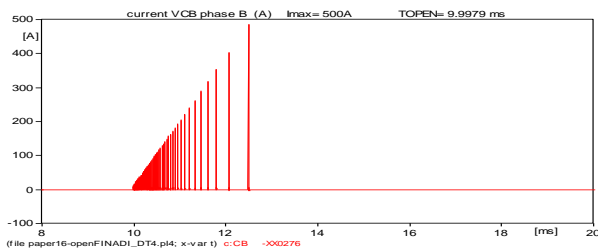


شکل ۶: منحنی مشخصه استقامت الکتریکی کلید خلا در لحظه وصل کلید خلا در لحظه وصل



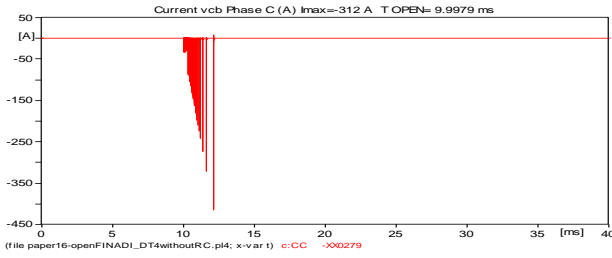
جریان فاز A لحظه باز شدن کلید

ولتاژ فاز A دوسر کلید در لحظه باز شدن

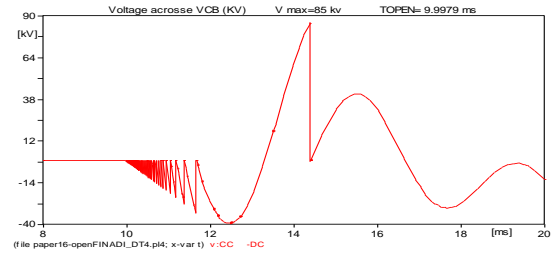


جریان فاز B در لحظه باز شدن کلید

ولتاژ فاز B دوسر کلید در لحظه باز شدن

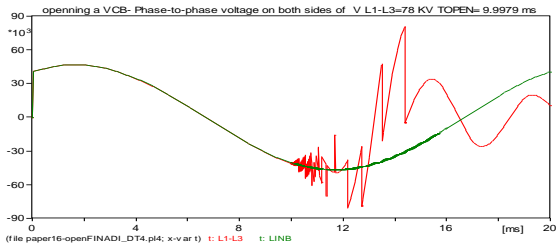


جریان فاز C در لحظه باز شدن کلید

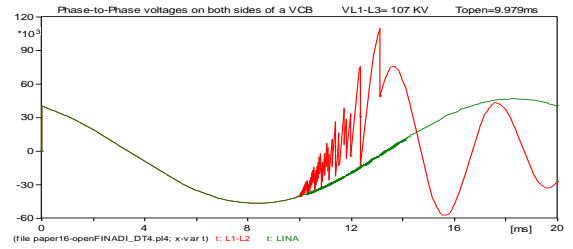


ولتاژ فاز C دوسر کلید در لحظه باز شدن

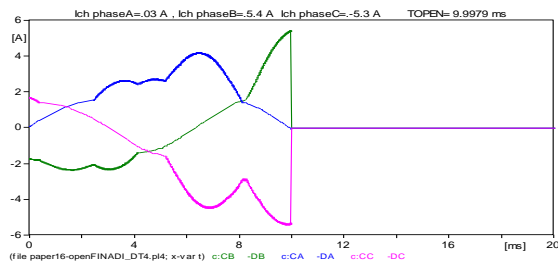
شکل ۸: ولتاژ و جریان فاز در لحظه قطع کلید بدون مدار RC [EMTP]



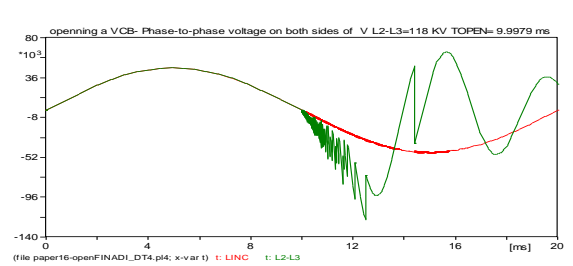
ولتاژ خط AC دوسر کلید در لحظه قطع



ولتاژ خط AB دوسر کلید در لحظه قطع

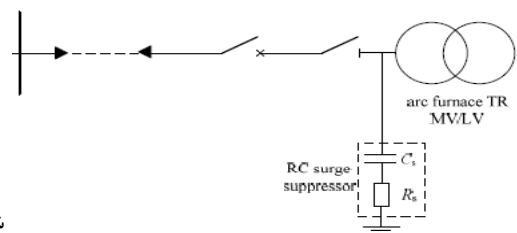


جریان قطع ترانسفورماتور سه فاز بدون مدار RC

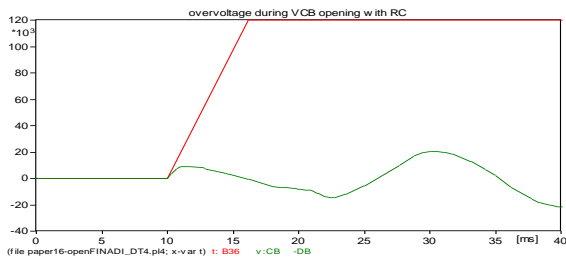


ولتاژ خط BC دوسر کلید در لحظه قطع

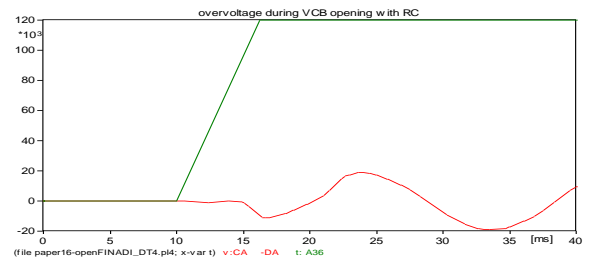
شکل ۹: ولتاژهای خط دو سر کلید بدون مدار RC [EMTP]



