

2. Преодни процеси во еднофазни кола

Пример 2.1. Во една трафостаница на 110 kV собирници доаѓа до трифазна куса врска. Трафостаницата е доволно далеку од генераторите во системот така што може да се смета дека еквивалентната реактанција за директен систем не се менува со текот на времето (нема разлика помеѓу субтранзиентен, транзиентен и траен период). Вредноста на струјата на куса врска во трајниот период изнесува $I_{K3} = 10$ kA и е познато дека односот помеѓу активниот отпор и реактанцијата во системот изнесува $X/R = 3,5$. Да се нацрта обликот на струјата на куса врска за првите 5 периоди за случаите кога кусата врска настанува во момент кога вредноста на напонот е еднаква на

а) нула,

б) половина од максималната вредност на напонот,

в) максималната вредност на напонот,

За сите три случаи да се одреди максималната (ударната) вредност на струјата.

Решение

Вредноста на струјата на трифазна куса врска изнесува

$$I_{K3} = \frac{U_n}{\sqrt{3}X}, \quad (2.1)$$

од каде што следува

$$X = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{K3}} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 10} = 6,351 \, \Omega. \quad (2.2)$$

Од условот на задачата за активната отпорност на системот добиваме

$$R = \frac{X}{3,5} = 1,815 \, \Omega, \quad (2.3)$$

додека за индуктивноста на калемот чија што реактанција изнесува X добиваме

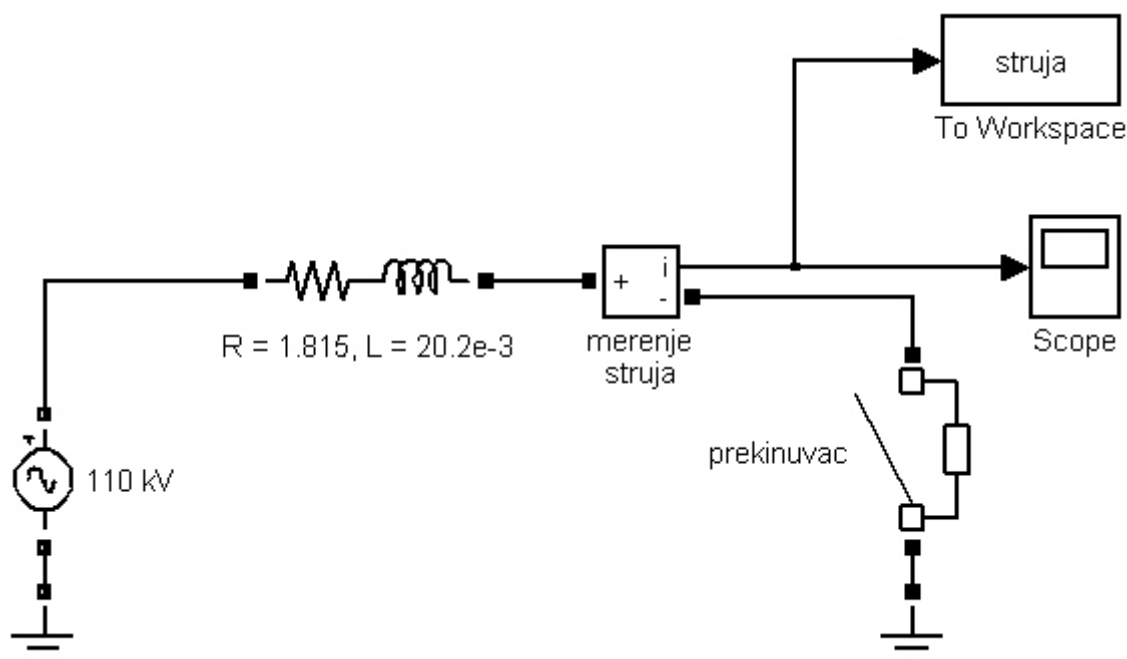
$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{6,351}{100\pi} = 20,2 \, \text{mH}. \quad (2.4)$$

Моделот на колото според кое што ќе ја симулираме појавата на куса врска е Primer2_1.mdl и неговиот изглед е даден сликата 2.1. Колото е составено од една RLC гранка од типот RL чии што параметри се пресметани со (2.3) и (2.4). Напонскиот генератор е со фреквенција од 50 Hz, фазен агол еднаков на нула и максимална вредност на напонот еднаква на $110e3/\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$. Со последниот израз прво е пресметан фазниот напон (делење со $\sqrt{3}$) знаејќи дека линискиот е 110 kV (110e3), а потоа е помножено со $\sqrt{2}$ за да се добие неговата максимална вредност.

