

СТУДИСКИ КОМИТЕТ 13: СКЛОПНИ АПАРАТИ

СТРУЧЕН ИЗВЕСТИТУВАЧ : Јордан Измирлиев , Електро-Скопје

ИЗВЕШТАЈ НА СТРУЧНИОТ ИЗВЕСТУВАЧ

За второто Советување на МАКО СИГРЕ во Студискиот Комитет 13, пристигнаа вкупно 4 труда и истите се класифицирани како реферати.

P13-01. *М-р Марјан Појов , Д-р Миџо Злајаноски:* ДИГИТАЛНА СИМУЛАЦИЈА НА ПРЕОДНИТЕ ПОЈАВИ ПРИ ИСКЛУЧУВАЊЕ НА МАЛИ ИНДУКТИВНИ СТРУИ СО ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ .

Во рефератот е изложен математички модел на вакуумски прекинувач, при исклучување на мали индуктивни струи.

Математичкиот модел на вакуумскиот прекинувач ги зема предвид неговите карактеристики, кои битно влијаат врз текот на споменатиот процес, и тоа:

- статистичка промена на струјата на отсечување;
- веројатност за прекинување на високофреквентна струја;
- пробојна карактеристика на вакуумска комора;
- брзина на отворање на контракти;

Овој математички модел овозможува анализа на процесот прекинување на мали индуктивни струи со вакуумски прекинувач при познати модели на мрежата.

Можат да се анализираат различни конфигурации на оптоварување, со цел да се превземат соодветни мерки за намалување нивото на пренапони кои ја оптоваруваат и стареат изолацијата на опремата.

Прашање за дискусија:

1. Какви се практичните искуства од примената на овој модел во реални електрични кола?

P13-02. *М-р Марјан Појов :* ИСКЛУЧУВАЊЕ НА ТРАНСФОРМАТОР ВО ПРАЗЕН ОД СО ПОМОШ НА ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ .

Во рефератот е извршена анализа на прекинување трансформатор во празен од со вакуумски прекинувач, користејќи го математичкиот модел на вакуумскиот прекинувач и програмот ЕМТП (Електро-Магнетен-Транзиентен-Програм).

Како резултат на анализата е истакната потребата од вградување на РС-елемент на страната од трансформаторот, кој го намалува нивото на пренапони, и правилното димензионирање на РС-елементот.

Прашање за дискусија:

1. Каква е разликата на анализата при исклучување на трансформатор во празен од за еднофазно и трифазно електрично коло?

P13-03. *М-р Драго Шајноски , Ацо Јанкулоски , Драѓе Голабоски* : КРИТЕРИУМ И КОНТРОЛА ЗА ЕДНОВРЕМЕНОСТ КАЈ ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧИ ПРИ ПРЕКИНУВАЊЕ НА КОНДЕНЗАТОРСКА БАТЕРИЈА.

Во рефератот е нагласена потребата од критериум за едновременост на контактите од вакуумските прекинувачи, при прекинување на кондензаторска батерија.

Потребата е поткрепена со резултатите од математичката анализа на процесот на прекинување, со земање предвид карактеристиките на вакуумските комори од една страна и влијанието на мрежата од друга страна.

Практичното реализирање на овој критериум го намалува нивото на пренапони кои се јавуваат при прекинување на електрично коло со кондензаторска батерија.

Прашање за дискусија:

1. Какви се практичните искуства од спроведена контрола на едновременоста, во реални случаи на прекинување кондензаторска батерија со вакуумски прекинувач?

P13-04 . *Милојче Милковски , Д-р Пејтар Вукеља , Радомир Наумов , Мишко Вуќиниќ* : ПРЕОДНИ ПОЈАВИ ПРИ МАНИПУЛАЦИЈА СО ПРЕКИНУВАЧИТЕ НА КОНДЕНЗАТОРСКИТЕ БАТЕРИИ.

Во рефератот се анализираат измерени вредности на напони и струи во реални електрични кола на вклучување и исклучување кондензаторска батерија.

Со тоа се дава придонес за добивање реална слика за текот на преодните процеси што се јавуваат во споменатите електрични кола.

Тоа е добра основа да се споредат одредени техники на прекинување кои даваат подобри резултати при вклучување и исклучување на електрично коло со кондензаторска батерија. Освен тоа овие резултати можат да се искористат за подобрување на одредени карактеристики на прекинувачите.

Прашање за дискусија:

1. Какви се сознанијата од мерењата на преодните процеси при вклучување на проста и сложена кондензаторска батерија со вакуумски прекинувач?

м-р Марјан Попов, дипл. инж.
д-р Мито Златаноски, дипл. инж.
Електротехнички факултет - Скопје

ДИГИТАЛНА СИМУЛАЦИЈА НА ПРЕОДНИ ПОЈАВИ ПРИ ИСКЛУЧУВАЊЕ НА МАЛИ ИНДУКТИВНИ СТРУИ СО ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ

РЕЗИМЕ

Во трудот е анализирана појавата на исклучување на мали индуктивни струи со уважување на повторното палење на електричниот лак кое е можно кога контактите се отвораат пред поминување на струјата низ нула. Со користење на развиен модел на вакуумски прекинувач кој ги зема предвид статистичката промена на струјата на отсекување, брзината на отворање на контактите, веројатноста за гасење на електричен лак како и пробојната карактеристика на конкретен вакуумски прекинувач извршена е симулација на преодните големини при исклучување на асинхрон мотор во залет.

Клучни зборови: вакуумски прекинувач, електричен лак, повратен пренапон

SUMMARY

In this paper the phenomena of switching off low inductive currents is analysed by taking into account the multiple restrikes of the electric arc which is possible when the contacts open shortly before current zero. By means of developed vacuum breaker model that considers the statistical variation of chopping current, speed of contact opening, probability of arc quenching as well as the withstand characteristic of an actual vacuum breaker, simulation of the switching off an induction motor at the start up has been performed.

Key words: vacuum circuit breaker, electric arc, recovery overvoltage

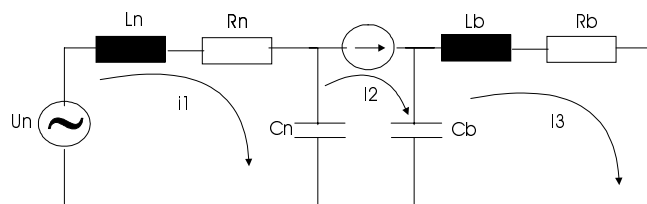
1. ВОВЕД

Како и секој расклопен уред така и вакуумскиот прекинувач покажува одредени недостатоци при исклучување на мали индуктивни и капацитивни струи. Појавата на отсекување на струјата која е можна во случај на исклучување на мали индуктивни струи, може да предизвика високи пренапони кои се штетни како за прекинувачот така и за околната опрема. Големо значење при исклучувањето на индуктивните оптоварувања е моментот на отворање на контактите на

прекинувачот. Во случај кога контактите отвораат пред поминување на струјата низ нулта вредност доволно е само многу мал напон на контактите од прекинувачот за да се предизвика повторно палење на електричниот лак. Во моментот на повторно палење струјата низ прекинувачот се состои од две компоненти и тоа: високофреквентна струја чија фреквенција се совпаѓа со сопствената фреквенција на колото и струја со фреквенција од 50 Hz. Секое повторно палење се појавува во моментот кога напонот на контактите од прекинувачот е поголем од диелектричната цврстина на меѓуконтактното растојание. Карактеристичен проблем се појавува при исклучување на електромотор во залет поврзан за прекинувачот преку кабел. Во овој труд посебно внимание е дадено на симулација на повратните напони како и струјата на лакот, со моделот на вакуумски прекинувач.

2. АНАЛИТИЧКА ПРЕСМЕТКА НА ПРЕОДНИТЕ ПОЈАВИ

При исклучување на мали индуктивни струи доаѓа до појава на електричен лак при што струјата продолжува да тече до првото поминување низ нулта вредност. При некоја вредност на струјата истата многу брзо опаѓа кон нула. Таа вредност на струјата при која што практично доаѓа до моментално отсекување се нарекува *струја на отсекување*. Стрмината на струјата при нејзиното отсекување изнесува 10^8 A/s и повеќе, и како резултат на оваа вредност доаѓа до појава на многу високи пренапони. За да се пресмета вредноста на овие пренапони потребно е да се состави систем на диференцијални равенки. На сл. 1 е претставена еквивалентна шема за аналитичка пресметка на преодните појави која може да се искористи за анализа на неоптоварени трансформатори и мотори. Страната на изворот се состои од генератор сериски поврзан со индуктивитет и отпор како и капацитет. Овие елементи претставуваат еквивалент за сите трансформатори и собирници кои се поврзани за вакуумскиот прекинувач. Параметрите на страната на оптоварувањето претставуваат еквивалент за оптоварувањето и водот (кабелот) преку кој е поврзано оптоварувањето со прекинувачот.



Сл.1 Еквивалентна шема за анализа на преодни појави

Бидејќи анализираме исклучување на мали индуктивни струи според [8], струјата низ прекинувачот по отворање на контактите може да ја замениме со струен генератор со вредност:

$$i = I_{ch} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

каде I_{ch} е вредност на струја на отсекување додека τ е временска константа на пригушување. За многу мали вредности на τ можеме да претпоставиме идеален прекинувач. Со употреба на Кирхововите закони може да се постават следните равенки за страната на оптоварување и изворот:

$$L_n C_n \frac{d^2 u_s}{dt^2} + R_n C_n \frac{du_s}{dt} + u_s = u_n - R_n i_2 - L_n \frac{di_2}{dt} \quad (2)$$

$$L_b C_b \frac{d^2 u_b}{dt^2} + R_b C_b \frac{du_b}{dt} + u_b = R_b i_2 + L_b \frac{di_2}{dt} \quad (3)$$

каде u_s и u_b се напоните на кондензаторите на страната на изворот и оптоварувањето респективно, а u_n е напон на напонскиот генератор. Со решавање на овие равенки може да се пресметаат напоните на страната на изворот и оптоварувањето, како и напонот на прекинувачот. Ваквиот начин на пресметка не ги зема предвид повторните палења кои е можно да се појават при исклучување на мали индуктивни струи, иако резултатите за пресметаните повратни напони може да се сметаат дека се со задоволителна точност. Повторното палење може да се пресмета аналитички како што е тоа прикажано во [9]. Ако земеме предвид дека моделите на останатите елементи во колото се доста сложени, тогаш со сигурност може да се каже дека аналитичката пресметка би била доста тешка и е неопходно да се примени некое од познатите орудија за симулација како што се АТР-ЕМТР, НЕТОМАС итн.

3. ЕФЕКТ НА СТРУЈАТА НА ОТСЕЧУВАЊЕ И ПОВТОРНОТО ПАЛЕЊЕ НА ЛАКОТ

За вакуумскиот прекинувач е познато дека полната диелектрична цврстина се воспоставува за многу кратко време (3-4 μs), па затоа повторното палење на електричниот лак претежно зависи од брзината на отворање на контактите. Кога контактите на прекинувачот отвораат околу нулта вредност на струјата, поради малото растојание помеѓу контактите потребно е да постои многу мал напон на прекинувачот за да се појави повторно палење. Повторното гасење на електричниот лак доаѓа доколку се исполнети следните услови:

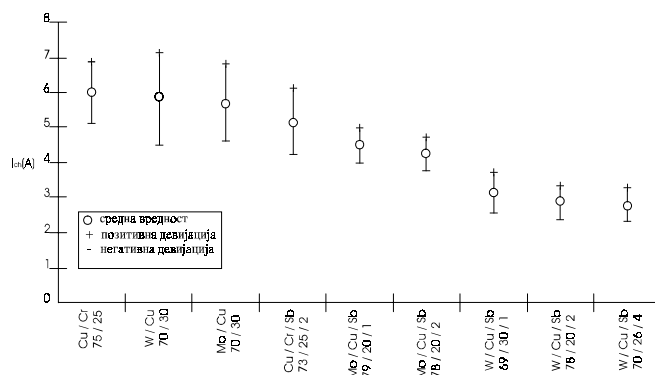
1. стрмнината на високофреквентната струјата во околина на нулата (current zero) е помала од критичната стрмнина на високофреквентната струја ($\left. \frac{di}{dt} \right|_{i=0} < B$),
2. амплитудата на високофреквентната струја е помала од струјата на отсекување при високи фреквенции.

Веројатноста за гасење на електричниот лак според [1,2]:

$$\begin{aligned} p &= 1 && \left| \frac{di}{dt} \right| \leq B \\ p &= 2 - \frac{|di/dt|}{B} && B < \left| \frac{di}{dt} \right| < 2B \\ p &= 0 && \left| \frac{di}{dt} \right| \geq 2B \end{aligned} \quad (4)$$

Равенката (4) покажува дека во случај кога стрмнината на струјата е помала од однапред дефинирано ниво кое во нашиов случај изнесува $B=75 \text{ A}/\mu\text{s}$ [8, 10] тогаш лакот сигурно се гаси. Ако стрмнината е поголема од $75 \text{ A}/\mu\text{s}$ и помала од $150 \text{ A}/\mu\text{s}$ тогаш веројатноста прима одредена вредност помеѓу 0 и 1. И третиот случај, кога стрмнината на високофреквентната струја е поголема од $150 \text{ A}/\mu\text{s}$ во тој случај веројатноста е нула и лакот гори. Големината на струјата на отсекување зависи од

видот на контактите на прекинувачот. На сл.2 даден е дијаграм од кој може да се види дека за различен материјал на контактите струјата на отсечување има различни вредности која се менува во одредени граници [14].



Сл 2 Зависност на отсечената струја од видот на контактниот материјал

За струи на оптоварување помеѓу 45 и 170 А струјата на отсечување се пресметува според следниот израз:

$$i_{ch} = a - bI - c \log Z_N \quad (5)$$

каде a, b и c се константи кои зависат од материјалот од кои се изработени контактите на прекинувачот. За прекинувач со Cu-Cr контакти вредностите на константите се: $a = 12$ А, $b = 0.015$ и $c = 1.8$ А. $Z_N = \sqrt{L/C}$ претставува импеданса на мрежата каде што L е еквивалентна индуктивност а C капацитивност на разгледуваниот систем.

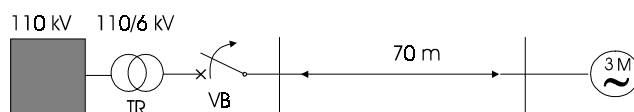
Вредноста на оваа импеданса се движи помеѓу 60 Ω и 20к Ω . Исто така при пресметка на струјата на отсечување земена е предвид статистичка промена на средната вредност со стандардна девијација од 15%.

