

## ЕЛИМИНИСАЊЕ ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ОСЦИЛАЦИЈА У СРЕДЊЕНАПОНСКОЈ МРЕЖИ ПРИ ЕКСТРЕМНО ПРОМЕНЉИВИМ ПАРАМЕТРИМА МРЕЖЕ

Драган РИСТИВОЈЕВИЋ, ЈП ЕПС Огранак РБ Колубара, Србија  
Слободан ДАМЊАНОВИЋ, ЈП ЕПС Огранак РБ Колубара, Србија

У условима великих промена конфигурације напајања, дужине кабловске и надземне мреже, броја трансформаторских јединица и њиховог појединачног и паралелног рада немогуће је предупредити настајање ферорезонансе у свим условима, класичним решењем – прикључењем отпорника одређене вредности отпора на крајеве отвореног троуглатерцијера једнополно изолованих напонских трансформатора. Искључивањем појединих водова ферорезонансне осцилације трају и продужава се хаваријско стање. Потребно је неизоставно елиминисати напајање напонских трансформатора јер је то једини начин повратка у стабилно стање са ниским вредностима електричних величина. Реализовано је и пар експеримената за сложени систем напајања.

Кључне речи: ферорезонанса, отпорник, напонски трансформатор

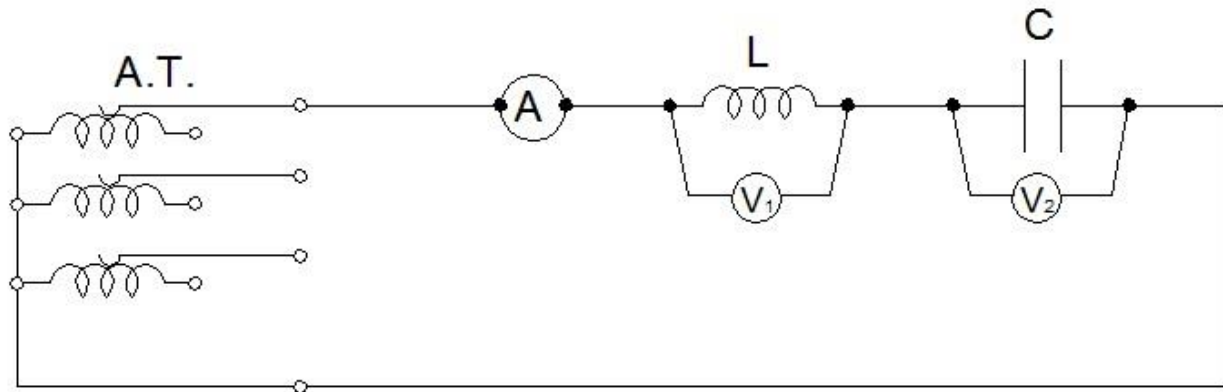
Eliminating of ferro resonant oscillation in the intermediate voltage area at extremely variable parameters branch  
When great changes of supply configuration, cable and over head net lengths, number of transformer units and their parallel operation are present, it is impossible to prevent occurring of ferro resonance in all conditions by classical solution – connecting of the resistor with a certain resistance at the end points of voltage transformers open triangle. Disconnecting of individual lines leads to ferro resonant oscillation continuation and unstable condition is prolonged. It is absolutely necessary to eliminate supply of voltage transformers, because it is the only way to recover stable state with low values of electrical parameters. A couple of experiments have been carried out for a complex supply system.

Key words: ferroresonance, resistor, voltage transformers

### 1. УВОД

Ферорезонансноосцилације у електроенергетском систему представљају проблем, који се генерално може решити, али само уз комплексно сагледавање ситуације у мрежи. Када су дужине каблова и надземних водова непроменљиве уз употребу одређеног броја једнополно изолованих напонских трансформатора, проблем се може решити употребом активне отпорности реда  $(25 - 40)\Omega$  коју би прикључили на крајеве отвореног троугла три једнополно изолована напонска трансформатора. У условима свакодневне промене и огромне динамике при напајању, где се ситуација и што се тиче кабловских дужина и броја трансформатора (енергетских и напонских) мења из часа у час, немогуће је анализирати конзум и предложити универзалну вредност отпорности, која би пригушила ферорезонансне осцилације у свим могућим случајевима. У мерној групи при техничком сектору Огранка РБ Колубара, извршен је велики број експеримената везаних за настанак редне ферорезонансе.