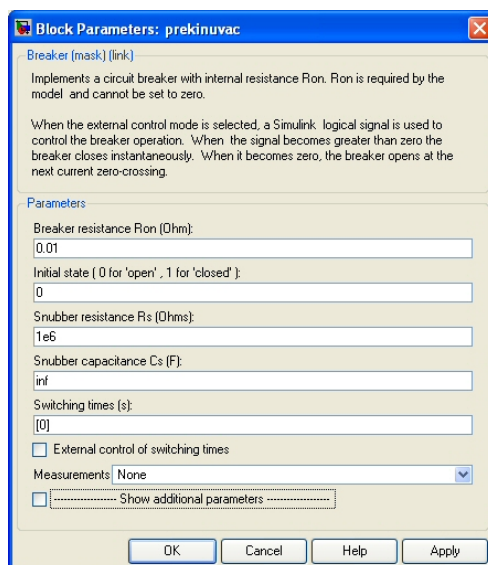
Прекинувачот кој што е вметнат во колото се наоѓа во Elements во SimPowerSystems. Тој во овој случај мора да има паралелен отпорник со него затоа што се наоѓа во серија со калем. Вредноста на тој отпорник се внесува во полето Snubber resistance и таа обично е голема вредност која што тука е еднаква на 1 MΩ. Со двојно кликување врз него се добива дијалогот од сликата 2.2 каде што се задени параметрите на прекинувачот. Како што се гледа на сликата опцијата Extern control of switching times не е селектирана со што ни се дава можност сами да зададеме времиња во кои што прекинувачот ќе ја промени својата состојба. Почетната состојба на прекинувачот се задава во полето Initial state (во овој случај тоа е 0, што значи дека тој е исклучен) додека временските моменти во кои што тој ќе ја промени состојбата се дадени во полето Switching times каде што се задава вектор со временски моменти во

секунди. Тука е зададен векторот $[0]$ што значи дека прекинувачот само еднаш ќе ја промени својата состојба и тоа во времето $t = 0$ s. Доколку на пример сакавме тој да се исклучи во моментот $t = 0,12$ s тогаш ќе требаше да го зададеме следниот вектор $[0 \ 0.12]$. За случајот под б) го задаваме векторот $[0.02/12]$ затоа што напонот ја постигнува половината од својата вредност на $1/12$ од периодата ($\arcsin(0,5) = 30^\circ$, што е $1/12$ од 360°), додека за случајот под в) го задаваме векторот $[0.02/4]$ затоа што максималната вредност на напонот се постигнува на $1/4$ од периодата.

Бидејќи се бара обликот на струјата да го добиеме за првите 5 периоди за крајното време на симулацијата внесуваме 0.1 (5×0.02 s), а бараниот резултат го прикажуваме на осцилоскоп и го праќаме во работниот простор во MATLAB во променливата *struja* при што кај Save format е избрано Array.



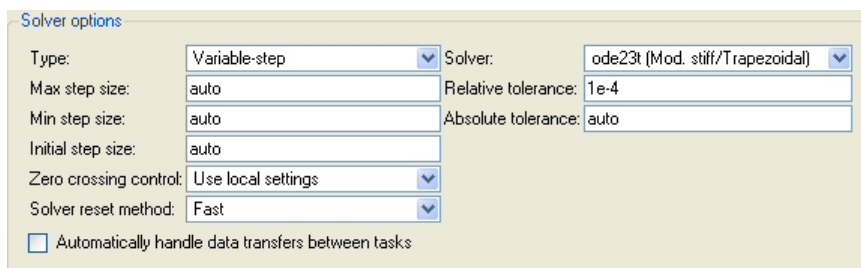
Слика 2.1. Модел за симулација на трифазна куса врска



Слика 2.2. Параметри на блокот за прекинувач

Во колата кои што содржат прекинувачи препорачливо е да се користи методата `ode23t` за решавање на преодниот процес. За тоа да го направиме е потребно од прозорецот `Primer2_1.mdl` од менито `Simulation` да избереме `Configuration parameters` со што ја добиваме сликата 2.3 каде што во полето `Solver` избираме `ode23t`. Во спротивно во командниот простор во MATLAB ќе ја добиеме следната порака:

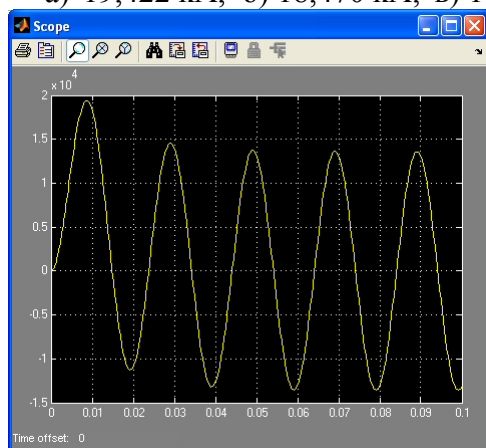
Warning: You have required continuous-time simulation of a system containing switches or nonlinear elements. The `ode23t` variable-step stiff solver is recommended in order to get best accuracy and simulation performance. ...