Прекинувачот е контролиран со посебен подпрограм напишан во програмскиот јазик MODELS кој што ги зема предвид погоре опишаните својства на вакуумскиот прекинувач. Во секој временски чекор се пресметува отпорноста на лакот користејќи ја волт-амперската карактеристика на лакот. Во моментот кога лакот се гаси отпорноста на лакот се пресметува според карактеристика на пропратна струја (post-zero current). Оваа струја се состои од две компоненти и тоа: струја на заостанатите јони кои по гасењето на лакот се движат под дејство на силата на електричното поле кое владее помеѓу контактите од прекинувачот, и втората компонента е таканаречена струја на поместување кое се јавува поради самото постоење на одредена капацитивност помеѓу контактите од прекинувачот. Поради малата вредност на пропратната струјата отпорноста на лакот добива многу висока вредност.

3. ДИГИТАЛНА СИМУЛАЦИЈА НА КОНКРЕТЕН ПРИМЕР

Во претходното поглавје беше споменато дека доста неповолен случај на исклучување со вакуумски прекинувач е кога се исклучува асинхрон електромотор преку кабел. Ваков случај е претставен на сл. 3 при што се набљудувани струјата на оптоварување по исклучувањето на прекинувачот, како и промената на напоните во мрежата. Во овој случај моделирањето на останатите елементи од мрежата е дадено со помош на поедноставени модели кои се во составот на АТР-ЕМТР, така што

претежно внимание е посветено на моделот на прекинувачот. Системот од сл. 3 се состои од 110 kV мрежа која е претставено со директната и нултата еквивалентна импеданса.



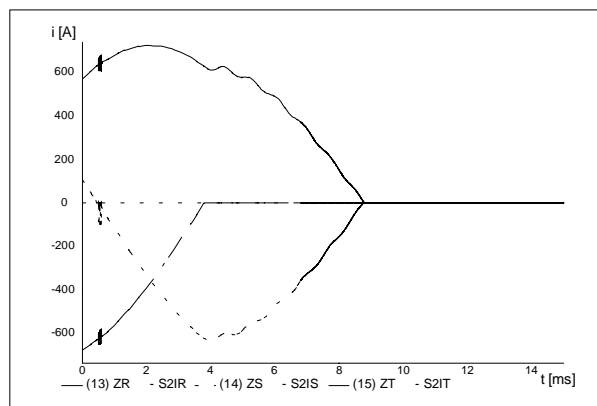
Сл. 3 Исклучување на индуктивно оптоварување

Трансформаторот 110 / 6 kV, 20 MVA е пресметан со програмот BSTRAN при што се определени неговите сопствените и меѓусебните импеданси. При пресметката на трансформаторот поради недостаток на информации не е земено предвид заситувањето на магнетното коло на трансформаторот.

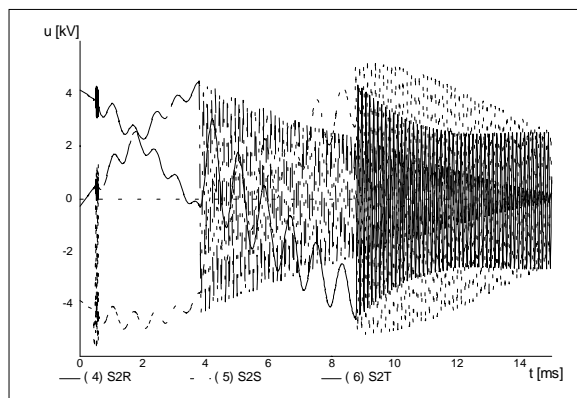
Параметрите на кабелот се пресметани со CABEL CONSTANTS, и истиот е претставен со T шема. Асинхрониот електромотор со моќност 1.5 MW е поврзан преку кабел со должина 70 m.

На сл. 4 се претставени струите низ прекинувачот по отворање на контактите на прекинувачот при што може да се види дека за конкретниот пример при прво поминување на струјата низ нула (фаза S) доаѓа до појава на краткотрајно повторно палење и неуспешно гасење на електричниот лак. Струјата на лакот се гаси во наредната нула. Од сл. 4 може да се забележи дека при појавата на повторно палење краткотрајната високофреквентна струја на повторно палење од фаза S се суперпонира со струите од другите две фази. Ова се случува поради тоа што постои меѓусебна индуктивност помеѓу фазите при што доаѓа до индуцирање на високофреквентна струја од фазата S во останатите две фази. Зависно од параметрите на колото можно е оваа високофреквентна струја да биде поголема од моменталната вредност на струите на оптоварување во другите две фази.

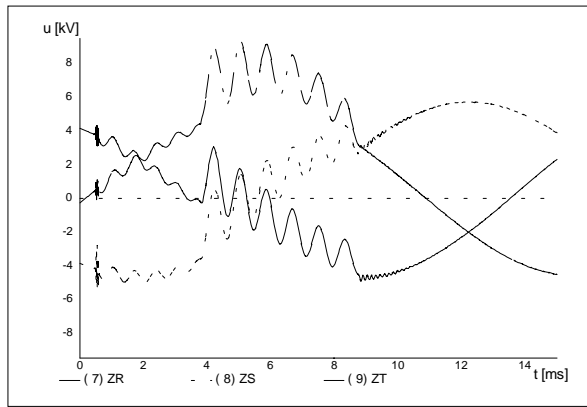
Во тој случај доаѓа до принудно отсечување на струјата на оптоварување во другите фази. Ваквата појава е позната како *виртуелно отсечување на струјата* и е доста опасна. Високата амплитуда на отсечената струја, како и нејзината стрмнина придонесува за ескалација на напонот во широки размери. Ескалација на напонот е можно и кога не постои виртуелно отсечување на струјата како што е тоа покажано во нашиот пример. Од сл. 4 до 7 може да се види дека поради повторното палење во фазата S доаѓа до ескалација на напоните во сите фази. Конкретно за фазата S ова е по прегледно претставено на сл.8 и 9.



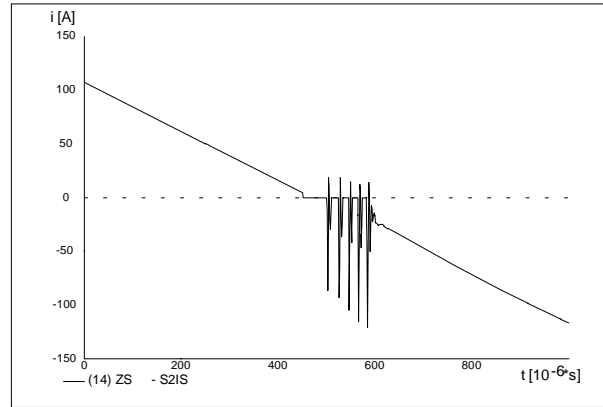
Сл. 4 Струи низ прекинувачот по отворање на контактите на прекинувачот



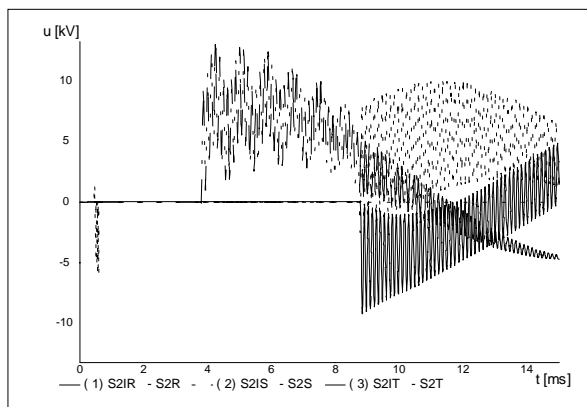
Сл. 5 Промена на напоните на страната на оптоварување по отворање на контактите на прекинувачот



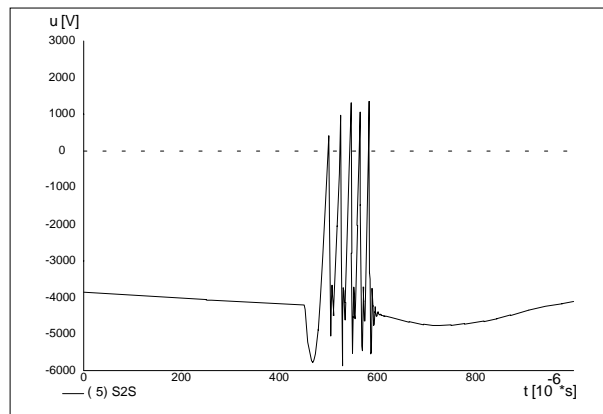
Сл. 6 Напони на страната на изворот (нисконапонска страна на трансформатор)



Сл. 8 Повторно палење на електричниот лак при првото поминување низ нула на струјата во фазата S



Сл. 7 Промена на напоните на прекинувачот по отворање на контактите



Сл. 9 Ескалација на напонот во фазата S при повторно палење на електричниот лак

4. ЗАКЛУЧОК

Во трудот е реализирана дигитална симулација на исклучување на мали индуктивни струи. За таа цел е искористен моделот на вакуумски прекинувач [12]. Од реализираните симулации може да се заклучи дека:

1. моделот дава реална слика на повторни палења кои може да се појават при отворање на контактите на прекинувачот во околина на нултата вредност на струјата (анг. current zero),
2. резултатите добиени со овој модел се во добра согласност со мерените резултати на Карнецки-Линдмајер, како и на претходно реализирани дигитални модели што укажува на точноста на самиот модел,
3. постои можност за реализирање на модел за друго напонско ниво доколку се познати карактеристиките на прекинувачот за тоа напонско ниво (статистичката промена на струјата на отсекување, пробојната карактеристика на прекинувачот, критичната стрмина на струјата при високи фреквенции, како и брзината на отворање на контактите),

4. посебно критичен случај претставува исклучување на индуктивни оптоварувања и тоа електромотор во залет, трансформатор во празен од и реактор. Во овој случај појавата на повторно палење можно е да доведе до појава на виртуелно отсечување на струјата кое предизвикува големи пренапони.
5. ATP-EMTP и MODELS строго се препорачува како совршено орудие за анализа на ваквите феномени во секоја студија на прекинувачи.

5. ЛИТЕРАТУРА

1. Kosmac J., Zunko P.: A statistical vacuum circuit breaker for simulation of transient overvoltages, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 294-300.
2. Czarniecki L., Lindmayer M.: Measurement and statistical simulation of virtual current chopping in vacuum switches, *XI-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Berlin, GDR, September 1984.
3. Legros W., Salvador W., Bassleer D.: Vacuum circuit breaker modelling at interruption of small inductive currents, *EMTP closed meeting*, October 17-18, 1988, Leuven.
4. Helmer J., Lindmayer M.: Mathematical modelling of the High Frequency Behaviour of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems, *XVII-th Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum*, Berkeley, California, USA, July 21 - 26, 1996, pp. 1-8.
5. Glinkowski M., Gutierrez M., Braun D.: Voltage Escalation and Reignition Behaviour of Vacuum Generator Circuit Breakers During Load Shedding, *IEEE/PES summer meeting*, Denver, July 28 - August 1, 1996, 96 SM 402-8 PWRD.
6. Meyer W.S., Liu T.H.: *ATP Rule Book*, BPA Portland, Oregon, USA, 1992.
7. Gibbs J.D., Cornick K.J.: Comparison of Performances of Switching Technologies on a CIGRE Motor Simulation Circuit, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol.4, No.3, July 1989, pp. 1745-1750.
8. Kosmac J., Zunko P.: Switching off Small Inductive Currents with Vacuum Circuit Breaker, *2-nd Electrotechnical and computer science conference ERK 93*, Portoroz, Slovenia, September 1993, pp. 395 - 398.
9. Ma Z.: *Reactor current switching with gas blast circuit breakers*, Ph.D. thesis, Stafford University, March 1996.
10. Popov M., Zlatanovski M., Kosmac J.: An analysis of transient phenomena due to switching off low inductive currents with a vacuum circuit breaker, *UPEC 97*, Manchester, United Kingdom, 1997.
11. Panek J., Fehrle K.G.: Overvoltage phenomena associated with virtual current chopping in three phase circuit, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-94, no. 4, July/August 1975, pp. 1317-1325.
12. Попов М.: *Моделирање на електричен лак кај SF6 и вакуумски прекинувачи за анализа на преодниите појави при исклучување на различни оптоварувања, магистерски труд*, Електротехнички факултет - Скопје, 1998 г.
13. Greenwood A., Glinkowski M.: Voltage escalation in vacuum switching operation, *IEEE/PES, Summer meeting*, San Francisco, July 12 - 17, 1987, 87 SM 581-2.
14. Maller V.N., Naidu M.S: *Advances in high voltage insulation and arc interruption in SF6 and vacuum*, Pergamon Press, 1981.

м-р Марјан Попов, дипл. инж.
Електротехнички факултет - Скопје

ИСКЛУЧУВАЊЕ НА ТРАНСФОРМАТОР ВО ПРАЗЕН ОД СО ПОМОШ НА ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ

РЕЗИМЕ

Кога вакуумски прекинувач се употребува за исклучување на неоптоварен трансформатор можна е појава на многу високи пренапони на секундарната страна од трансформаторот. Појавата на отсечување на струјата и повеќекратното повторно палење по отворање на контактите на прекинувачот, пред поминување на струјата низ нула, претставува главна причина за генерирање на овие пренапони. Исто така, таканареченото виртуелно отсечување на струјата има големо влијание врз појавата на високи преодни напони, што исто така доведува до брзо палење и гасење на лакот во прекинувачот.

Во овој труд е извршено дигитално моделирање на вакуумски прекинувач вклучен во ЕМТП (Електро-Магнетен-Транзиентен-Програм). Извршено е симулирање на пренапоните поради исклучување на прекинувачот. Исто така даден е еден начин за можно елиминирање на пренапоните и повторните палења.

Клучни зборови: вакуумски прекинувач, трансформатор, пренапон, струја на отсечување, повторно палење

SUMMARY

When a vacuum breaker is used to disconnect an unloaded transformer, high overvoltages may result on the secondary side. The phenomena of current chopping and multiple reignitions after contact opening, shortly before current zero, play a significant role in generating these overvoltages. Furthermore, the transient recovery voltage is also influenced by virtual current chopping which may lead to fast interruptions and reignitions. The paper reports on a vacuum breaker model implemented in the EMTP. Simulations have been performed to determine overvoltages generated by the vacuum breaker, possible voltage suppression and reignition.

Key words: vacuum circuit breaker, transformer, overvoltage, chopping current, reignition

1 ВОВЕД

Искуството покажува дека трансформаторите се изложени на многу високи пренапони кога се исклучуваат со помош на вакуумски прекинувач, како и при појава на повторни палења во прекинувачот. Во претходната работа [5], е покажано

дека поради повторното палење во вакуумски прекинувач можна е ескалација на напонот кога вакуумскиот прекинувач се користи како генераторски. Оптоварени трансформатори за заварување како и трансформаторите во празен од се исто така предмет на генерирање на високи напони поради повторното палење на лакот во прекинувачот [11].