## 2. РЕЗУЛТАТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЊА У КОЛУ ПРИКАЗАНОМ НА СЛИЦИ 1



Слика1. Шема везе електричног кола у коме је реализована појава редне ферорезонансе

A. T. - Аутотрансформатор (0 - 45)V; 15A

A - Амперметар, који служи за праћење интензитета струје у колу, пре и након појаве ферорезонансних осцилација

V<sub>1</sub> - Волтметар за праћење напона на индуктивности – U<sub>L</sub>

V<sub>2</sub> - Волтметар за праћење напона на кондензаторској батерији – U<sub>C</sub>

L - Индуктивност секундара (терцијера) једнополно изолованог напонског трансформатора  $6000/\sqrt{3}/100/\sqrt{3}/100/3$  V

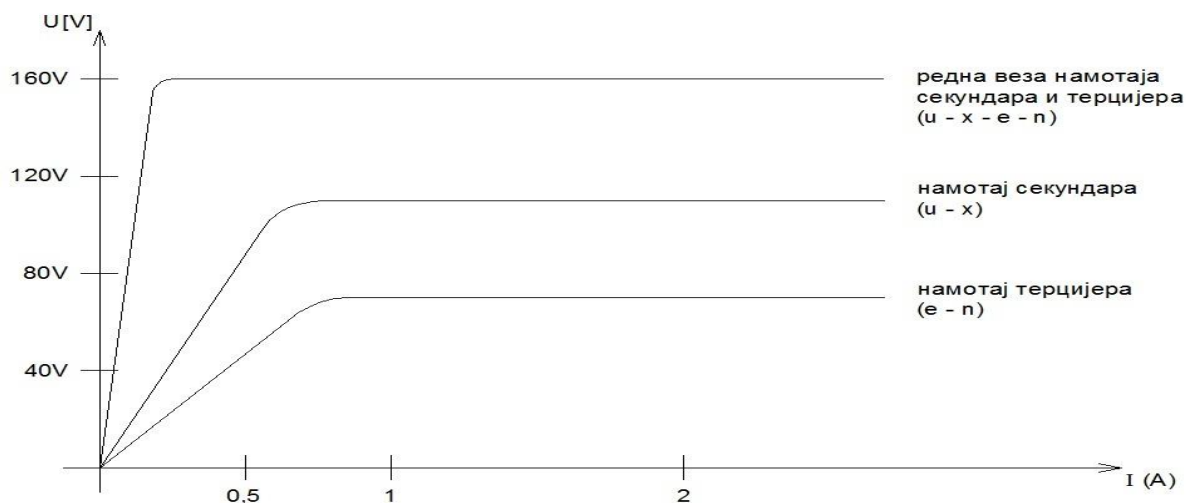
C - Капацитивност кондензаторске батерије (или више њих).

### 2.1. Карактеристика магнећења напонског трансформатора

Снимане су карактеристике магнећења секундара, терцијера и редно спојеног секундара и терцијера једнополно изолованог напонског трансформатора при кратком спајању крајева кондензаторске батерије уз задавање напона преко аутотрансформатора и читавање струје кроз коло. Циљ је био да се уочи утицај нагиба (стрмине) карактеристике магнећења на степен ферорезонансних осцилација, како би се констатовала разноликост појаве ферорезонансе (од благе ка веома радикалној, са разорним ефектима). Као што ће се видети, стрмина карактеристике магнећења игра веома значајну улогу у степену разорности и деградацији изолације напонских трансформатора у периоду настанка ферорезонансе.