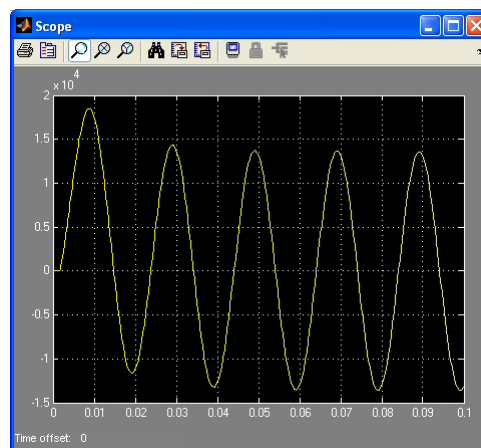
Слика 2.3. Избор на метод за решавање на преодниот процес

Резултатите од симулацијата се прикажани на сликата 2.4, додека бараните максимални вредности на струјата можеме да ги добиеме со пишување на наредбата `max(abs(struja))` во командниот простор во MATLAB со што добиваме

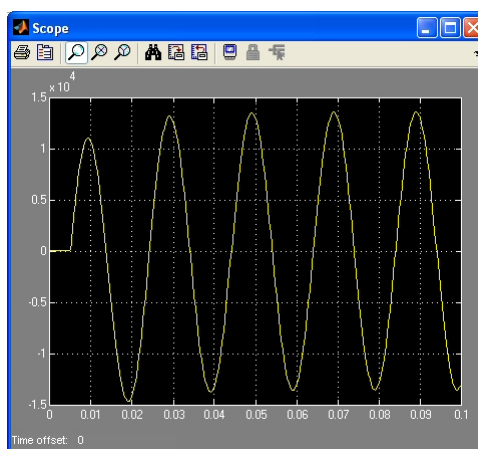
а) 19,422 kA, б) 18,470 kA, в) 14,636 kA.



а)



б)

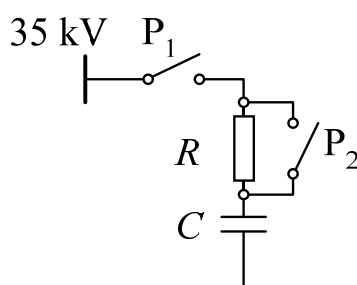


в)

Слика 2.4. Облици на струјата на куса врска

Пример 2.2. Во една трафостаница на 35 kV се вклучува кондензаторска батерија со номинална моќност од 18 MVA. Вредноста на струјата на куса врска во трафостаницата изнесува $I_{K3} = 25$ kA и е познато дека односот помеѓу активниот отпор и реактанцијата во системот изнесува $X/R = 1$. Кондензаторската батерија се вклучува со помош на прекинувачот P_1 преку отпорникот R во моментот кога напонот во трафостаницата има максимална вредност. По време од 0,1 s прекинувачот P_2 се затвора со што отпорникот се премостува и кондензаторската батерија е директно приклучена на напон (слика 2.5). Да се одреди обликот на струјата и напонот на кондензаторот за првите 10 периоди, како и нивните максимални вредности за случаите кога отпорноста на отпорникот изнесува

- а) 30 Ω ,
- б) 0 Ω .



Слика 2.5. Приклучување на кондензатор преку отпорник

Решение

Еквивалентната реактанција на системот преку кој што се напојува трафостаницата е

$$X = \frac{U_n}{\sqrt{3}I_{K3}} = \frac{35}{\sqrt{3} \cdot 25} = 0,808 \Omega. \quad (2.5)$$

додека за индуктивноста на калемот чија што реактанција изнесува X добиваме

$$L = \frac{X}{\omega} = \frac{0,808}{100\pi} = 2,6 \text{ mH}. \quad (2.6)$$

Од условот на задачата за активната отпорност на системот добиваме

$$R = X = 0,808 \Omega. \quad (2.7)$$

Номиналната реактивна моќност на кондензаторската батерија можеме да ја пресметаме на следниот начин

$$Q = 3\omega C \left(\frac{U_n}{\sqrt{3}} \right)^2 = \omega C U_n^2, \quad (2.8)$$