Способноста за отсечување на струјата поради нестабилно горење на лакот во околина на 'природната нула' (анг. current zero), како и виртуелното отсечување на струјата кое може да се појави при исклучување на трифазно оптоварување, доведува до многу големи пренапони кои може да предизвикаат оштетување на трансформаторските намотки. Причина за ова е што магнетната енергија во трансформаторот по отсечувањето на струјата се претвара во електростатичка енергија на капацитивноста на трансформаторот. Со изедначување на магнетната со електростатичката енергија, и занемарување на пригушувањето, напонот на краевите од трансформаторот има вредност:

$$u = I_{ch} \cdot \sqrt{\frac{L_m}{C}} \quad (1)$$

каде L_m претставува индуктивност на магнетното коло на трансформаторот, C капацитивност на трансформаторот и I_{ch} е струја на отсечување. Според (1) може да се види дека генерираниот пренапон зависи од струјата на отсечување и карактеристичната импеданса на трансформаторот која може да биде многу висока поради ниската вредност на капацитивноста. Ако дојде до повторно палење на лакот во една фаза, високофреквентна струја протекува низ другите полови од прекинувачот (сл.1), што исто така е пропратено со ескалација на напонот (сл.2).

Ова може да предизвика форсирано отсечување на струјата во останатите два пола, што се случува кога струјата на повторно палење во полот кој веќе исклучил, е поголема од моменталната струја на оптоварување (во другиот пол кој се уште не исклучил) и е спротивна во поларитет. Овој механизам познат како виртуелно отсечување на струјата може да предизвика повторно палење во другите две фази кај кои сеуште нема постигнато природна нула, и поради високите струи на отсечување можни се многу високи пренапони.

2 МОДЕЛ НА ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ

За да се симулираат појавите кои се појавуваат при исклучување на вакуумски прекинувач неопходно е да се земе предвид статистичките својства на вакуумскиот прекинувач:

- струјата на отсечување,
- диелектричната цврстина на меѓуконтактното растојание,
- способноста на гасење на лакот при високи фреквенции (повторни палења на лакот).

Вакуумскиот прекинувач може да се моделира доколку лакот се претстави како нелинеарен отпорник како што е тоа направено во литература [1, 6, 8]. Друга можност е прекинувачот да се претстави [4, 5, 14] со помош на идеален прекинувач како на сл. 3, кој отвора и затвора кога напонот на контактите е помал или поголем од диелектричната цврстина на меѓуконтактното растојание на прекинувачот. Поради случајната промена на нивото на струјата на отсечување нејзината вредност е доста тешко да се определи. Така, во литература [1] употребен е израз за

пресметување на струјата на отсечување кој важи за струи на оптоварување помеѓу 45 A и 170A. Овде средната вредност на струјата на отсечување се пресметува според [4, 14]:

$$\bar{I}_{ch} = (2 \cdot \pi \cdot f \cdot \bar{i} \cdot \alpha \cdot \beta)^q \quad (2)$$

f - фреквенција на мрежата (50 Hz),
 i - амплитуда на струја на оптоварување,
 $\alpha = 6.2 \cdot 10^{-16}$ s, $\beta = 14.3$, $q = -0.07512$

Диелектричната цврстина се претпоставува дека е линеарно зависна од меѓуконтактното растојание:

$$U_d = E_{kr} \cdot v \cdot t \quad (3)$$

каде:

E_{kr} - критично електрично поле помеѓу контактите,
 v - брзина на одвојување на контактите,
 t - временски чекор на симулацијата.

По отворање на контактите на прекинувачот доаѓа до создавање на висок повратен напон. Кога овој напон е поголем од диелектричната цврстина на меѓуконтактното растојание доаѓа до повторно палење во прекинувачот. Повторно гасење на лакот доаѓа во моментот кога стрмнината на струјата има вредност помала од критичната стрмнина при која доаѓа до гасење на високофреквентната струја, и амплитудата на оваа струја има помала вредност од нивото на струјата на отсечување при високи фреквенции. Вредноста на оваа критична стрмнина е случајна, и затоа е искористен рандом генератор со кој вредноста на критичната стрмнина се движи помеѓу 30 - 75 A/ μ s.

2.1 Симулација во еднофазно коло

За да се потврди точноста на моделот употребено е модифицирано еднофазно коло кое за прв пат е предложено од Carnezi и проф. Lindmayer (сл. 4). Изворот U е поврзан со мал отпорник (кој не е прикажан на сликата) кој претставува внатрешна отпорност на изворот. Отпорот R_1 , индуктивитетот L_1 , и капацитетот C_p претставуваат параметри на собирниците како и кабелот кои се приклучени за товарот. Останатите параметри на сл. 4 се параметри на оптоварувањето. Прекинувачот има додатна паралелна гранка која ги претставува особините кога контактите се отворени. Таа е важна за да се земе предвид струјата по гасење на лакот (анг. post-zero current) поради заостанатите јони во меѓуконтактниот простор како и поради струјата на поместување dq/dt . Врвната вредност на оваа струја зависи од стрмнината на струјата пред природната нула [13]. На сл. 5 прикажани се резултатите од симулацијата во еднофазно коло.

Сл. 5 а) претставува струја низ прекинувачот при успешно гасење на лакот. Со промена на параметрите во колото, како и моментот на исклучување лесно може да се добие случај на неуспешно гасење на лакот со неколку повторни палења при што лакот се гаси во наредната нула. На сл. 5 б) и в) дадени се напонот на страната на оптоварување како и напонот на прекинувачот респективно. Кога високофреквентната струја поминува низ нула повратниот напон расте. При успешно гасење на лакот не постои повеќе високофреквентна струја и напонот повторно добива синусна форма.

3 ПРИМЕНА НА МОДЕЛОТ ВО СТУДИЈА НА ТРАНСФОРМАТОРИ

Реализираниот модел на вакуумски прекинувач е погоден за анализа на пренапонски појави при исклучување на неоптоварени трансформатори. На сл. 6 е дадена шема каде што трансформатор е поврзан со кабел преку вакуумски прекинувач. Моделот на трансформаторот го зема предвид и заситувањето на магнетното коло на трансформаторот и обезбедува можност за анализа на напоните на клемите од трансформаторот. За пресметка на напоните по должината на навивките потребни се повеќе податоци и тоа не е дадено во рамките на овој труд. Податоци за елементите во мрежата се дадени во Табела I.

Табела I Податоци на мрежата

Параметар	Вредност
Податоци за трансформатор	
Моќност	3 MVA
Номинален напон	10/0.4 kV, Y _n d 5
Номинална фреквенција	50 Hz
напон на куса врска	5%
Примарна капацитивност	7 nF
Секундарна капацитивност	7 nF
Попречна капацитивност	4 nF
струја на магнетизирање	1 %
Податоци за кабел	
Номинален напон	10 kV
должина	400 m
импеданса на директен систем	0.0837+j0.0912 Ω/km
импеданса на нулти систем	1.37+j0.138 Ω/km
капацитет	0.5 μF/km
Податоци за вакуумски прекинувач	
Критично електрично поле	20 kV/mm
критична стрмина при високи фреквенции	30 - 75 A/μs
брзина на одвојување на контактите	1 m/s
максимално меѓуконтактно растојание	5 mm
струја на отсечување при високи фреквенции	0.125 A

За испитуваниот случај се покажува дека е можна појава на многу високи пренапони на секундарната страна од трансформаторот. Овие пренапони можат да ја оштетат изолацијата на намотките и предизвикат пробив до јадрото од трансформаторот. Можно елиминирање на ваквите пренапони се обезбедува со инсталирање на капацитет на нисконапонската страна [12], или употреба на отпорници на примарната страна [11]. Друго решение е инсталирање на R-C гранка фаза спрема земја на примарната страна. Вредностите на капацитетот и отпорникот се избрани според (4) и (5):

$$C_s = \frac{S_n \cdot i_0}{200\pi k^2 f \cdot U_n^2} \quad (4)$$

каде:

S_n - Номинална моќност на трансформаторот во MVA,

i_0 - струја на магнетизирање во %,
 f - фреквенција на мрежата во Hz,
 U_n - номинален напон во kV,
 k - фактор на отсекување на напон

$$R_s \geq 2 \sqrt{\frac{L_c}{C_s}} \quad (5)$$

каде:

L_c - индуктивност на кабелот.

Факторот на отсекување на напон покажува колку пати темената вредност на преодниот напон е поголем од номиналната вредност на напонот.

Избраниот отпорник учествува во пригушување на преодните осцилации. Исто така овој отпорник придонесува за смалување на појавата на виртуелно отсекување на струјата. Се препорачува вредноста на капацитивноста C_s да биде што е можно помала. Има две причини за тоа:

- Помала капацитивност придонесува за помала вредност на струјата на повторно палење,
- Отпорникот би требало да биде избран така да може да ја издржи капацитивната струја, па одовде следи дека неговата вредност зависи од големината на вредноста на капацитетот.

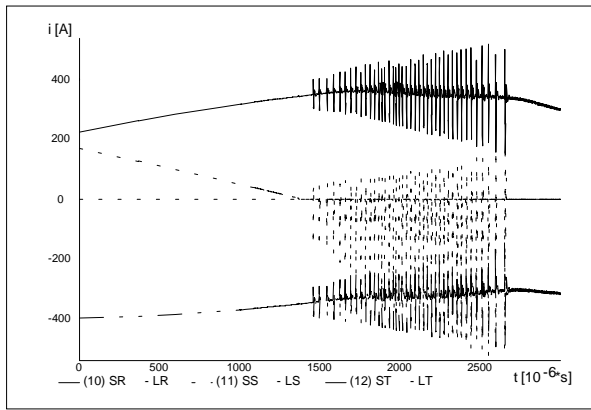
4 РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЈА

Со користење на шемата од сл. 6, направени се многу симулации со и без заштитна гранка. Сл. 7, 8 и 9 претставуваат струјата на повторно палење низ прекинувачот, напоните на високонапонската страна, како и напонот на нисконапонската страна во фаза Т без употреба на R-C гранка. Резултатите од симулациите со заштитна гранка се дадени од сл.10 до сл.15. Вредностите на параметрите кои се употребени при симулациите со R-C гранка се дадени во Табела II. Параметрите во случајот А се пресметани според (4) и (5), додека случајот Б се однесува на случајно избрани вредности. Искуството покажува дека најдобро пригушување се постигнува при вредности на заштитниот капацитет од 0.25 - 0.5 μF , како и тоа дека временската константа на R-C колото се движи околу 10 μs .

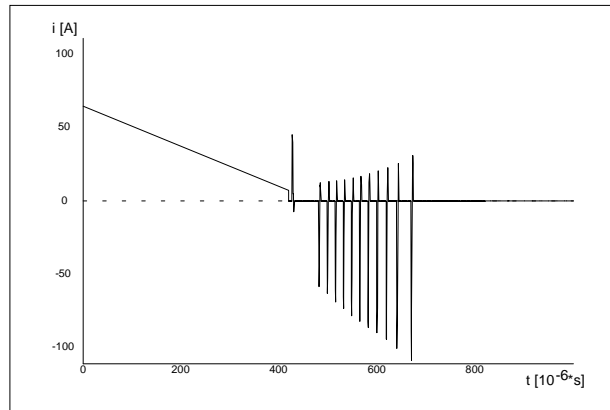
Табела II, Параметри на R-C гранката

	R (Ω)	C (μF)	k
А	30	0.514	1.35
Б	50	1	/

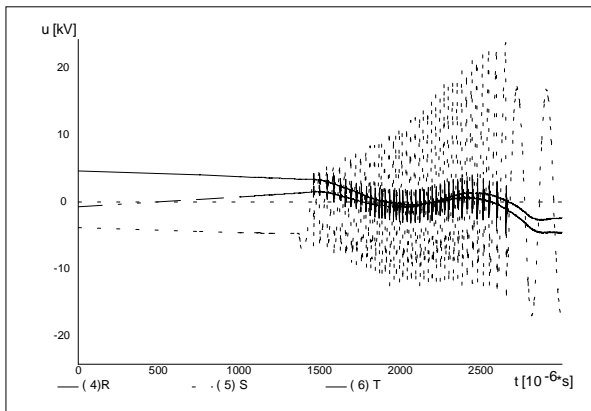
Според овие резултати може да се заклучи дека е постигната значајна редукција на пренапоните како и на амплитудата на струјата на повторното палење. Изборот на параметрите на R-C гранката битно влијае врз големината на струите на повторно палење како и на пренапоните.



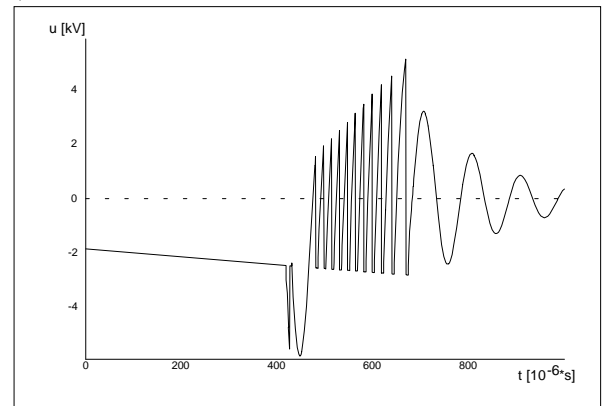
Сл. 1 Влијание на струјата на повторно палење во еден пол врз другите два пола



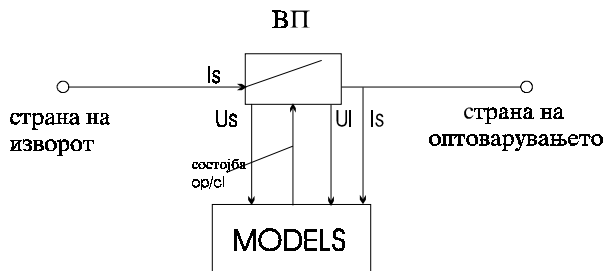
а)



Сл. 2 Ескалација на напонот поради повторно палење на лакот

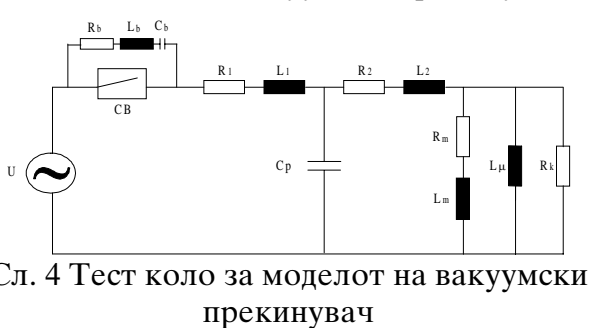
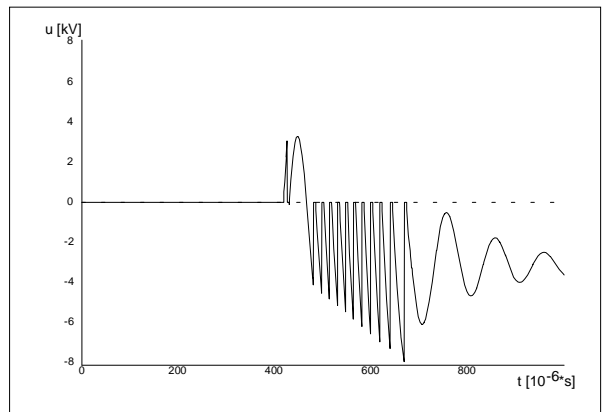