Уочава се улазак у zasiћење при вредностима напона  $1,9 \times U_n$ , односно:

- За терцијерни намотај –  $33V \times 1,9 = 62,7V$
- За секундарни намотај –  $58V \times 1,9 = 110V$
- При редној вези секундарног и терцијерног намотаја –  $(33+58)V \times 1,9 = 172,9V$



Слика 2. Карактеристике магнећења секундара, терцијера и њихове редне везе једнополно изолованог напонског трансформатора 6000/√3/100/√3/100/3V.

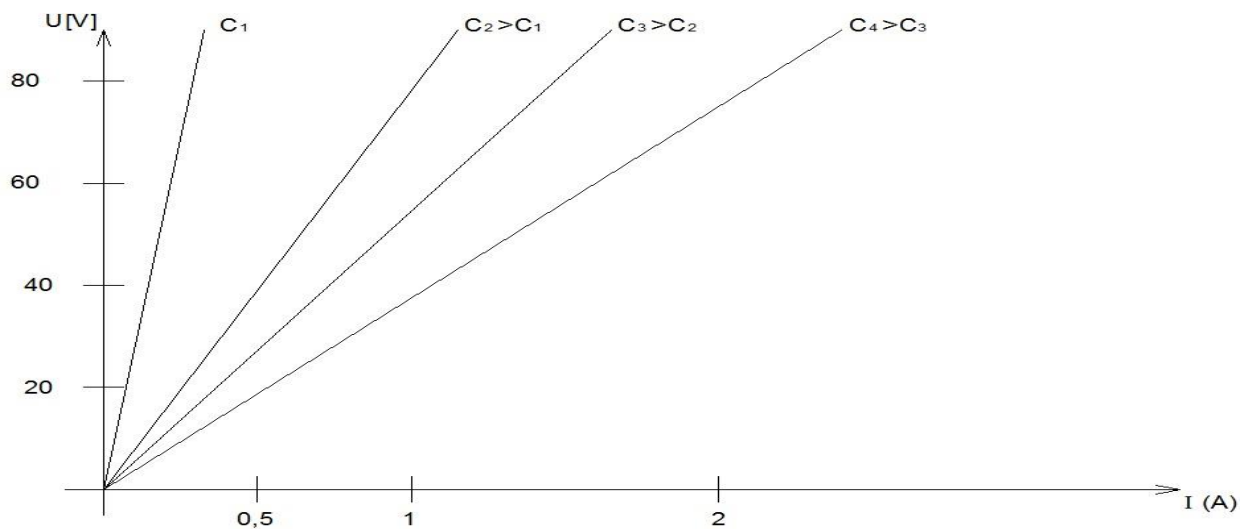
u-x-e-n

U (V)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160
I (mA)	5	7	8,2	8,6	8,9	9,2	9,4	10,1	10,8	11,9	13,1	16,3	19,9	24,8	29,3	2750

Табела 1. Напонско – струјна зависност при снимању карактеристике магнећења редне спреге секундарног и терцијерног намотаја напонског трансформатора

## 2.2. Напонско струјна карактеристика кондензаторских батерија

Кратким спајањем крајева индуктивног елемента (уз употребу неколико кондензаторских батерија), задавањем напона преко ауотрансформатора и мерењем струја кроз коло, добијају се напонско – струјне карактеристике сваке од кондензаторских батерија понаособ.



Слика 3. Карактеристика U-I за кондензаторске батерије различитих капацитивности .