од каде што следува

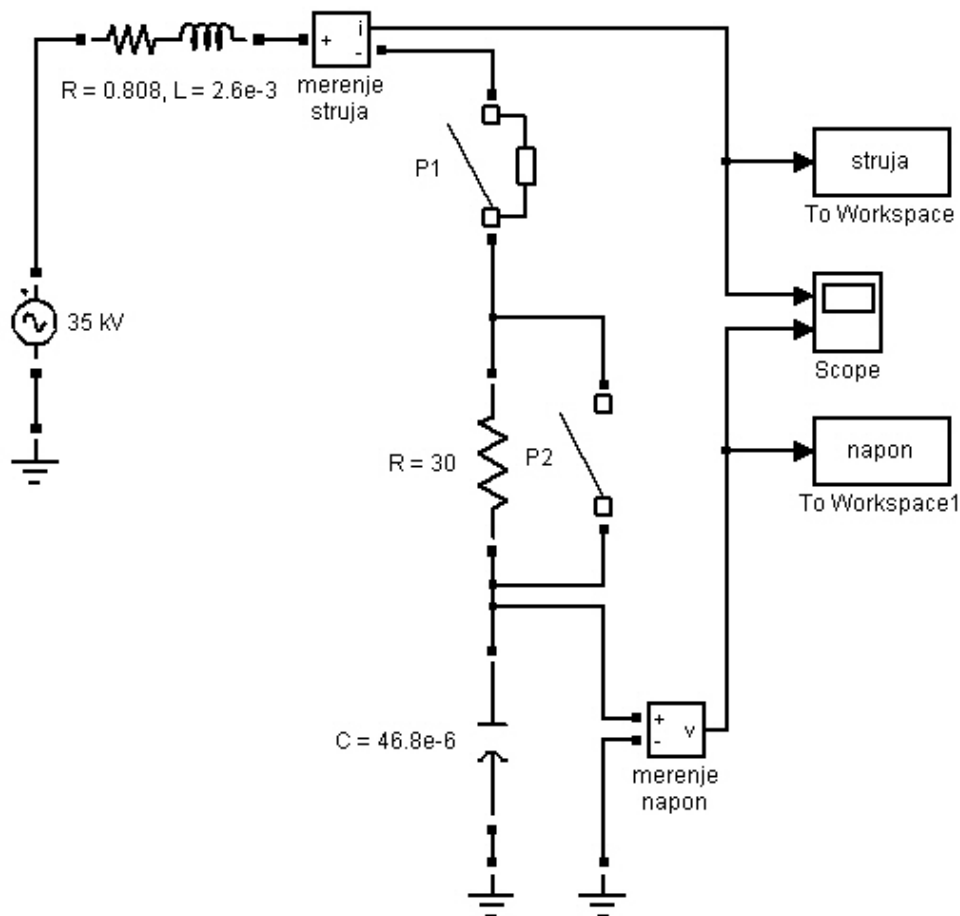
$$C = \frac{Q}{\omega U_n^2} = \frac{18}{100\pi \cdot 35^2} = 46,8 \mu\text{F}. \quad (2.9)$$

Моделот на колото според кое што ќе го симулираме вклучувањето на кондензаторската батерија е Primer2_2.mdl и неговиот изглед е даден на сликата 2.6. Параметрите на пасивните елементи во колото се претходно дадени или пресметани додека напонскиот генератор е со фреквенција од 50 Hz, фазен агол еднаков на нула и максимална вредност на напонот еднаква на $35e3/\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$.

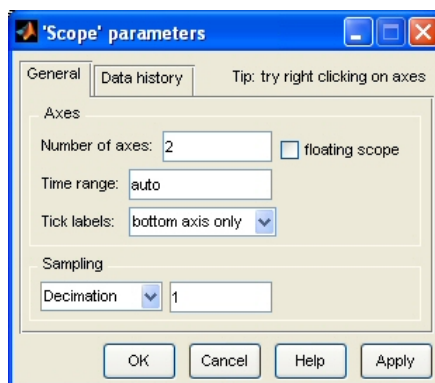
Почетната состојба на двата прекинувачи е 0, додека временските моменти во кои што тие ќе ја променат состојбата се $[0.02/4]$ за прекинувачот P_1 и $[0.02/4+0.1]$ за прекинувачот P_2 .