б)



Сл. 3 Модел на вакуумски прекинувач

в)

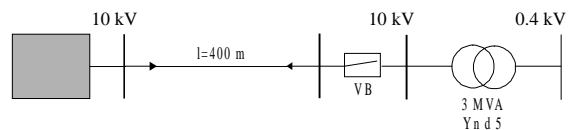


Сл. 4 Тест коло за моделот на вакуумски прекинувач

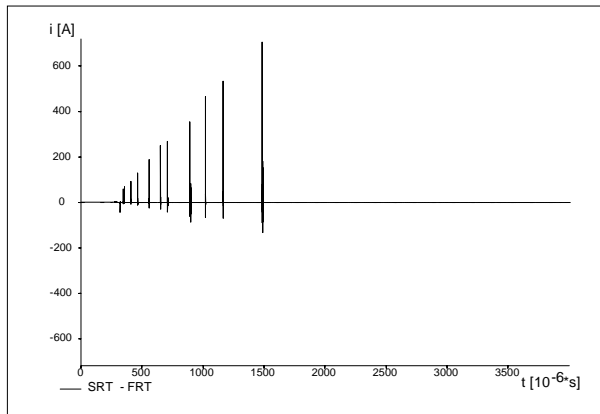
$U=5134V, R_1=8.2\Omega, L_1=50\text{ mH}, R_2=0.204\Omega, L_2=8.4\text{ mH}, R_m=2.58\Omega, L_m=6.8\text{ mH}, L_\mu=0.2\text{ H}, R_k=10^5\Omega, C_p=15\text{ nF}, R_b=50\Omega, L_b=50\text{ nH}, C_b=200\text{ pF}$

Сл. 5 Симулација во еднофазно коло

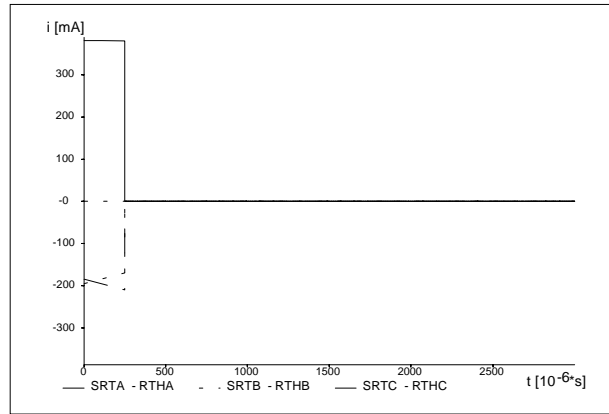
- а) струја низ прекинувачот,
- б) напон на страната на оптоварување,
- в) напон на контактите на прекинувачот



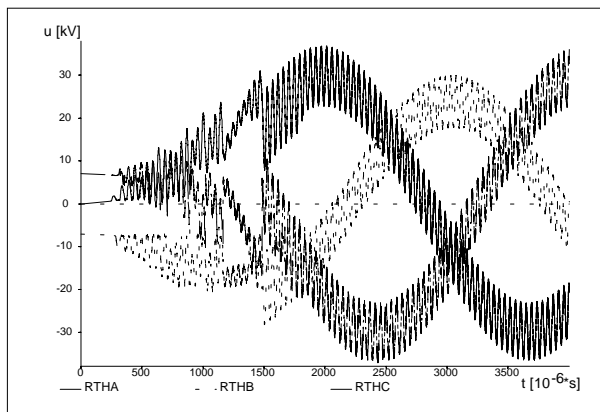
Сл. 6 Конфигурација на разгледуваниот систем



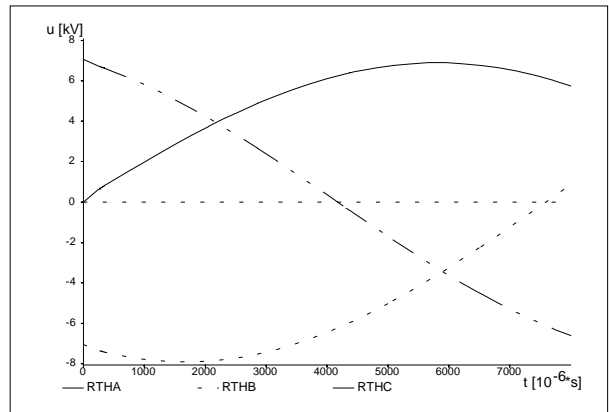
Сл. 7 Струја на повторно палење во фаза Т по отворање на контактите



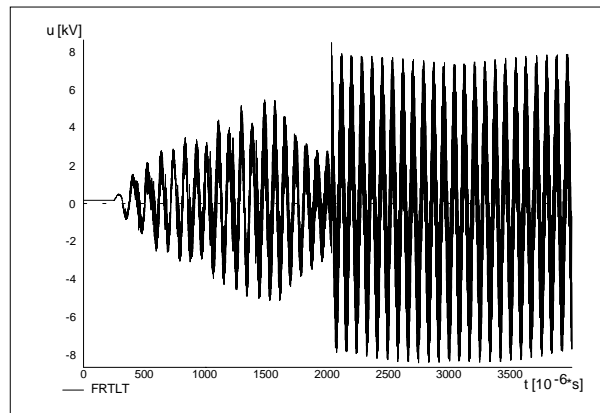
Сл. 10 Струи низ прекинувачот при употреба на заштитна R-C гранка (A)



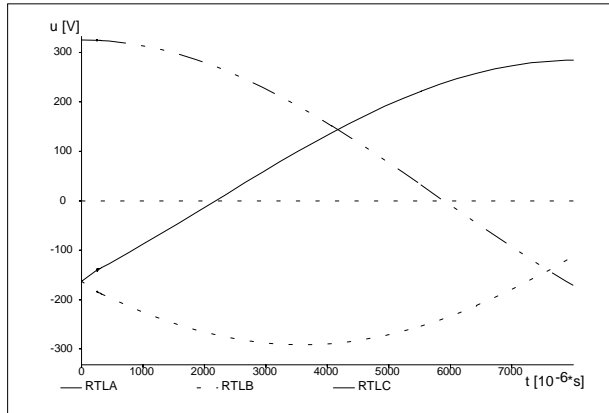
Сл. 8 Напони на ВН страна во сите три фази



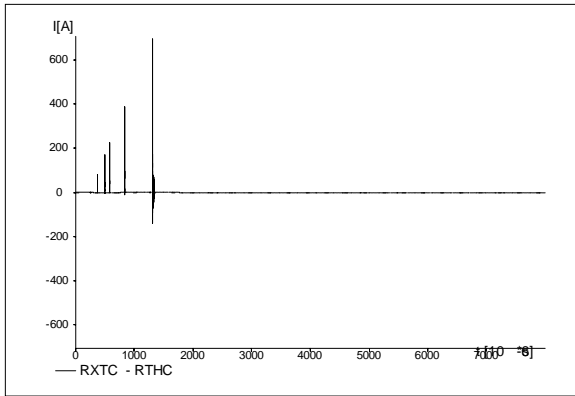
Сл. 11 Напони на ВН страна при употреба на заштитна R-C гранка (A)



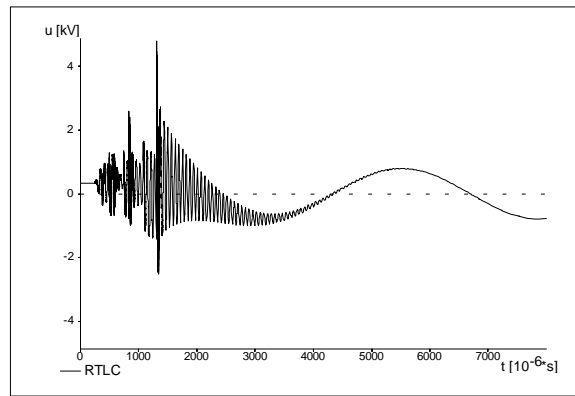
Сл.9 Напон на фазата Т од НН страна на трансформаторот



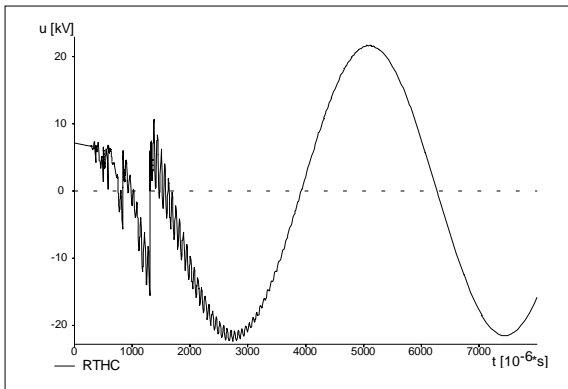
Сл.12 Напони на НН страна при употреба на заштитна R-C гранка (A)



Сл. 13 Струја низ прекинувачот на фаза Т со користење на R-C гранка (Б)



Сл.15 Напон на ВН страна на фаза Т при употреба на заштитна R-C гранка (Б)



Сл. 14 Напон на ВН страна на фаза Т при употреба на заштитна R-C гранка (Б)

5 ЗАКЛУЧОК

Се покажува дека неоптоварените трансформатори може да бидат изложени на многу високи напони при исклучување со помош на вакуумски прекинувач. Големината и фреквенцијата на овие пренапони зависи од карактеристиките на системот како и статистичките особини на прекинувачот. Треба да се напмени дека струјата на отсечување строго зависи од видот на контактите на прекинувачот. Изразот според кои е пресметана струјата на отсечување важи за вакуумски прекинувач со Cu/Cr (бакар - хромни) контакти. Погодно избрана R-C гранка поврзана на примарната страна на трансформаторот обезбедува добра заштита. Цената на чинење на оваа заштита е далеку помала од цената на можното оштетување на трансформаторот. Доколку постоечката мрежа доведува до појава на виртуелно отсечување на струјата, препорачливо е користење на дополнителна заштита со одводници на пренапон поставени фаза спрема фаза и фаза спрема земја. Инсталирање на заштитна гранка на нисконапонската страна од трансформаторот, придонесува за смалување на пренапоните на секундарната страна но нема значаен ефект на струјата на повторно палење.

6 ЛИТЕРАТУРА

1. Kosmac J., Zunko P.: A statistical vacuum circuit breaker for simulation of transient overvoltages, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 294-300.
2. Czarnecki L., Lindmayer M.: Measurement and statistical simulation of virtual current chopping in vacuum switches, *XI-th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berlin, GDR*, September 1984, pp. 1-8.
3. Legros W., Salvador W., Bassleer D.: Vacuum circuit breaker modelling at interruption of small inductive currents, *EMTP closed meeting*, October 17-18, 1988, Leuven.
4. Helmer J., Lindmayer M.: Mathematical Modelling of the High Frequency Behaviour of Vacuum Interrupters and Comparison with Measured Transients in Power Systems, *XVII-th Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, California, USA*, July 21 - 26, 1996, pp. 1-8.
5. Glinkowski M., Gutierrez M., Braun D.: Voltage Escalation and Reignition Behavior of Vacuum Generator Circuit Breakers During Load Shedding, *IEEE/PES Summer Meeting*, Denver, July 28 - August 1, 1996, 96 SM 402-8 PWRD.
6. Popov M., Zlatanovski M., Kosmac J.: An analysis of transient phenomena due to switching off low inductive currents with a vacuum circuit breaker, *UPEC 97*, Manchester, UK, 1997.
7. Meyer W.S., Liu T.H.: *ATP Rule Book*, BPA Portland, Oregon, USA, 1992.
8. Kosmac J., Zunko P.: Switching off Small Inductive Currents with Vacuum Circuit Breaker, *2-nd Electrotechnical and computer science conference ERK 93*, Portoroz, Slovenia, September 1993, pp. 395 - 398.
9. Ma Z.: *Reactor current switching with gas blast circuit breakers*, Ph.D. thesis, Stafford University, March 1996.
10. Panek J., Fehrle K.G.: Overvoltage phenomena associated with virtual current chopping in three phase circuit, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-94, no. 4, July/August 1975, pp. 1317-1325.
11. Moore A.H., Blalock T.J.: Extensive field measurements support new approach to protection of arc furnace transformers against switching transients, *IEEE Transactions on PAS*, vol. PAS-94, no. 2, March/April 1975, pp. 473-481.
12. Paap G., Alkema A., Sluis van der L.: Overvoltages in power transformers caused by no load switching, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 10, No. 1, January 1995, pp. 301-307.
13. Greenwood A.: *Vacuum switchgear*, The IEE London, UK, 1994.
14. Helmer J.: *Hochfrequente Vorgänge zwischen Vakuum-Schaltstrecken und dreiphasigen Kreisen*, PhD thesis, Technischen Universität, Braunschweig, 1996.
15. Попов М. Моделирање на електричен лак кај вакуумски и SF6 прекинувачи за анализа на преодниите појави при исклучување на различни ойшоварувања, магистерски труд, ЕТФ-Скопје, февруари 1998 г.
16. Hall W.: *Vacuum interrupter technology*, Reyrolle - Rolce Royce switchgear report.
17. Greenwood A., Glinkowski M.: Voltage escalation in vacuum switching operation, *IEEE/PES, Summer meeting*, San Francisco, July 12 - 17, 1987, 87 SM 581-2.

м-р Шајноски Драго дипл.ел.инж.
 Јанкулоски Ацо дипл.ел.инж.
 Голабоски Драге ел.инж.
 АД "ЕМО" - Охрид

**КРИТЕРИУМ И КОНТРОЛА, ЗА ЕДНОВРЕМЕНОСТ КАЈ
ВАКУУМСКИ ПРЕКИНУВАЧ ПРИ ПРЕКИНУВАЊЕ НА
КОНДЕНЗАТОРСКА БАТЕРИЈА**

СОДРЖИНА

Изнесена е анализата на процесите при прекинување на кондензаторска батерија, во мрежа со изолирано ѕвездиште од 7.2 kV ÷ 36 kV, со вакуумски прекинувач.

Како резултат од анализата и ограничувањата од стандардите, во поглед на висината на пренапоните, се наметнува критериумит за едновременоста на контактите од вакуумските прекинувачи, како и потребата од нејзино контролирање во процесот на рутинско испитување на прекинувачот.

ABSTRACT

There have been presented the analysis during breaking of the capacitor bank, in network with isolated neutral point of 7.2 kV÷36 kV, with vacuum circuit breaker.

As result of the analysis and limitations by standards, regarding to level of the overvoltages, the criterion for contacts simultaneausness of circuit breakers, as well as need of its control within the process of a routine testing of vacuum circuit breakers has been set up.

КЛУЧНИ ЗБОРОВИ

Вакуумски прекинувач, кондензаторска батерија, едновременост, рутинско испитување.

1. ВОВЕД

Со брзиот технолошки развој од опремата, што учествува во процесот на производство, пренос и дистрибуција на електрична енергија, сè наметнуваат се построги барања за нивните перформанси.

Прекинувачите се еден сегмент од споменатата опрема, што значи дека и тие треба да ги задоволат барањата.