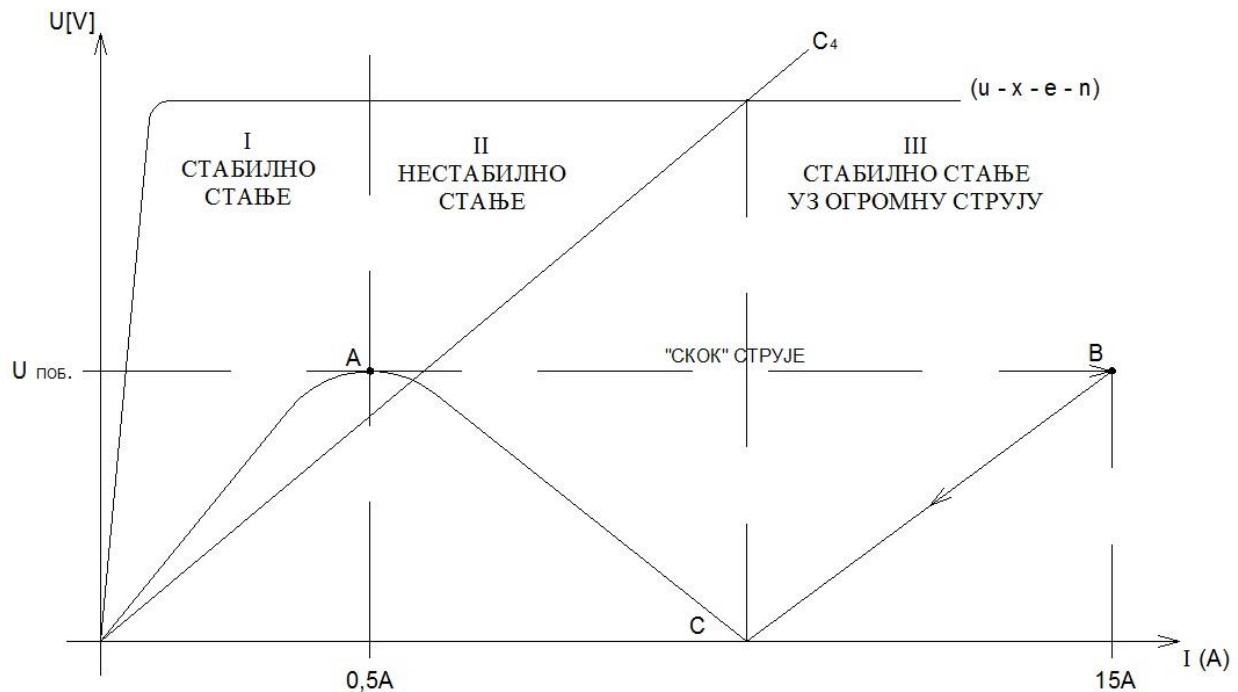
Табела 2. Напонско – струјна зависност карактеристике кондензаторских батерија

U (V) → 20V	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	C <sub>4</sub>
I (mA)	8,3	27,1	41,1	59,3

Види се да нагиб карактеристике зависи од вредности капацитивности и да је тим већи, што је капацитивност мања.

Експеримент је показао да најзначајнији „скок“ струје при настанку ферорезонансе, можемо очекивати за редну везу намотаја секундара и терцијера напонског трансформатора и употребу кондензатора  $C_4$ , чија је капацитивност највећа.

### 3. НАСТАНАК ФЕРОРЕЗОНАНСНИХ ОСЦИЛАЦИЈА



Слика 4. Посматрање  $U_L = f(I)$  и  $U_C = f(I)$ , њихов пресек и настајање ферорезонансе

Област I представља стабилно стање (са порастом напона, расте струја) са ниским интензитетом струје

Област II је нестабилно стање (са порастом напона, струја опада)

Област III је стабилно стање (са порастом напона, расте струја) са високим интензитетом струје

При подизању вредности напона аутотрансформатором, контролишу се напони на индуктивности и капацитивности, као и струја кроз коло. Запажамо да је  $U_L > U_C$  при стабилном стању I. Крива, на којој су приказане тачке А, В и С представљају графичку разлику  $|U_L - U_C|$ .

У тренутку када напон достигне вредност карактерисану тачком А (дакле, максимум криве  $|U_L - U_C|$ ), следи значајан скок струје са 0,5А на 15А, из стабилног у ново стабилно стање, али потпуно разорно за изолацију напонског трансформатора и његово термичко напрезање. Смањењем интензитета напона, нема скока уназад из тачке В ка тачки А, већ следи кретање из тачке В у тачку С, да би тек при скоро нултој вредности напона, уследио повратак у стабилно стање I.

Дакле, мора се напон смањити, скоро на нулту вредност, да би се изашло из ферорезонансних осцилација које карактерише константно виши интензитет напона на кондензаторским батеријама у односу на напон на индуктивности ( $U_C > U_L$ ).