Бидејќи се бара обликот на струјата да го добиеме за првите 10 периоди за крајното време на симулацијата внесуваме 0.2 (10×0.02 s), а бараниот резултат го прикажуваме на осцилоскоп и го праќаме во работниот простор во MATLAB во променливите *struja* и *napon* при што кај *Save format* е избрано *Array*.

Во овој случај осцилокопот има два влеза. За тоа да го постигнеме на прозорецот од осцилокопот кликуваме на иконата  (втора од лево) со што го добиваме прозорецот од сликата 2.7 каде што во полето *Number of axes* внесуваме 2.



Слика 2.6. Модел за симулација на вклучување на кондензаторска батерија



Слика 2.7. Дефинирање повеќе оски на еден осцилоскоп (повеќе влезови)

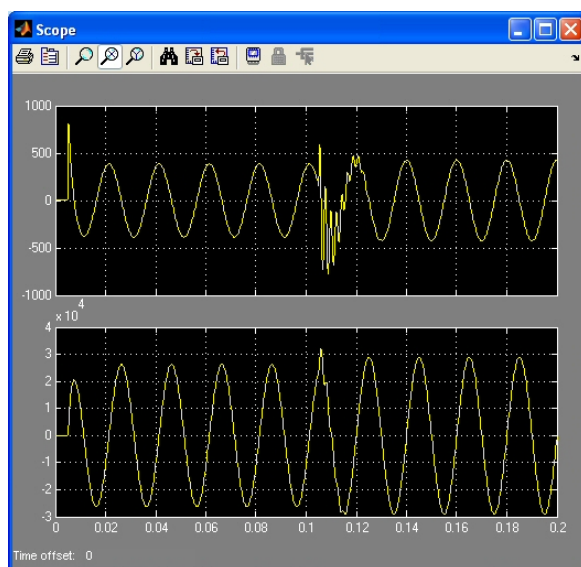
Случајот под б) можеме да го симулираме со истото коло од сликата 2.6 со тоа што во него за вредноста на отпорникот R ќе внесеме многу мала вредност како на пример $30\text{e-}5$.

Резултатите од симулацијата се прикажани на сликите 2.8 и 2.9, додека бараните максимални вредности на струјата можеме да ги добиеме со пишување на наредбата $\max(\text{abs}(\text{struja}))$ и $\max(\text{abs}(\text{napon}))$ во командниот простор во MATLAB со што добиваме

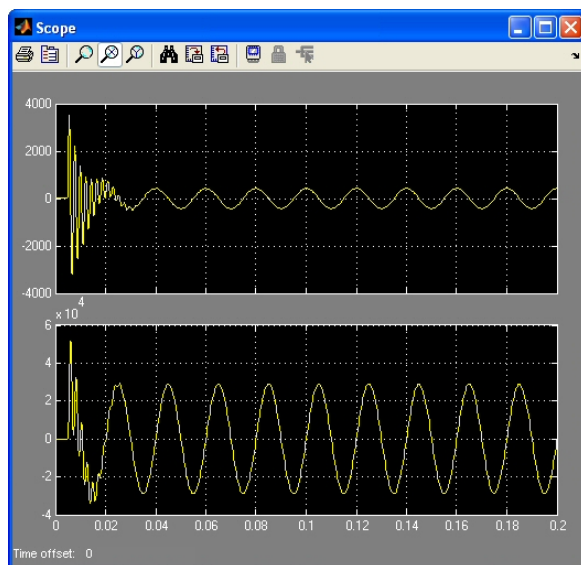
а) 814 А и 31,998 kV, б) 3503 А и 51,689 kV.

Во случајот под а) се забележува уште еден преоден процес во моментот кога се затвора прекинувачот P_2 и тоа со доста поголема фреквенција во однос на основната, додека во случајот под б) високофреквентниот преоден процес е на самиот почеток веднаш по вклучувањето на прекинувачот P_1 . Фреквенцијата со која што се одвива преодниот процес изнесува

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{2,6 \cdot 10^{-3} \cdot 46,8 \cdot 10^{-6}}} = 456 \text{ Hz}.$$