Ова значи дека од современите прекинувачи се бара:

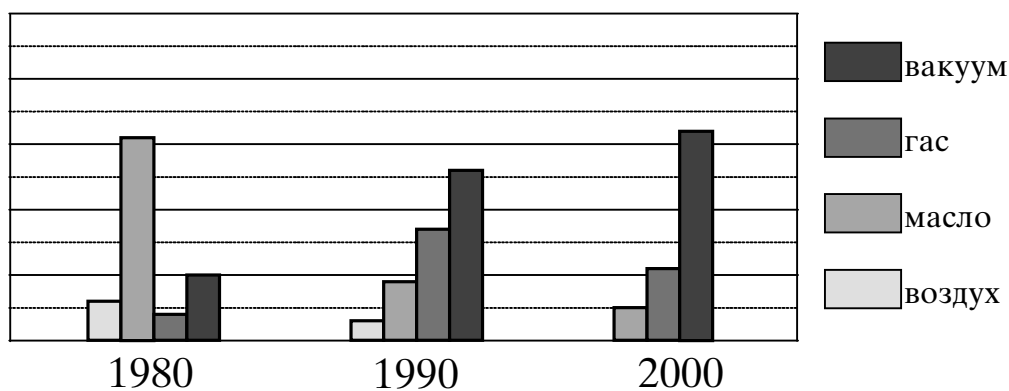
- добри технички карактеристики (номинална струја, номинален напон, номинална расклопна снага на струја на куса врска, вклучување и исклучување на мали индуктивни и капацитвни струи);
- поголема доверливост и подолга трајност во работата;
- намалување на габаритите и тежините.

Вака поставените барања, од друга страна, ги обврзуваат производителите на прекинувачи да ги подобруваат постоечките и да воведуваат нови решенија на техники на прекинување.

Денес за номинални напони $7.2 \div 36 \text{ kV}$, со сигурност може да се каже дека малкумаслените прекинувачи се потиснати од две посовремени техники на прекинување SF_6 и вакуум.

На дијаграм бр.1 графички е прикажан светскиот тренд на производство на прекинувачи $7.2 \div 36 \text{ kV}$ од 1980 ÷ 2000 год., према податоци од WESTINGHOUSE.

Вакви показатели можат да се сретнат и кај останатите светски реномирани производители на прекинувачи: SIEMENS, TOSHIBA и др.



Дијаграм бр.1

Вакуумската техника на прекинување, во одредени специјални погонски услови на зачестени манипулации, (железница, генераторски прекинувачи), има предност над SF_6 техниката.

Исто така вакуумските прекинувачи се повеќе ги потиснуваат и специјалните индустриски прекинувачи (со магнетно оддувување, пневматски и др.), кои се применуваат во индустријата на металургијата.

Сите споменати предности на вакуумските прекинувачи се засновани на природата на прекинување на струјниот круг во средина со вакуум.

За овој процес карактеристично е следното:

- мал напон на електричниот лак;

- кусо траење на електричниот лак (прекинување на струјата во нејзиниот прв премин низ нула, после галванското одвојување на контактите);
- мала енергија ослободена во електричниот лак;
- голема брзина на воспоставување на диелектричната цврстина на средината ($25 \text{ kV}/\mu\text{s}$);
- висока диелектрична цврстина на вакуумот, што овозможува растојанија помеѓу отворени контакти $6\div 20 \text{ mm}$.

Овие процеси се добра основа за оптимирање на останатите делови од прекинувачот (погонски механизам, носачи, спојни полуги и др.) што овозможуваат да се произведат прекинувачи со:

- мали габарити и тежини;
- минимален број на подвижни делови;
- намалување на потребното ниво механичка енергија, потребна за задвижување на контактите;
- поедноставување на конструкцијата на погонските механизми;
- голема механичка трајност;
- голема електрична трајност;
- потребите од одржување сведени на минимум (само на погонскиот механизам).

Една од многуте намени на вакуумскиот прекинувач е вклучување и исклучување на кондензаторска батерија во мрежи со изолирано свездиште.

Заради природата на процесите кои се јавуваат при исклучување на кондензаторска батерија со вакуумски прекинувач, се наметнува потребата, едновременоста на контактите од вакуумскиот прекинувач да биде во одредени граници.

Тоа се прави со цел висината на пренапоните, во овој погонски случај, да не биде поголема од $2.5 U_m$ која е допуштена вредност према стандардот ИЕС-56.

Во продолжение, прво, ќе се изнесе теоретскиот пристап за анализа на процесот прекинување на кондензаторска батерија во мрежа со изолирано свездиште. Потоа ќе се изнесе практичната мерна метода за контрола на едновременоста на вакуумскиот прекинувач, што ја применува ЕМО за сопствените вакуумски прекинувачи.

2. АНАЛИЗА НА СТРУЈНИОТ КРУГ, ПРИ ИСКЛУЧУВАЊЕ НА КОНДЕНЗАТОРСКА БАТЕРИЈА

За да може да се согледа потребата едновременоста на контактите од вакуумскиот прекинувачои, при исклучување на кондензаторска батерија, да биде во утврдени граници, потребно е да се изврши анализа на струјниот круг.

Заради многу добрите диелектрички карактеристики на вакуумските комори, при прекинување на капацитивни струи, истите се прекинуваат во првата наредна нула, од моментот на галванско одвојување на контактите. При тоа до повторен пробој не доаѓа, така да секое прекинување е успешно.

Прекинувачите се трифазни апарати што добиваат механичка енергија од едно место. Според тоа моментите на галванско допирање или одвојување на контактите во сите три пола од прекинувачот не се едновремени. Постои одреден

временски интервал во кој сите контакти галвански се допираат или одвојуваат, што се наречува едновременост на контактите.

Редоследот на галванско допирање или одвојување на контактите е стохастичка појава, а големината на временскиот интервал (едновременоста) се движи во дефинирани граници.

Како последица на ова, струјниот круг, во кој се наоѓа прекинувачот, за време отворање и затворање, ја менува конфигурацијата, што повлекува одвивање на процеси кои ќе бидат анализирани.

Бидејќи струјниот круг што се прекинува е трифазен симетричен, за природата на процесите не е важен редоследот на галванското одвојување на контактите, туку големината на едновременоста.

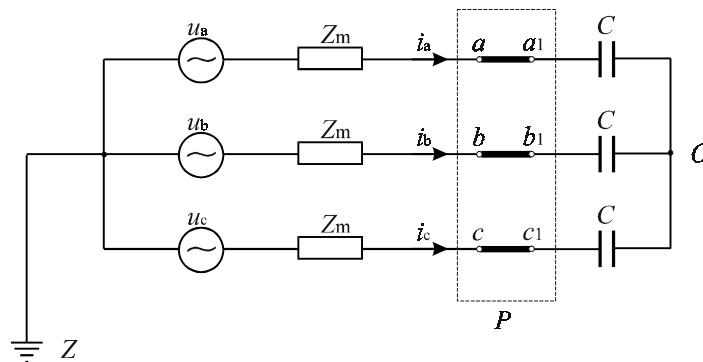
Заради ова ќе усвоиме редослед на галванско одвојување на контактите во прекинувачот: пол - **A**; пол - **B** и пол - **C**.

Струјниот круг, при прекинувањето, има три конфигурации:

- сите три пола затворени (стационарен режим);
- прекинатата струја во полот - **A**, контактите во половите **B** и **C** во галвански допир;
- прекинатата струјата во сите три пола.

2.1. Анализа на струјниот круг за стационарен режим

За овој случај струјниот круг е прикажан на слика бр.1



Сл.1 Струен круг за стационарен режим

Z_m - импеданса на мрежата од страна на изворот;

U_i , $i = a, b, c$ - напони на изворот;

i_k , $k = a, b, c$ - струи што течат во струјниот круг;

C - капацитивност на кондензаторска батерија;

O - заедничка точка на кондензаторска батерија;

Z - точка на заземјување на заедничката точка од изворот;

P - прекинувач со кој се прекинува струјниот круг;

a, b, c - приклучоци на прекинувачот на страната на изворот;

a_1, b_1, c_1 - приклучоци на прекинувачот на страната на потрошувачот.

Бидејќи струјниот круг е симетричен, тогаш и соодветните струи и напони ќе бидат симетрични, а напонот на точката O е нула.

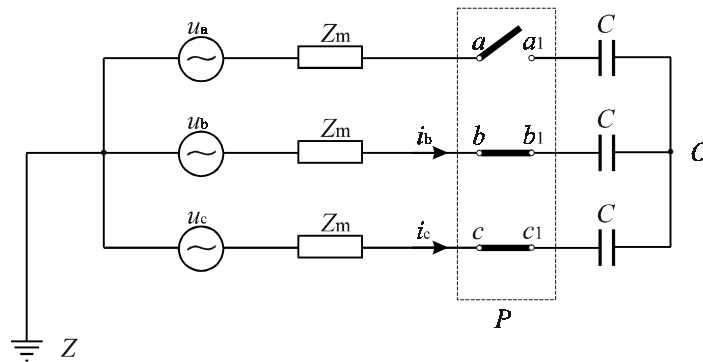
$$\begin{aligned} i_a &= I_m \cos \omega t \\ i_b &= I_m \cos(\omega t - 2\pi / 3) \dots\dots\dots (1) \\ i_c &= I_m \cos(\omega t + 2\pi / 3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} u_a &= U_m \cos \omega t \\ u_b &= U_m \sin(\omega t - 2\pi / 3) \dots\dots\dots (2) \\ u_c &= U_m \sin(\omega t + 2\pi / 3) \end{aligned}$$

$$u_0 = u_z = 0 \dots\dots\dots (3)$$

2.2. Анализа на струјниот круг, прекината струја во колото

Струјниот круг е прикажан на слика 2.



Сл.2

После прекинување на струјата во полот - А, во струјниот круг настанува преоден процес, како последица на законот за конзервација на енергијата. Соодветните струи и напони ќе се состојат од две компоненти: експоненцијално пригушена и стационарна. Општиот израз за нивната временска промена може да се опише со изразот:

$$y(t) = Y_p e^{-t/\tau} \cos(\omega t + \varphi_0) + Y_s \cos(\omega t + \psi) \dots\dots\dots (4)$$

каде се:

- Y_p - амплитуда на преодната компонента;
- τ - временска константа на струјниот круг;
- ω_0 - сопствена кружна фреквенција на струјниот круг;
- φ_0 - почетна фаза на преодната компонента;
- Y_s - амплитуда на стационарната компонента;
- ω - кружна фреквенција на изворот;
- ψ - почетна фаза на стационарната компонента.

Ако се земат предвид реалните параметри на струјниот круг може да се заклучи дека:

- величината Y_p е мала, всушност тоа е пад на напонот на импедансата Z_m ;
- пригушувањето на преодната компонента е брзо за 1÷2 ms.

Од претходното изнесено може да се заклучи дека анализата на струјниот круг за овој режим, може да се изврши само преку стационарната компонента.

Напоните во приклучоците од прекинувачот, во однос на точката **O**, b_1 и c_1 ќе бидат опишани со изразот:

$$\begin{aligned} u_{b_1 0} &= u_{b_1}(t_1) + \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t \\ u_{c_1 0} &= u_{c_1}(t_1) - \frac{\sqrt{3}}{2} U_m \sin \omega t \end{aligned} \dots\dots\dots (5)$$

каде што $u_{b_1}(t_1)$ и $u_{c_1}(t_1)$ се напоните на приклучоците во b_1 и c_1 во моментот на прекинување на струјата во полот - **A**.

Времето t во изразот (5) се смета од моментот на прекинување на струјата во полот - **A**, односно $t=0$ во момент t_1 од почетокот на анализата на струјниот круг.

Напонот на точката **O** во однос на **Z**, почнува да расте, а се опишува со изразот:

$$u_{oz} = u_b - u_{b_1 0} = -\frac{U_m}{2} \cos \omega t + \frac{U_m}{2} \dots\dots\dots (6)$$

Напонот на приклучокот a_1 во однос на точката **O**, останува на константна вредност т.е. $u_{a_1 0} = U_m = const$.

На приклучоците **a** и a_1 од полот - **A**, се јавува напон даден со изразот:

$$u_{aa_1} = u_a - u_{a_1 0} - u_{oz} \dots\dots\dots (7)$$

Во двата пола од прекинувачот тече иста струја опишана со изразот:

$$i_b = -i_c = \frac{\sqrt{3}}{2} I_m \cos \omega t \dots\dots\dots (8)$$

Од изразот (8) може да се заклучи дека услови за прекинување на струјата во половите **B** и **C** се создаваат после $\omega t = \pi/2$ односно 5 ms од моментот на прекинување на струјата во полот - **A**.

Во зависност од едновременоста на контактите во половите **B** и **C** можни се два случаја:

- галванско одвојување на контактите во половите **B** и **C**, по 5 ms , после моментот t_1 .
- галванско одвојување на контактите во половите **B** и **C**, за помалку од 5 ms , од моментот t_1 .

Големината на повратниот напон, на приклучоците на полот кој прв пркинува, (во овој случај полот - **A**), зависи од моментот на галванско одвојување на контактите во половите **B** и **C**, во однос на моментот t_1 , (прекинување на струјата во полот - **A**).

Временскиот тек на промена на соодветните струи и напони, во анализираниот струен круг се дадени на график бр. 2 и бр. 3, посебно за двата споменати случаи, на прекинување на струјата во последните два пола.