Ово је, заправо, најважнији закључак, до којег је довео експеримент, а који отвара могућност реализације решења ферорезонансе у максимално променљивим погонским условима.

До ферорезонансе доводи одређена напонска промена, односно „скок“, који може бити (и најчешће је) изазван настанком земљоспоја, када напон на здравим фазама у изолованој мрежи достигне 1,73 пута већу вредност у односу на земљу. Уз напонски фактор једнополно изолованих напонских трансформатора од 1,9 уочава се рад близу такозваног колена карактеристике, односно засићења, када се индуктивност мења у дијапазону од скоро 1:1000. Дешава се, да земљоспојна заштита елиминише квар, али напонски трансформатори, остају у стању ферорезонансних осцилација и на тај начин после кратког времена прегоревају, уколико се ради о значајном степену напрезања.

Уколико би се реализовало њихово искључење са напајања и поново брзо укључење, појава би се изгубила, уз услов да је узрок (земљоспој) отклоњен.

При ферорезонанси, као и при земљоспоју, констатује се постојање напона  $U_0$  на крајевима отвореног троугла. Пренапонски реле би давао команду за искључење прекидача преко којег се напонски трансформатори напајају и то након пар секунди од уочавања појаве. На тај начин би била искључена могућност дужег термичког напрезања напонских трансформатора, које би се имало при ферорезонансним осцилацијама.

Јасно је да настанак земљоспоја, на било којем изводу, у изолованој мрежи доприноси повећању напона  $\sqrt{3}$  пута, здравих фаза у односу на земљу. Самим тим, могућа је ферорезонанса због засићења магнетног кола напонских трансформатора, односно значајне промене индуктивности.

С друге стране, при ферорезонанси, напон на доземним капацитивностима постаје радикално виши ( $U_C > U_L$ ) и могуће је да дође до додатних пробоја на местима ослабљене изолације, односно нових земљоспојева.

Земљоспој изазива ферорезонансу, а изгледа да је и обратно.

Ферорезонанса може у неким специфичним околностима настати и као продукт узајамног дејства одређене капацитивности развода и нелинеарне индуктивности енергетског трансформатора, мада је ова појава доста ређа. Углавном су у питању нелинеарне индуктивности напонских трансформатора у комбинацији са капацитивношћу.

Наведену појаву би могли изазвати следећи услови:

- прекид фазног проводника
- прекид фазног проводника уз спој са земљом на једној, или обе стране
- проблеми са половима прекидача (не укључује пол или два...)

Истраживања која је спроводио Институт Никола Тесла су показала да постоје следеће врсте ферорезонансе:

- трохармонијска (150 Hz)
- двохармонијска (100 Hz)
- хармонијска (50 Hz)
- субхармонијска (25 Hz)

Сматра се да прве три врсте ферорезонансе, може пригушити отпорник на крајевима отвореног троугла терцијера напонских трансформатора вредности  $(25 - 40)\Omega$ ; 400W.

Субхармонијска компонента ферорезонансе би се могла пригушити отпорником  $(3-6)\Omega$ , што би изазвало термичко напрезање напонских трансформатора, чија струја терцијера износи  $I_n=6A$ , а у колу отвореног