Слика 2.8. Струја и напон на кондензаторот за случајот а) $R = 30 \Omega$



Слика 2.9. Струја и напон на кондензаторот за случајот б) $R = 0 \Omega$

Максималната вредност на номиналната струја во кондензаторот изнесува

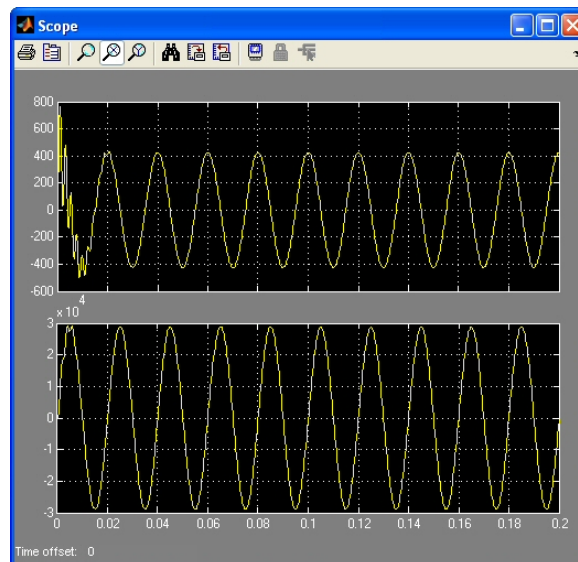
$$I_{n,\max} = \sqrt{2} \frac{Q}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \sqrt{2} \frac{18000}{\sqrt{3} \cdot 35} = 420 \text{ A},$$

додека максималната вредност на номиналниот напонот на кондензаторот е

$$U_{n,\max} = \sqrt{2} \frac{U_n}{\sqrt{3}} = \sqrt{2} \frac{35}{\sqrt{3}} = 28,577 \text{ kV}.$$

Според тоа во случајот под а) максималната вредност на струјата во преодниот процес е 1,94 пати поголема од номиналната, додека максималната вредност на напонот е 12% поголема од номиналната. Во случајот под б) максималната вредност на струјата е 8,34 пати поголема од номиналната, додека максималната вредност на напонот е 81% поголема од номиналната.

Еден од начините да се избегне големата струја при вклучување на кондензаторската батерија без примена на отпорник е да се изврши контролирано вклучување на прекинувачот P_1 во моментот кога напонот на собирниците во трафостаницата е 0. За да го симулираме таквиот начин на пуштање во векторот со временските моменти во кои прекинувачот P_1 ќе ја ја промени состојбата внесуваме [0] бидејќи во тој момент напонот има вредност 0. Резултатот од симулацијата е прикажан на сликата 2.10 а максималните вредности на струјата и напонот изнесуваат 760 A (3,2 пати поголема од номиналната) и 29,039 kV (2% поголем од номиналниот).



Слика 2.10. Струја и напон на кондензаторот за случајот кога тој се вклучува без отпорник во момент кога напонот на собирниците е нула