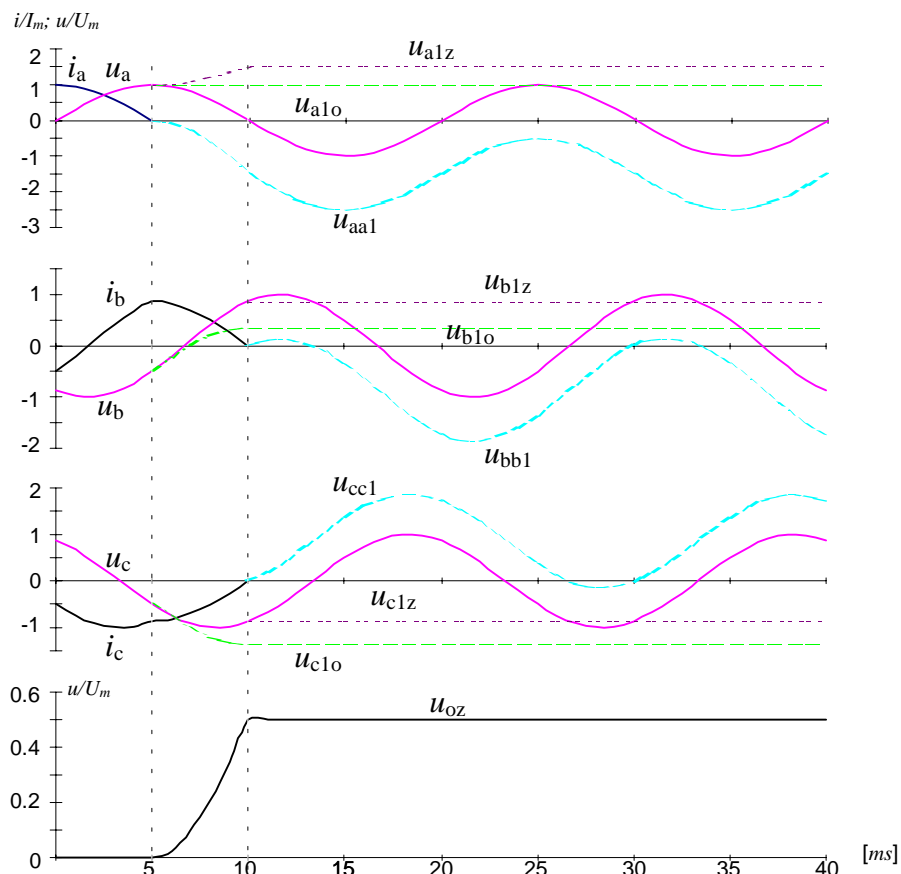


График бр. 2 Промена на струи и напони, за едновременост $< 5\text{ ms}$

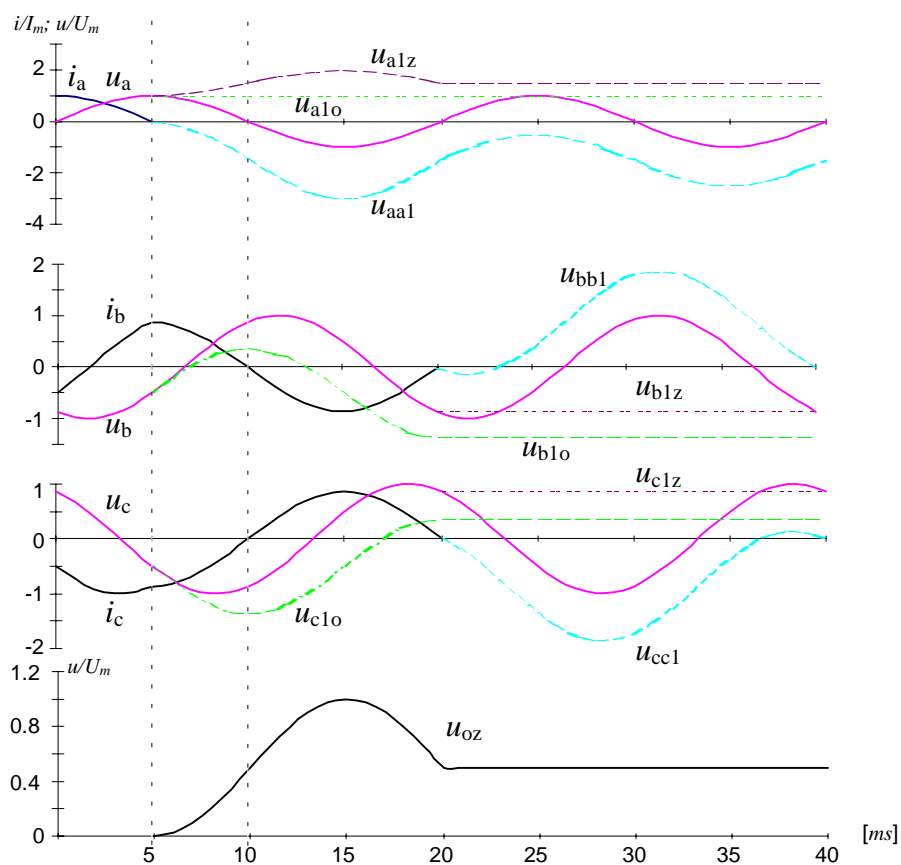


График бр. 3 Промена на струи и напони, за едновременост $> 5\text{ ms}$.

Анализирајќи го текот на промена на напоните, во одделни точки од струјниот круг кој се прекинува, можеме да заклучиме дека највисок напон се јавува на приклучоците од полот кој прв прекинува.

Покрај тоа апсолутната вредност на овој напон зависи од моментот на галванско одвојување на контактите во останатите два пола.

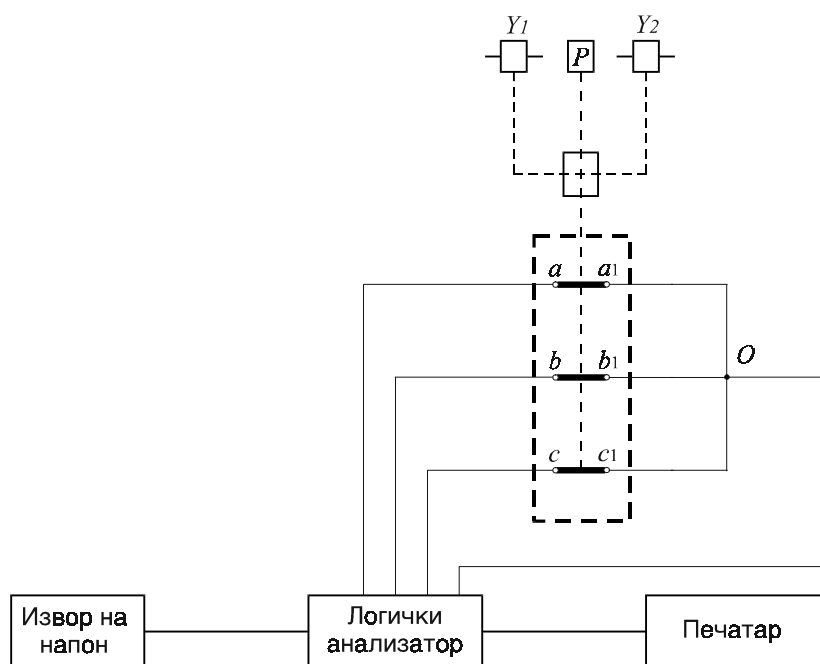
Се покажува дека најголема вредност напонот, на приклучоците од прекинувачот, добива кога контактите во останатите два пола галвански се одвојуваат после $5 ms$, од моментот t_1 , а тоа е $3U_m$.

Оваа вредност е поголема од $2.5U_m$, што е допуштена вредност при прекинување на кондензаторска батерија со прекинувач.

Од ова се наметнува потребата едновременоста, на контактите од вакуумските прекинувачи, да биде помала од $5 ms$. Овој параметар потребно е да се мери во процесот на завршните испитувања на вакуумските прекинувачи, со цел да се преземат корективни мерки за негово дотерување на допуштеното ниво.

3. ИСПИТНА МЕТОДА ЗА КОНТРОЛА НА ЕДНОВРЕМЕНОСТ НА КОНТАКТИТЕ ОД ПРЕКИНУВАЧОТ

Заради контрола на едновременоста на контактите од вакуумскиот прекинувач ЕМО има усвоено испитна метода која се реализира со опрема прикажана на слика бр. 3



Слика бр. 3

Со Р е представен прекинувачот, кој се вклучува или исклучува со електромагнетите Y_1 и Y_2 , кои со деблокирање на одредени задржувачи овозможуваат ослободување на акумулирана механичка енергија.

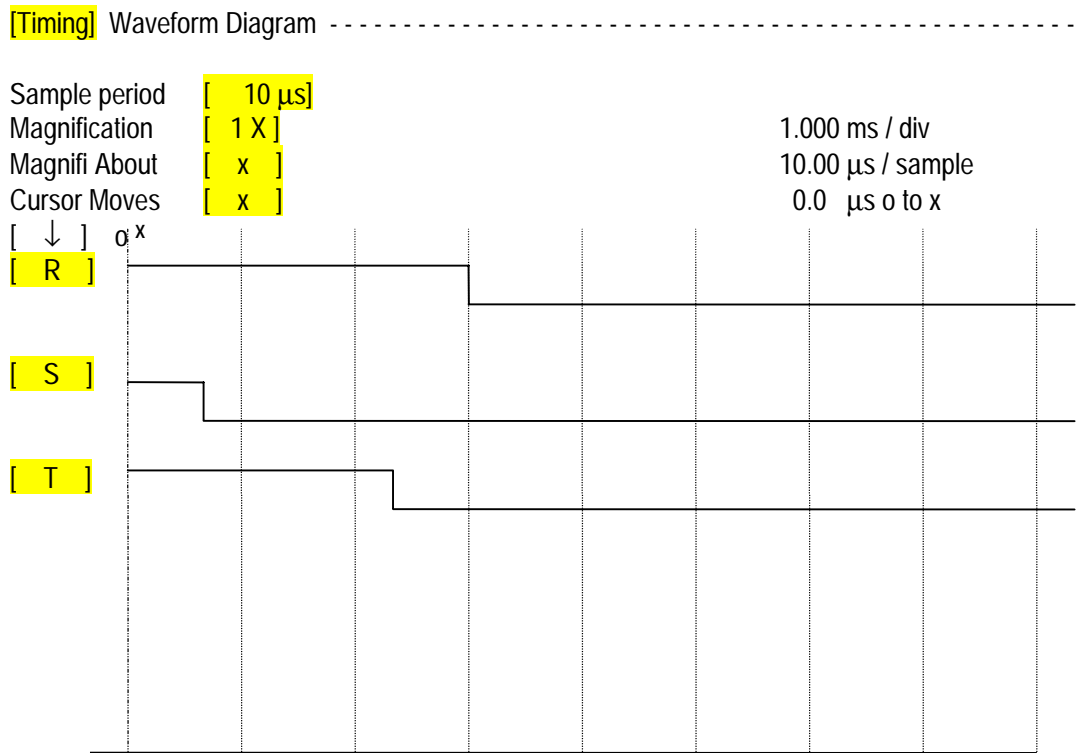
Логичкиот анализатор прима дигитален сигнал, го обработува, прикажува на екран и испраќа на печатар.

Спрема тоа во логичкиот анализатор се внесуваат врските од трите пола на прекинувачот на посебни влезови. Кога галвански ќе допре некој контакт во било кој пол, логичкиот анализатор ја регистрира промената, па така со меѓусебна споредба на трите влезни сигнали може да се отчита колкава е едновременоста на контактите.

Во зависност од добиените вредности на едновременоста се заклучува дали има потреба од нејзина корекција.

На вакво испитување е подложен секој произведен вакуумски прекинувач, наменет за прекинување на кондензаторска батерија.

На сликата е даден дијаграм за едновременоста на контактите при отворање на прекинувачот.



Дијаграм бр. 2

4. ЗАКЛУЧОК

Потребата од контрола на едновременоста на контактите на вакуумските прекинувачи, наменети за прекинување на кондензаторска батерија, во мрежа со изолирано ѕвездиште произлегува од:

- карактеристиките на вакуумските комори;
- текот на процесот при прекинување на струите во струјниот круг со кондензаторска батерија;

- ограничувањата од стандардите, во поглед на висините на пренапоните, а со цел да се намалат диелектричните напрегања на изолацијата, што ќе резултира со зголемен век на траење на опремата.

Вредноста на споменатата едновременост треба да е помала од 5 ms , а производителите на прекинувачи потребно е да ја контролираат на секој произведен вакуумски прекинувач.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Boris Belin: “Uvod u teoriju sklopnih aparata” Zagreb-19__;
2. Стандард IEC-56: High-voltage alternating-current circuit-breakers;
3. WESTINGHOUSE: Проспектен материјал;
4. ЕМО-Охрид: Испитни методи за едновременост на контакти од прекинувачи.

МАКЕДОНСКИ КОМИТЕТ ЗА ГОЛЕМИ ЕЛЕКТРИЧНИ СИСТЕМИ СИГРЕ
С К О П Ј Е,

ВТОРО СОВЕТУВАЊЕ НА МАКО СИГРЕ

Милојче Милковски, дипл. инж.

ПП "Л е м и " - Скопје

Др.Петар Вукелја, дипл. инж.

Радомир Наумов, дипл. инж.

Митко Вукиниќ, дипл. инж.

Електротехнички институт

"Никола Тесла" Белград

ПРЕОДНИ ПОЈАВИ ПРИ МАНИПУЛАЦИЈА СО ПРЕКИНУВАЧИТЕ НА КОНДЕНЗАТОРСКИТЕ БАТЕРИИ

СОДРЖИНА

Трудот ги прикажува резултатите од експерименталните истражувања на преодните појави при вклучување и исклучување на прекинувачите на кондензаторските батерии, кои што ги изврши Институтот "Никола Тесла" во повеќето станици на различни нивоа.

АБСТРАКТ

This paper presents the results of the experimental investigations of transitive appearances during the switching on and switching off the switches of condenser batteries, realized by Institute "NikolaTesla" in most of transformer stations at different voltage levels.

1. ВОВЕД

Потребите за компензација на реактивната енергија во определени делови на електроенергетскиот систем условуваат воведување на кондензаторски батерии на определени места. Истите по потреба би се вклучувале и исклучувале со прекинувачите на кондензаторските батерии.

Бројот на манипулации на прекинувачот на една кондензаторска батерија може да биде голем во текот на една година. Манипулациите со прекинувачите доведуваат до појава на преодни режими во електричните кола на кондензаторските батерии. Тие со својата работа можат да придонесат и за зголемување на интензитетот на преодните појави.

Вклучувањето на кондензаторските батерии со затварање на контактите на прекинувачот доведува до појава на големи ударни струи со високи фреквенции кои што се пригушуваат по десетина или повеќе милисекунди. Ударните струи можат да бидат блиски до струите на куса врска, ако истите не се ограничат со пригушници со мала индуктивност врзани сервиски со кондензаторската батерија. Ударните струи доведуваат до значителни електрични, динамички, термички и механички напругнувања на кондензаторската батерија, пригушницата и самиот прекинувач. Кај определени типови на прекинувачи, во процесот на вклучување може да дојде до појава на предходни палења на лакот односно до прекинување и воспоставување на лакот на комората во услови кога контактите на прекинувачот се уште трајно не се споени. Тоа најчесто се случува кај прекинувачи кои што ја имаат особината да ги прекинуваат високофреквентните компоненти на струјата при нивното поминување низ нулата.

При исклучување на кондензаторската батерија преодниот процес може, но не мора да биде интензивен. Кога при одделување на контактите на прекинувачот струјата ќе се прекине при поминување низ нулата и нема да дојде до повторно палење на електричниот лак, тогаш преодниот струен и пренапонски процес е смирен. Меѓутоа, ако по прекинувањето на струјата, се воспостави напон на контактите на прекинувачот кој е поголем од диелектричната цврстина на меѓуконтактното растојание, лакот повторно се воспоставува и може да се појави поинтензивен преоден процес одколку при вклучувањето на кондензаторската батерија. Ако повторното палење на лакот помеѓу контактите на прекинувачот се случува до 5 милисекунди од прекинувањето на струјата, таа појава се нарекува повторно палење на електричниот лак, а ако тоа се случи после 5 милисекунди појавата се нарекува повторен прескок.

2. РЕЗУЛТАТИ ОД ЕКСПЕРИМЕНТАЛНИТЕ ИСТРАЖУВАЊА НА ПРЕНАПОНОТ И СТРУЈАТА ПРИ ВКЛУЧУВАЊЕ И ИСКЛУЧУВАЊЕ НА КОНДЕНЗАТОРСКИТЕ БАТЕРИИ.