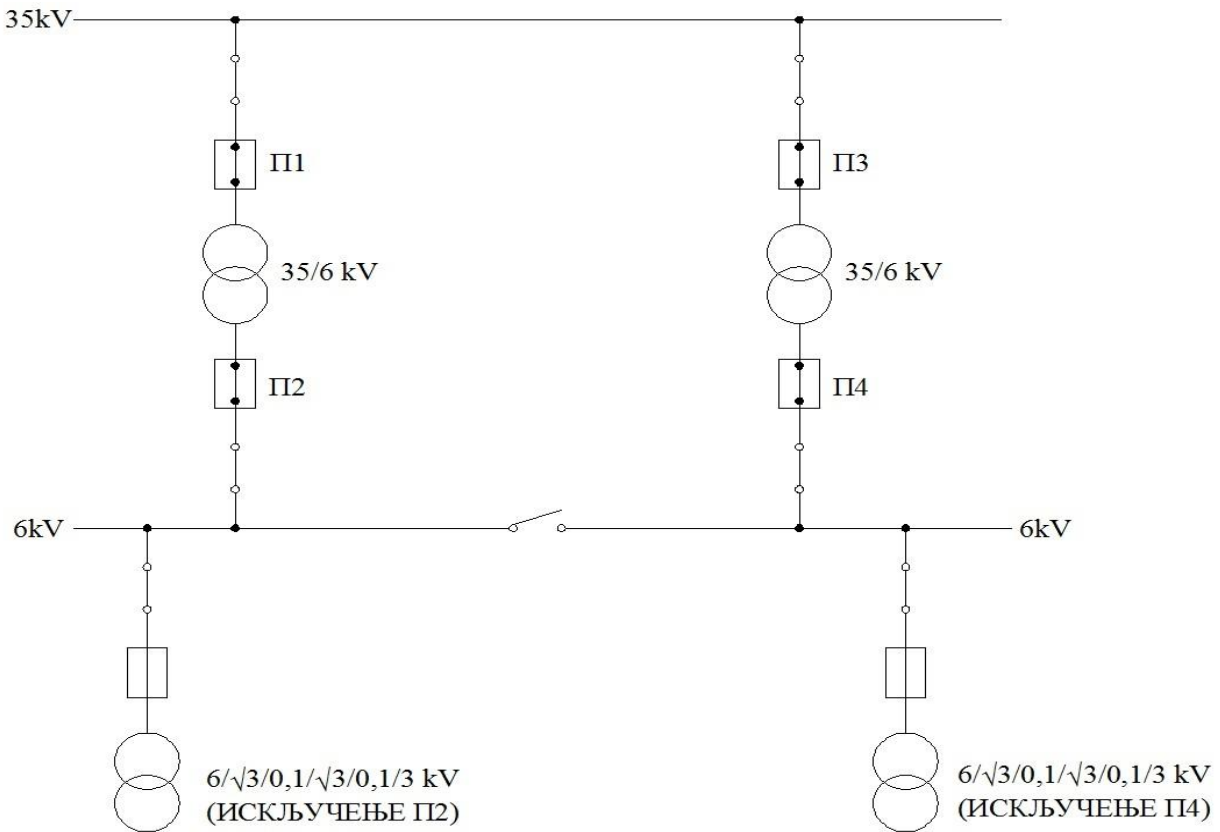
троугла би имали  $I = \frac{100V}{(3-6)\Omega} \gg I_n$ .

Морало би се размишљати о краткотрајном укључењу отпорника, а затим његовом искључењу.