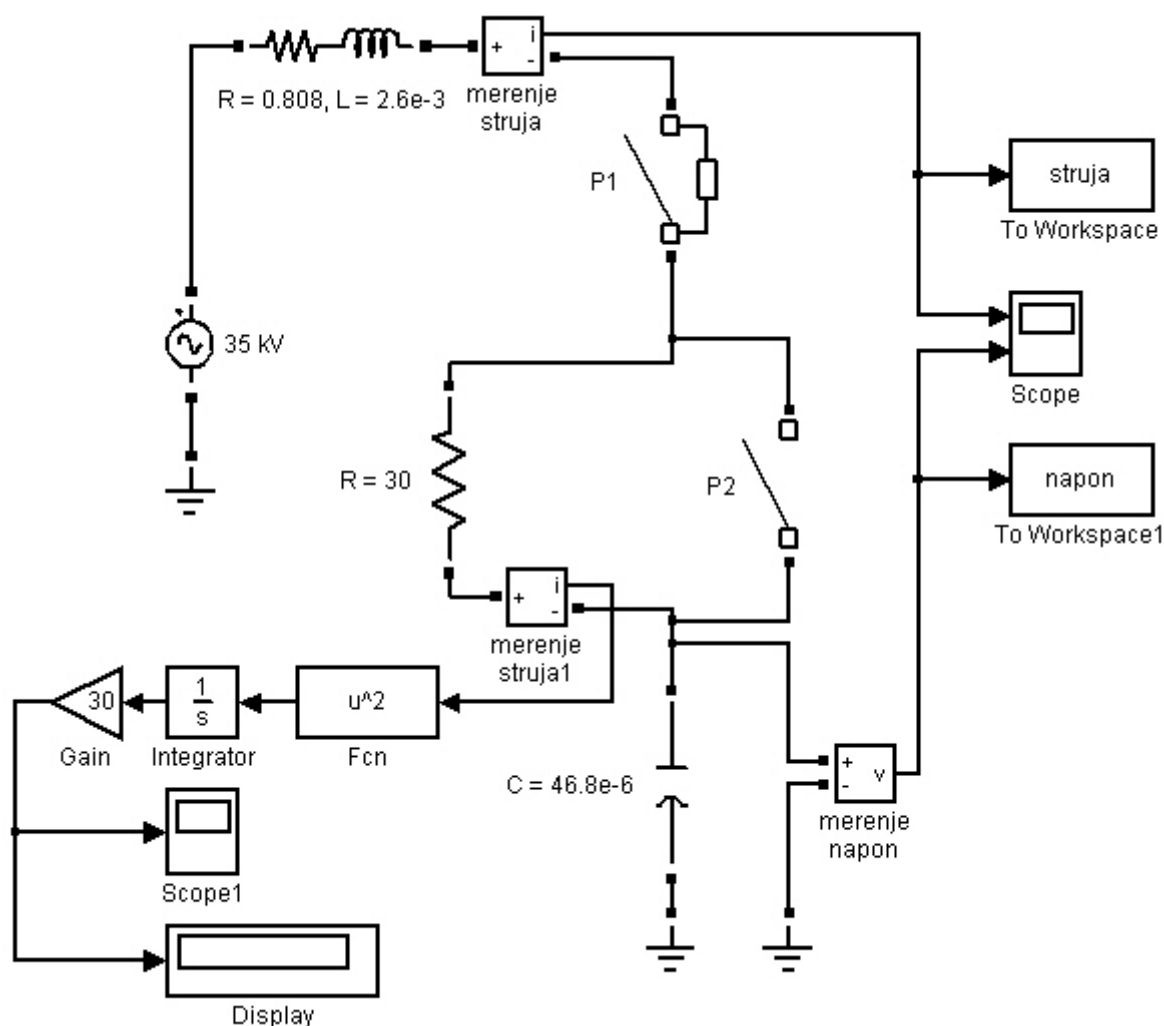
□ □ □

Пример 2.3. За случајот а) од примерот 2.2 да се пресмета количината на ослободена топлина во отпорникот R за време на пуштањето на кондензаторската батерија. Потоа да се одреди напречниот пресек и должината на проводникот од кој што треба да се направи бараниот отпорник така што тој во преодниот процес да ја зголеми својата температура за најмногу 100°C . Отпорникот треба да се направи од нерѓосувачки челик со специфичниот топлински капацитет $c = 500 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$, специфичен електричен отпор $\rho = 0,72 \text{ }\mu\Omega\text{m}$ и густина $g = 7900 \text{ kg/m}^3$.

Решение

Моделот на колото е Primer2_3.mdl и неговиот изглед е даден на сликата 2.11. Во овој случај додаден е уште еден елемент за мерење на струјата во серија со отпорникот R , а потоа слично како во примерот 1.4 пресметан е интегралот $30 \int i^2(t) dt$. Прво сигналот на струјата е квадриран, потоа е интегриран и на крајот е помножен со 30 со

помош на блокот  кој што се наоѓа во Math Operations во Simulink (блок Gain).



Слика 2.11. Модел за одредување на ослободената топлина во отпорникот R

По извршувањето на симулацијата на дисплејот ја добиваме крајната вредност на ослободената топлина во отпорникот која што изнесува 237,3 kJ.

Доколку на едно тело му се зголеми температурата за $\Delta\theta$ степени, тогаш топлината која што во него ќе се акумулира зависи од неговата маса m и специфичниот топлински капацитет c на следниот начин

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta\theta, \quad (2.10)$$

од каде што следува

$$m = \frac{Q}{c \cdot \Delta\theta} = \frac{237,3 \cdot 10^3}{500 \cdot 100} = 4,746 \text{ kg}. \quad (2.11)$$

Знаејќи ја густината на материјалот за потребниот волумен добиваме

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{4,746}{7900} = 6,01 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3. \quad (2.12)$$

Волуменот на жицата од која што е направен отпорникот можеме да го пресметаме со помош на должината l и напречниот пресек S

$$V = l \cdot S, \quad (2.13)$$

а неговиот активен отпор е

$$R = \rho \frac{l}{S}. \quad (2.14)$$

Со замена на (2.13) во (2.14) добиваме

$$R = \rho \frac{V}{S^2}, \quad (2.15)$$

со што за пресекот на жицата имаме

$$S = \sqrt{\frac{\rho V}{R}} = \sqrt{\frac{0,72 \cdot 10^{-6} \cdot 6,01 \cdot 10^{-4}}{30}} = 3,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 = 3,8 \text{ mm}^2, \quad (2.16)$$