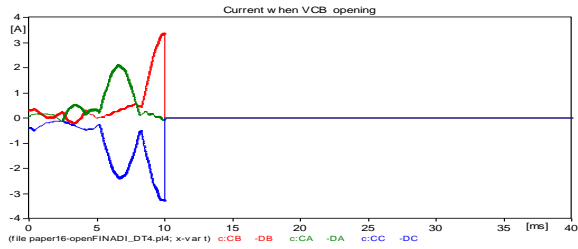
شکل ۱۰: شبکه برق با مدار RC



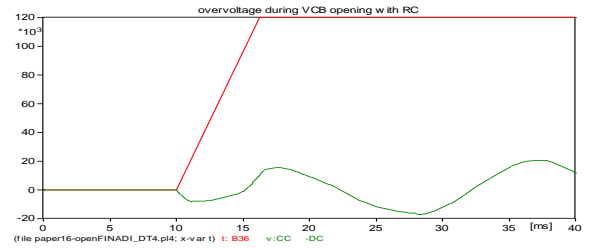
اضافه ولتاژ دوسر کلید در لحظه باز شدن با مدار RC در فاز B



اضافه ولتاژ دوسر کلید در لحظه باز شدن با مدار RC در فاز A

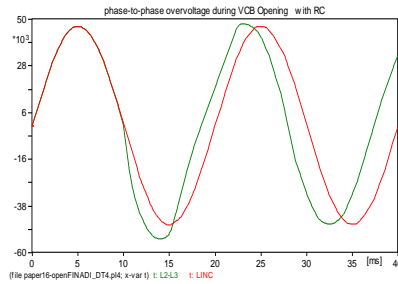


جریان های سه فاز قطع ترانسفورماتور با مدار RC

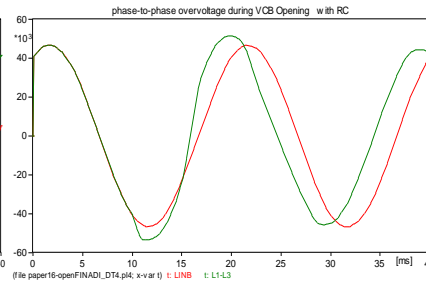


اضافه ولتاژ دوسر کلید در لحظه باز شدن با مدار RC در فاز C

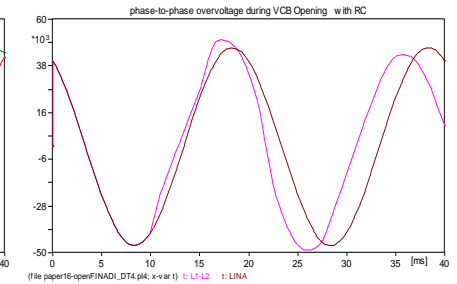
شکل ۱۱: ولتاژ دوسر کلید در لحظه باز شدن و جریان قطع ترانسفورماتور با مدار RC [EMTP]



ولتاژ خط BC دوسر کلید در لحظه قطع با مدار RC

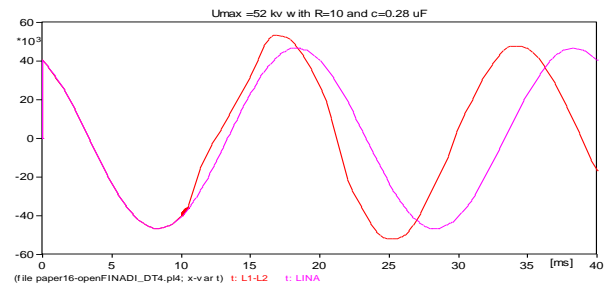
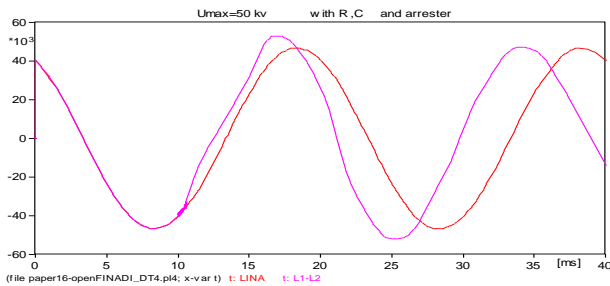


ولتاژ خط AC دوسر کلید در لحظه قطع با مدار RC



ولتاژ خط AB دوسر کلید در لحظه قطع با مدار RC

شکل ۱۲: ولتاژهای خط دو سر کلید با مدار RC [EMTP]



شکل ۱۳: اضافه ولتاژهای فاز به فاز با استفاده از مدار RC [EMTP] شکل ۱۴: اضافه ولتاژهای فاز به فاز با استفاده از مدار RC و برقیگیر