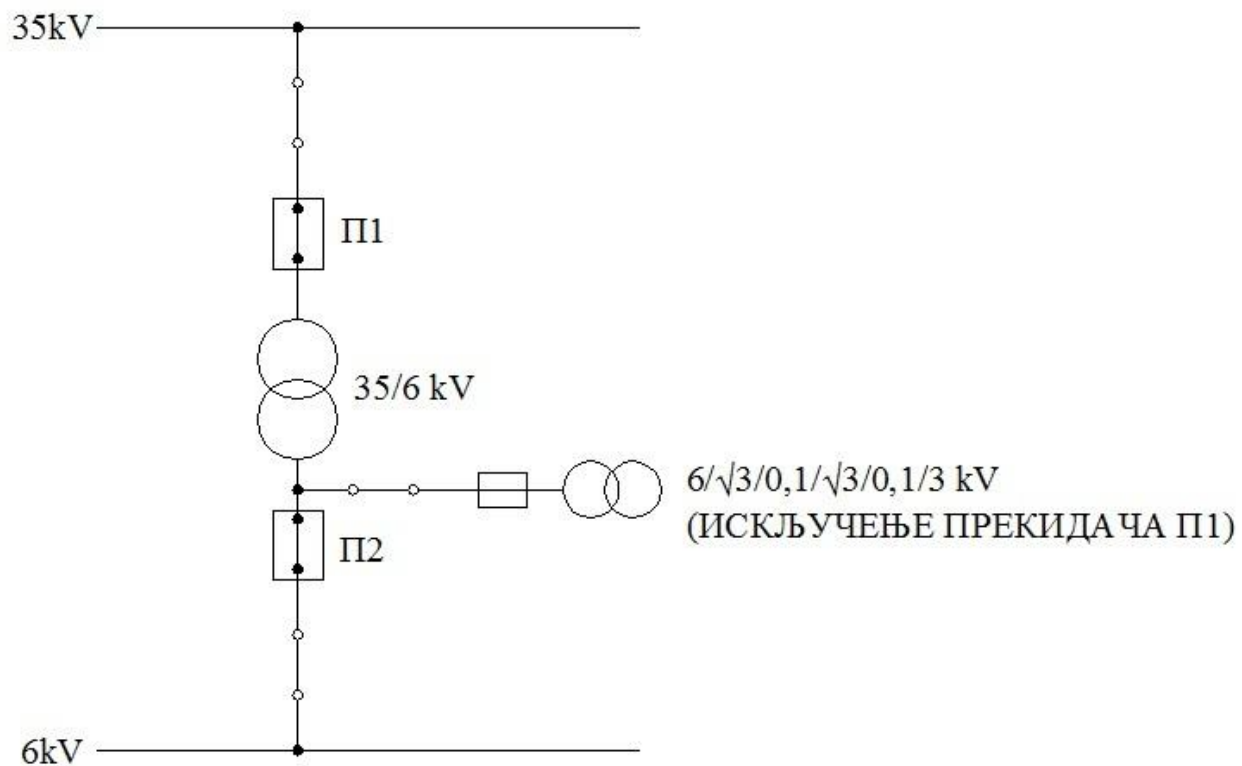
То би се могло реализовати преко филтера субхармонијске компоненте ( $f=25Hz$ ).

#### 4. НАЧИНИ ПРИКЉУЧЕЊА ЈЕДНОПОЛНО ИЗОЛОВАНИХ НАПОНСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА

Напонски трансформатори на примарној страни имају по правилу осигураче номиналне струје (2-4)Аи напајају се често преко класичног растављача, тако да налог за њихово искључење са мреже мора бити реализовано преко најближег прекидача.