Во поголем број на трансформаторски станици со напонско ниво 35KV, 15KV, 5,25KV и 6,3 KV Институтот "Никола Тесла" изврши истражувања на преодните напони и струи при вклучувањето и исклучувањето на кондензаторските батерии со изолирана неутрална точка. Снимени се

преодните фазни напони пред и после прекинувачот на кондензаторската батерија со помош на капацитивни напонски мерни системи, а исто така

снимени се и преодните струи преку постојните струјни трансформатори во колото на кондензаторската батерија.

Капацитивните напонски мерни системи направени се во Институтот "Никола Тесла" и истите веродостојно ги пренесуваат појавите од редот 10 MHz до неколку Hz. За снимање на преодните појави користени се аналогни и дигитални осцилоскопи и транзиент рикордери. Од снимените осцилограми на преодните фазни напони определени се факторите на пренапонот како однос на максималната вредност на преодниот фазен напон и на амплитудата на истиот напон во стационарниот режим на работа. Од снимените осцилограми на преодните струи отчитани се максималните вредности на струјата. Во табелата 1 дадени се резултатите од експерименталното истражување на преодните напони и струи. Прекинувачите со кои се вршени склопните операции се малкумаслни и вакумски прекинувачи, произведени од производители на поранешна Југославија и сегашна СРЈ. Во табелата се наведени следните параметри:

- напонското ниво на кое е приклучена кондензаторската батерија,
- изведба на прекинувачот со кој е вклучувана и исклучувана кондензаторската батерија (M-малкумаслени; V-вакумски) со ознака постар тип (st) и нов тип (n)
- снага на кондензаторската батерија KB 1 која што се вклучува и исклучува,
- снага на кондензаторските батерии KB што се присутни на собирниците на кои што се приклучува кондензаторската батерија KB 1,
- број на циклуси (n) на вклучувањата (U) и исклучувањата (I) на кондензаторската батерија, извршен во текот на истражувањето,
- максимална вредност на коефициентот на пренапонот (K max) на соединети фази (примерок на коефициентите на пренапони на сите три фази заедно) при вклучување и при исклучување,
- средна вредност на коефициентот на пренапон (Ksr) на соединети фази при вклучување и при исклучување,
- максимална вредност на ударната струја (Imax) на соединети фази при вклучување на кондензаторската батерија,
- средна вредност на ударните состојби (Isr) на соединети фази при вклучување на кондензаторската батерија,
- број (n pl) на исклучувања на кондензаторската батерија при кои е дојдено до повторно настанување на електричниот лак помеѓу контактите на прекинувачот.

При вклучување на кондензаторската батерија 4800 kvar со вакумски прекинувач (ред.број 17 во табела 1) доаѓаше до претходни палења на лакот помеѓу контактите на прекинувачот.

На пример, на сл.1,2,3,4,5,6 дадени се преодните фазни напони и струи при вклучување и исклучување на кондензаторските батерии.

3. АНАЛИЗА НА РЕЗУЛТАТИТЕ ОД ИСТРАЖУВАЊЕТО

Анализата на резултатите од експерименталните истражувања на преодните напони и струи при вклучување и исклучување на кондензаторските батерии го покажа следното:

- Вклучувањата на кондензаторските батерии не доведуваат до некои побитни пренапони ако нема појави на предходни палења на електричен лак помеѓу контактите на прекинувачот и ако кондензаторската батерија пред вклучувањето била неоптоварена (без преостанат напон); обично не преминуваат $K=2,00$. Појавата на предходни палења на електричниот лак во процесот на вклучување на прекинувачот може да доведе до прилично високи пренапони. Таа е својствена на вакумските прекинувачи. Максималниот пренапон установен при појавата на предходно палење на електричниот лак во текот на истражувањата е $K_{max} = 2,30$. Кога се вклучува оптоварена кондензаторска батерија, пренапоните можат да бидат значителни, особено ако при предходното исклучување имало повторни настанувања на електричен лак во прекинувачот. Максимален пренапон установен при вклучувањето на оптеретена кондензаторска батерија е $K_{max} = 3,85$.

- Ударните вредности на струјата при вклучување на кондензаторските батерии се значителни. Особено се изразени при вклучување на кондензаторските батерии на собирници на кои што веќе има вклучено други кондензаторски батерии. Што поголема е снагата на приклучените кондензаторски батерии на собирниците поголеми се и вредностите на ударните струи на кондензаторската батерија која што се вклучува. Максималната вредност на ударната компонента на струјата при вклучувањето измерена во текот на истражувањата се движеше во интервал од 4 до 20 пати од вредноста на амплитудата на струјата на кондензаторската батерија во нормалниот режим на работа.

- Исклучувањето на кондензаторската батерија не предизвикува високи пренапони ако при тоа нема појави на повторно настанување на електричниот лак помеѓу контактите на прекинувачот. Најголемиот измерен пренапон во текот на истражувањата е $K_{max} = 1,60$. Појавата на повторни палења на електричен лак во процесот на исклучување на прекинувачот може да доведе до многу високи пренапони. Во текот на истражувањата оваа појава особено беше изразена кај постарите типови на прекинувачи; најголем измерен пренапон во текот на нејзината појава е $K_{max} = 4,05$. Повторното појавување на електричен лак, односно повторените палења и повторените прескокнувања доведуваат до многу големи ударни струи кои можат да бидат значително поголеми од ударните струи при вклучување на кондензаторската батерија. Кај постарите типови на малкумаслени прекинувачи воочени се повеќекратно повторни палења на електричниот лак и повторени прескокнувања помеѓу контактите на поедините полови на прекинувачот при нивното исклучување. Максималната вредност на ударната струја при овие појави понекогаш ја

надминуваше дваесетструката вредност на амплитудата на струјата на кондензаторската батерија во нормалниот режим на работа. Како што констатиравме, повторното настанување на електричниот лак во процесот на исклучување доведува до појава на големи ударни струи, кои што преку лакот се затвараат помеѓу контактите на прекинувачот. Исто така, во многу случаи при вклучувањето се случува воспоставување на струја на кондензаторската батерија преку лакот кој се појавува пред да се

допрат контактите во комората на прекинувачот. Поради големата брзина на пораст, ударната струја при вклучувањето може да достигне максимална вредност пред да се затворат контактите. И во двата случаи, и при вклучувањето и при исклучувањето појавата на големи ударни струи е непожелна додека трае лакот на прекинувачот. Тие појави предизвикуваат ерозија на контактите и го забрзуваат стареењето на медиумот за гаснење на лакот.

Појавите на повеќекратно предходно палење на електричниот лак во прекинувачот во процесот на вклучување, а особено појавата на повторно настанување на електричниот лак во процесот на исклучување можат да доведат до високи пренапони во колото на кондензаторската батерија, уште повисоки од тие добиени во изведените експериментални истражувања. Исто така, високи пренапони се појавуваат и тогаш кога се вклучува оптоварена кондензаторска батерија.

Од напред наведеното следува:

- за прекинувачи на кондензаторски батерии треба да се изберат такви кои што не доведуваат до појава на предходни палења на електричниот лак и до повторно палење на електричниот лак,

- ударните струи при вклучување потребно е што повеќе да се намалат, а тоа се постигнува со избор на соодветни пригушници во колата на кондензаторските батерии,

- оптоварената кондензаторска батерија потребно е да се испразни после операцијата на исклучување, а тоа може да се постигне со уреди за растоварување или уште поприватливо, со поставување на напонски трансформатори помеѓу фазите во колото на кондензаторската батерија.

4. ЗАКЛУЧОЦИ

Врз основа на анализата на резултатите од истражувањето на преодните појави при вклучување и исклучување на прекинувачите на кондензаторските батерии може да се заклучи следното:

- Преодните напонски и струјни процеси кои се појавуваат при вклучувањето и исклучувањето на прекинувачите на кондензаторските батерии можат да доведат до значително оптоварување на опремата во колата на кондензаторската батерија.

- Посебно внимание треба да се посвети при изборот на прекинувачите за кондензаторски батерии.

- Со адекватниот избор на прекинувачот и пригушницата за кондензаторската батерија, како и со решавањето на проблемот за растоварување на кондензаторската батерија непосредно по нејзиното исклучување, значајно се ублажуваат преодните напонски и струјни процеси во колото на кондензаторските батерии, а со ова се намалуваат и оптоварувањата кои што ги предизвикуваат овие процеси.

ЛИТЕРАТУРА

[1]. Анализа на техничките можности за вградување на кондензаторски батерии на страната на понискиот напон во постојните и идни трафостаници 110/ x kV на преносната мрежа на EPS.

Студија бр. 329202, Институт "Никола Тесла", Београд 1992.

[2]. Истражување на пренапонот и на струјата на земјоспој во разводните постројки

ТС "Југ" и ТС "Север" железара Скопје

Извештај бр.328909, Институт "Никола Тесла" , Београд 1989.

[3]. Мерење на преодните фазни напони и струи во TS 110/6.3 kV Мајданпек 3 при комутациите со прекидачите на кондензаторската батерија

Извештај бр.3280410, Институт "Никола Тесла" , Београд 1984.

[4]. Мерење на преодните напони и струи во постројката "Далмација" во Дуги Рат при вклучување и исклучување на кондензаторската батерија 3,6 Mvar со прекинувач PU-208-500 производство "Минел"

Извештај бр. 380410, Институт "Никола Тесла" , Београд 1980.

[5]. Мерење на пренапони при комутациите на кондензаторската батерија 35 kV, TS 110/35 kV Ниш

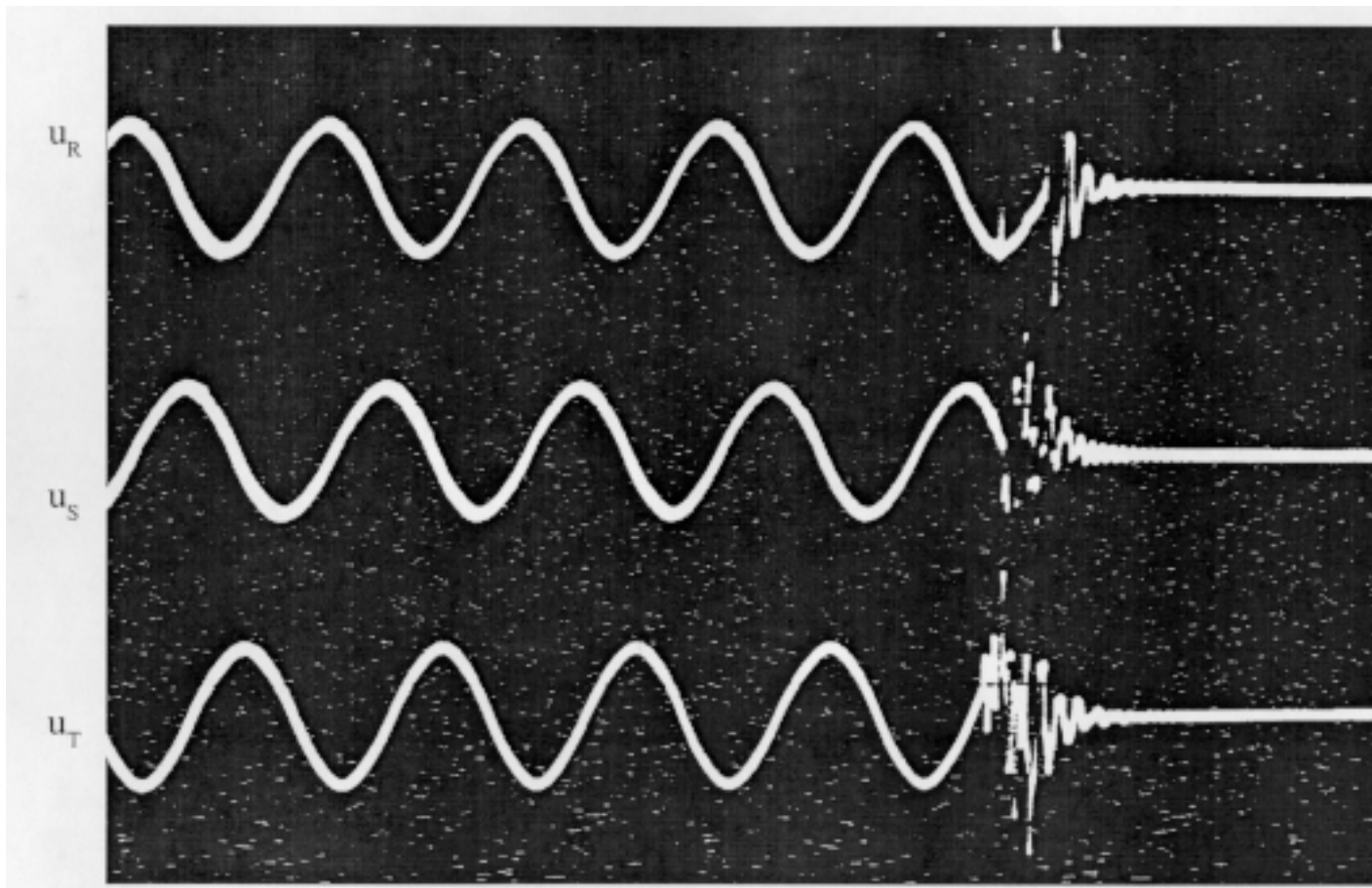
Извештај бр.37168, Институт "Никола Тесла" , Београд 1971.