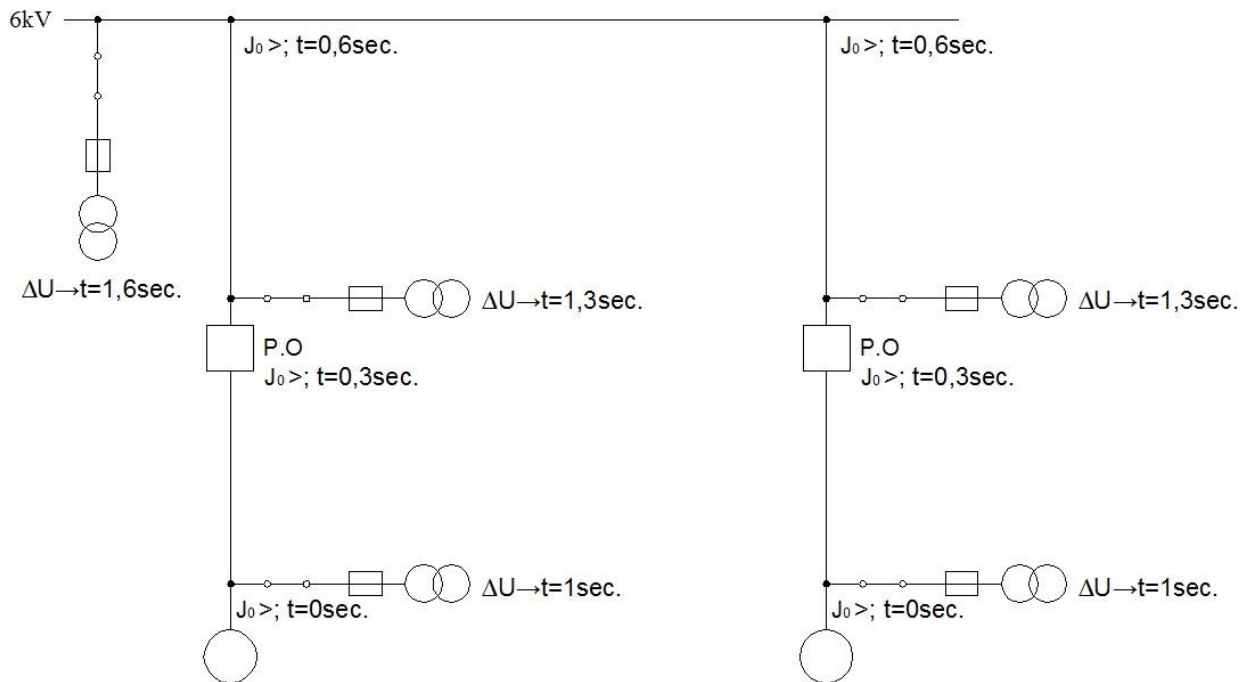


Слика 5. Пример деловања пренапонске заштите на искључење прекидача П2 и П4



**Слика 6.** Када су напонски трансформатори, директно на секундарној страни енергетског трансформатора, пренапонска заштита делује на искључење прекидача П1.

Када су напонски трансформатори на сабирницама 6kV, а два енергетска трансформатора раде паралелно, одржавање напона на отвореном троуглу намотаја терцијера (појава ферорезонансе), након елиминисања земљоспоја активирало би оба прекидача секундарног енергетског трансформатора.



**Слика 7.** Комбинација селективног деловања усмерене земљоспојне заштите и елиминација постојеће ферорезонансе пренапонском заштитом  $\Delta U$  ( $t_{\Delta U} > t_{j_0 > \max}$ )

Усмерена земљоспојна заштита, би требало да селективно делује у зависности од места квара за  $t=0s$ ;  $t=0,3s$  или  $t=0,6s$ , како се види на слици 7

Уколико се земљоспој елиминише (искључи), а на напонским трансформаторима настане ферорезонанса, они се искључују, активирањем прекидача испред за  $t > 0,6s$  (односно: 1,0 s; 1,3 s и 1,6 s).

Искључење напајања напонских трансформатора изазива, додуше, застоје у производно-технолошком процесу, чије трајање би требало да буде што краће.

С друге стране за разгранату и веома променљиву конфигурацију мреже, једини начин да се спрече погубне последице ферорезонансних осцилација је краткотрајно искључење напонских трансформатора. Тада они са сигурношћу излазе из опасног радног стања (права ВС на карактеристици датај на слици 4).

Наравно сви напонски трансформатори морају имати отпорник (25-40) $\Omega$ , прикључен на крајеве отвореног троугла, чија улога је спречавање ферорезонансних осцилација за велику већину конфигурација.

## 5. ЗАКЉУЧАК

Искуство је показало да непостоји универзална вредност отпорности, прикључена у коло терцијера једнополно изолованих напонских трансформатора која би покрила комплетну комплексност појаве ферорезонансе.

На површинским коповима Огранка РБ Колубара, бележи се упркос постојању отпорника, учестало и радикално прегоривање (комплетно оштећење магнетног кола) напонских трансформатора, чији је напонски фактор 1,9. Они су предвиђени да поднесу трајање земљоспоја од 8h. Ипак ферорезонансне осцилације су



квалитативно, нешто сасвим друго и време издржљивости, изолације напонских трансформатора, зависи од нивоа „скока“ из једног у друго стабилно стање.

У оквиру постројења која су у SF6 техници, замена прегорелих напонских трансформатора, представља велики проблем и не може се извршити без значајне интервенције која траје прилично дуго.

Зато је од великог значаја спречавање прегоривања напонских трансформатора услед насталих ферорезонансних осцилација.

Искуство говори, да не постоји универзалније решење од краткотрајног искључења напајања, чиме се остварује повратак у стабилно стање I, које се одликује малим интензитетом струје у колу.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Љубиша Миланковић - Техника високог напона
2. Петар Вукелџа - Студија број 328002: Пренапони на разводима средњег напона за сопствене потребе термоелектрана, посебно на ВН моторима при раду прекидача