ПРИЛОГ

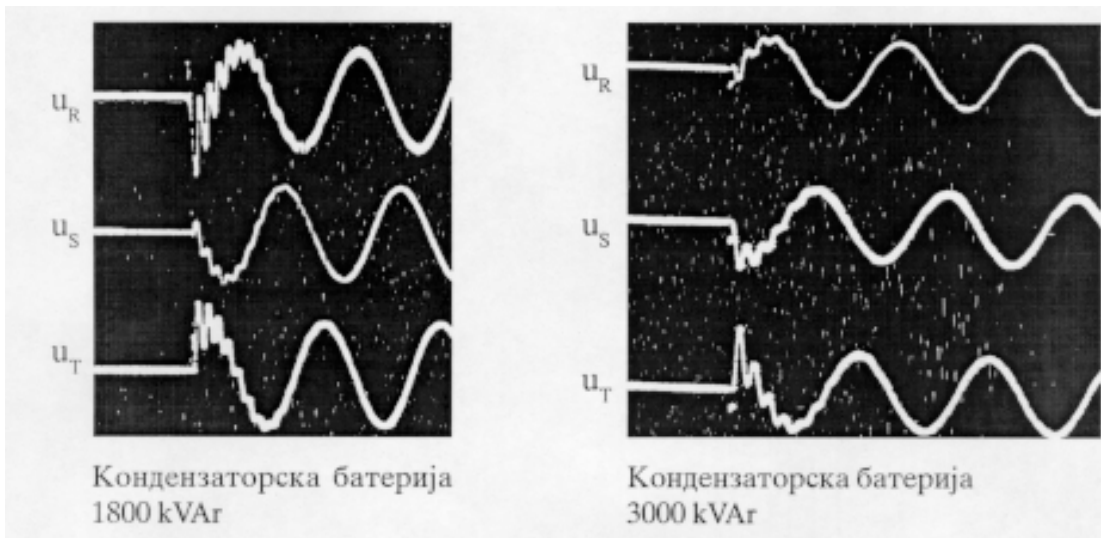
Табела 1

Резултати од истражувањата на преодните состојби при вклучување и исклучување на кондензаторските батерии

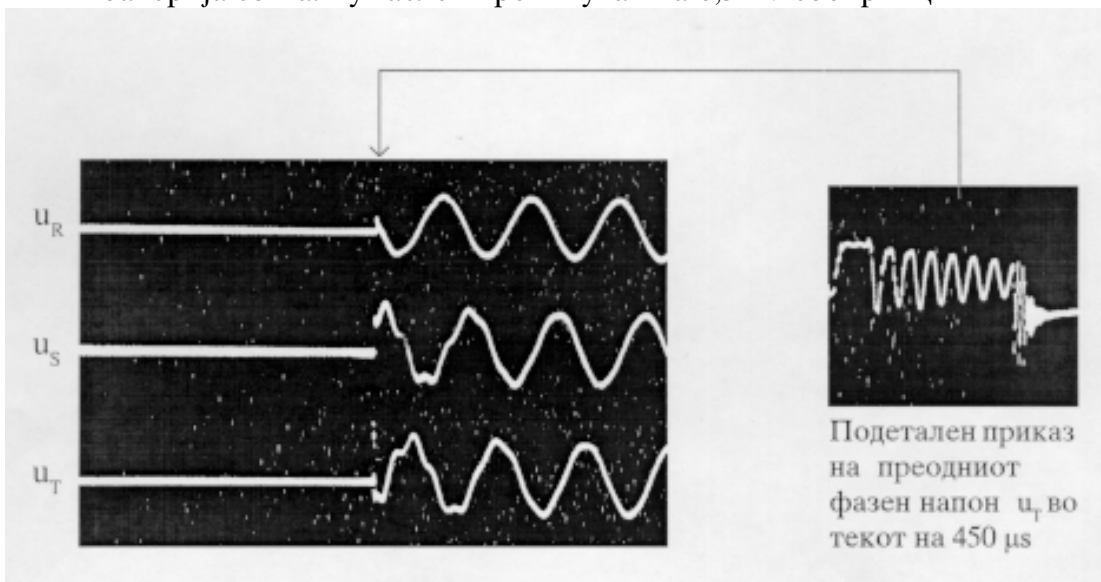
Ред. број	Напонско ниво (kV)	Прекинувач M- малкумасл. V-вакумски nt-нов тип st-стар тип	Кондензат. батерија која се вклучува- KB1 (kVAr)	Кондензат. батерија на собирниците KB (kVAr)	Број на циклуси U-I n	Коефициенти на пре напон				Вредност на ударните струи на вклучување		Број на исклучувања со повторно настанување на ел. лак η_{nl}
						Вклучување		Исклучување		I_{sr}	I_{max}	
						k_{sr}	k_{max}	k_{sr}	k_{max}	A_{tv}	A_{tv}	
1	5.25	M, nt	450	0	11	1,20	1,90	1,04	1,20	600	1100	0
2	5.25	M, nt	1350	0	12	1,31	1,95	1,07	1,30	1370	2150	0
3	5.25	M, nt	3600	0	6	1,33	1,90	1,11	1,35	2585	4500	0
4	5.25	M, nt	1800	1800	5	1,24	1,85	1,10	1,35	2150	3095	0
5	6	M, nt	1200	1200	10	1,21	1,60	1,03	1,40	2190	3450	1
6	6	M, nt	1200	6000	10	1,09	1,55	1,03	1,60	2690	3980	1
7	6	M, nt	1800	0	7	1,36	1,75	1,07	1,25	1435	2180	0
8	6	M, nt	1800	3000	5	1,30	1,60	1,06	1,25	1755	2835	0
9	6	M, nt	1800	7800	6	1,22	1,50	1,08	1,30	2385	4000	0
10	6	M, nt	3000	1800	5	1,44	1,70	1,10	1,35	2260	3500	0
11	6	M, nt	3000	6600	5	1,27	1,50	1,09	1,35	3165	4860	0
12	6.3	M, nt	3000	0	18	1,31	1,85	1,09	1,40	1600	2440	0
13	6.3	M, nt	3000	3000	11	1,17	1,35	1,09	1,35	2260	4200	0
14	15	M, st	3600	0	17	1,36	2,00	1,20	2,33	-	1600	9
15	15	M, st	3600	3600	9	1,14	1,33	1,14	1,60	-	3000	6
16	15	M, st	3600	6300	5	1,10	1,29	1,05	1,35	-	4500	5
17	6	V, st	4800	0	8	1,84	2,30	1,20	1,65	-	-	0
18	35	M, st	6300	0	13	2,27	3,85	1,55	4,05	-	-	11
19	35	M, st	6300	0	23	1,71	3,60	1,61	3,65	575	790	20



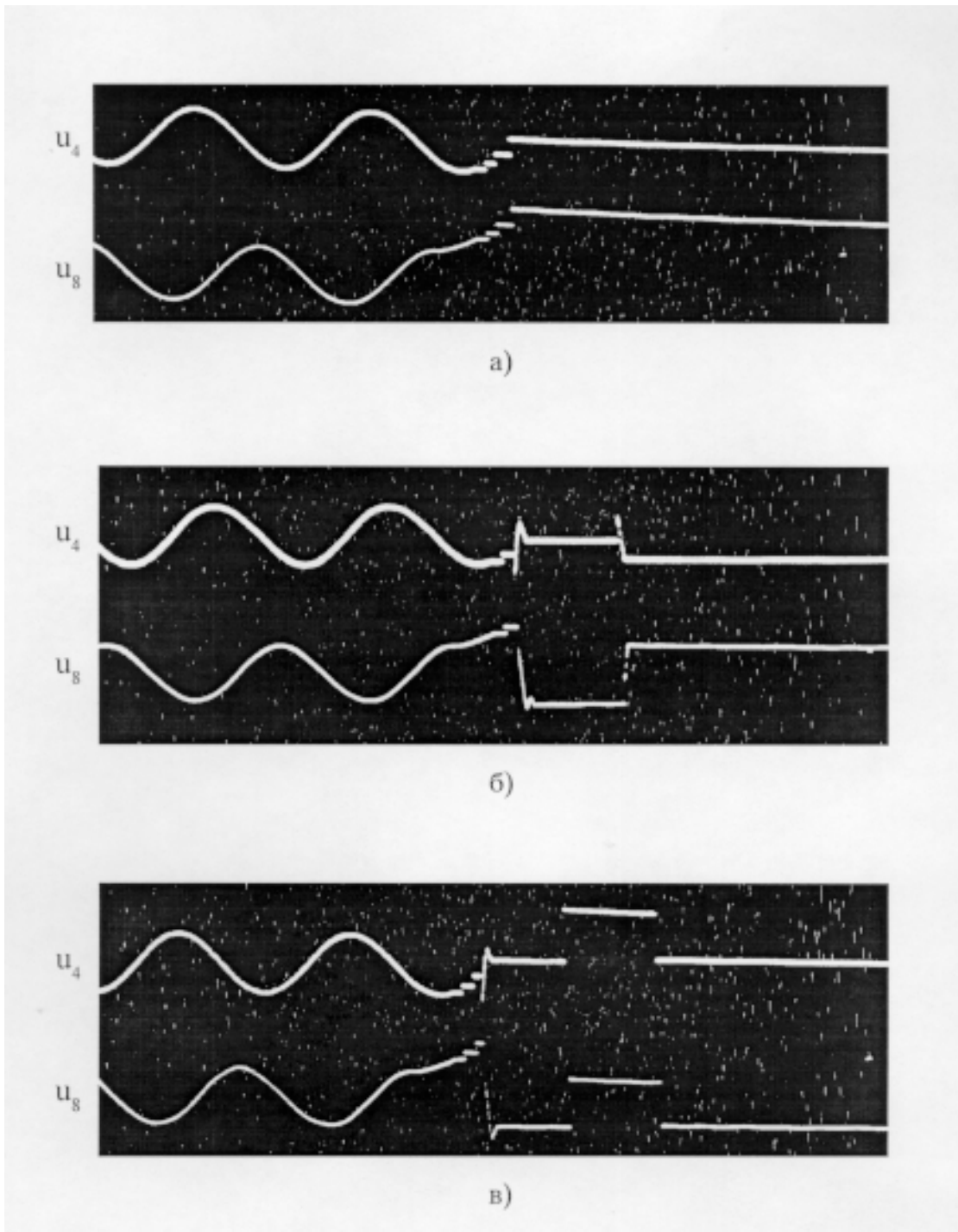
Осцилограм бр. 1 Преодните фазни напони u_R , u_S и u_T на влезот во кабловскиот одвод на 110 kV електроредукциона печка бр. 1 при нејзино исклучување под оптеретување од 22 MW со 110 kV пнеуматски прекинувач



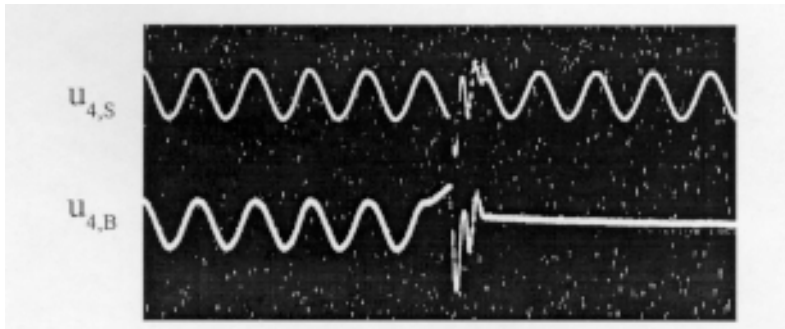
Сл. 1 Преодни фазни напони u_R , u_S и u_T при вклучување на кондензаторска батерија со малкумаслен прекинувач на 6,3 kV собирници



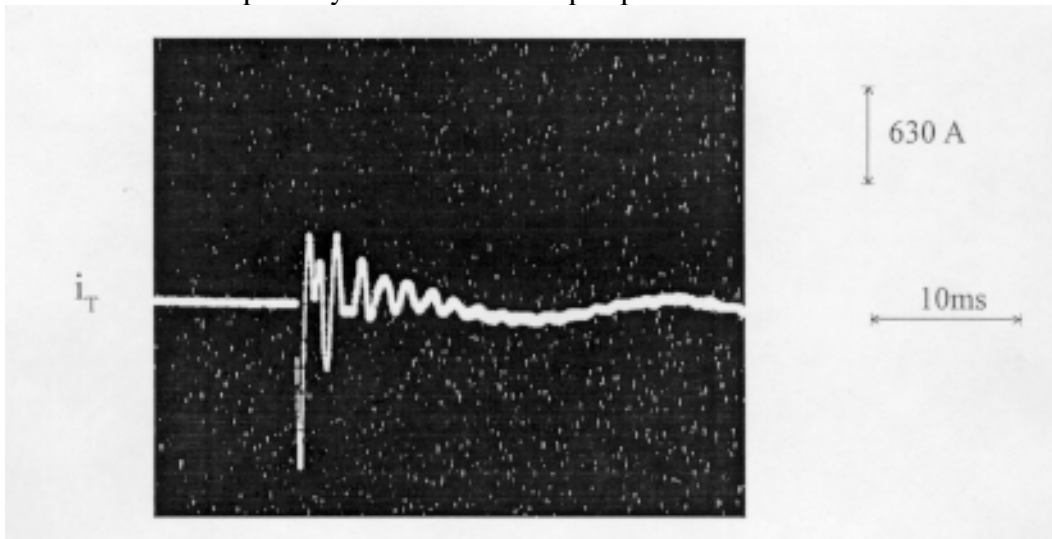
Сл. 2 Преодни фазни напони u_R , u_S и u_T при вклучување на кондензаторска батерија од 4800 kVAr со вакумски прекинувач на 6,3 kV собирници во Железарницата во Скопје



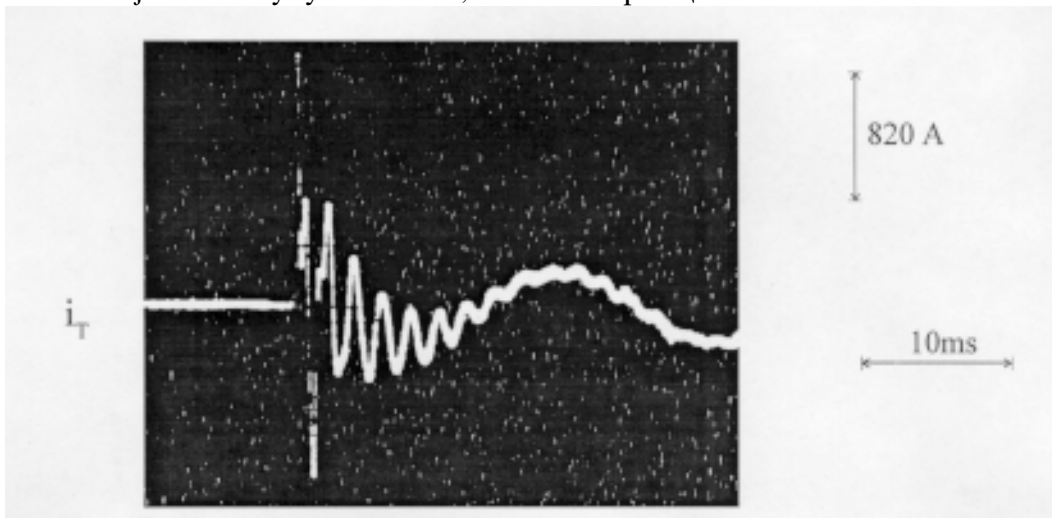
Сл.3 Преодни фазни напони u_4 и u_8 на приклучоците на кондензаторска батерија од 6300 kVAr за три случаја на нејзино исклучување со стар тип на малкумаслен прекинувач од 35 kVсобирници во ТС 110 kV / 35 kV кога се јавува појава наповеќекратно настанување на електричен лак помеѓу контактите на прекинувачот во сите три фази



Сл. 4 Преодни фазни напони на фазата 4 на 35 kV собирници - $u_{4,S}$ и на приклучоците на кондензаторската батерија од 6300 kVAr - $u_{4,B}$ при нејзино исклучување со стар тип на малкумаслен прекинувач кога се случува појава на повторно настанување на електричен лак помеѓу контактите на прекинувачот во сите три фази



Сл. 5 Преодна струја i_T на кондензаторската батерија од 450 kVAr при нејзино вклучување на 5,25 kV собирници



Сл. 6 Преодна струја i_T на кондензаторската батерија од 1350 kVAr при нејзино вклучување на 5,25 kV собирници