Потребната должина на жицата изнесува

$$l = \frac{V}{S} = \frac{6,01 \cdot 10^{-4}}{3,8 \cdot 10^{-6}} = 158,2 \text{ m}. \quad (2.16)$$

□ □ □

Пример 2.4. Разгледуваме енергетски трансформатор со следните параметри 110/35 kV/kV, 31,5 MVA, $u_k = 12\%$ и $P_{\text{Cun}} = 200 \text{ kW}$. Во моментот $t = 35 \text{ ms}$ на секундарната страна на трансформаторот настанува трифазна куса врска која што се исклучува во моментот $t = 235 \text{ ms}$. Да се одреди обликот на напонот секундарната страна на трансформаторот по исклучувањето на кусата врска (во американската литература тој е познат под името transient recovery voltage, а во англиската како transient restriking voltage). Да се смета дека вкупниот капацитет спрема земја на секундарната намотка на трансформаторот изнесува 11 nF, а еквивалентната отпорност и индуктивност на напојниот ЕЕС е занемарливо мала (ЕЕС со бесконечна моќност). Да се одреди коефициентот на пренапон кој што е дефиниран како однос на максималниот напон во преодниот процес и максималниот напон во нормален работен режим.

Решение

Моделот на колото според кое што ќе го симулираме ислучувањето на куса врска на крајот од водот е Primer2_4.mdl и неговиот изглед е даден на сликата 2.13.

Напонскиот генератор е со фреквенција од 50 Hz, фазен агол еднаков на нула и максимална вредност на напонот еднаква на $35e3/\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$, додека редната RL гранка ја симулира еквивалентната отпорност и индуктивност на трансформаторот. Параметрите на R и L се внесени со следните изрази $0.2 \cdot (35/31.5)^2$ (што изнесува $0,247 \Omega$) и $0.12 \cdot 35^2 / 31.5 / (100 \cdot \pi)$ (што изнесува $14,9 \text{ mH}$).

Почетната состојба на прекинувачот P е 0, а временските моменти во кои што тој ќе ја промени состојбата се $[35e-3 \ 235e-3]$. Прекинувачот во затворена положба има отпор од $0,1 \Omega$.

Обликот на напонот ќе го прикажеме до времето од 1 s, а бараниот резултат го прикажуваме на осцилоскоп и го праќаме во работниот простор во MATLAB во променливите напон при што кај Save format е избрано Array.

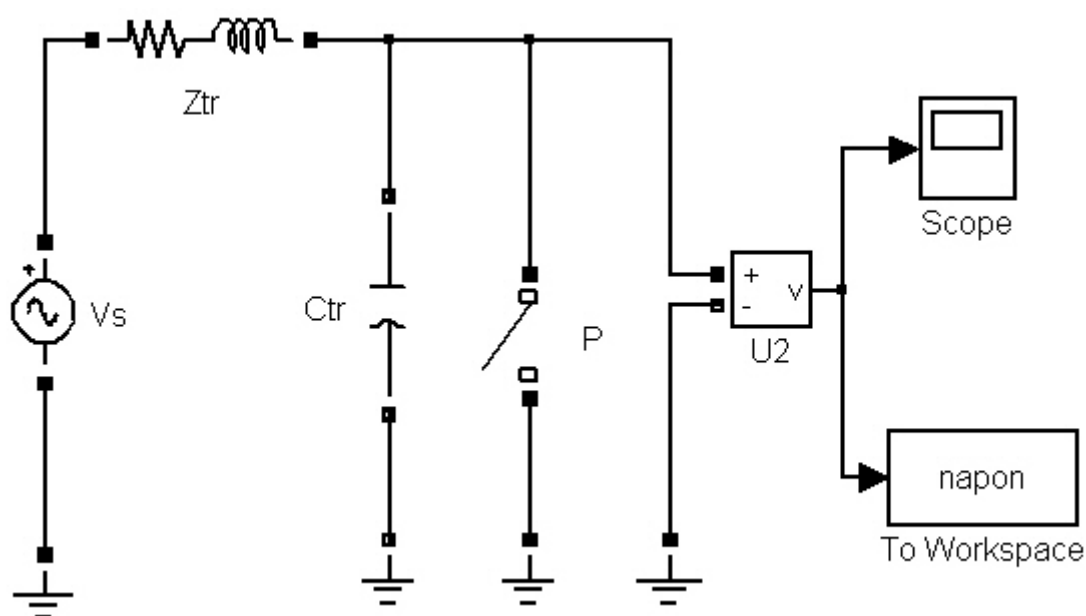
Резултатите од симулацијата се прикажани на сликите 2.14 и 2.15, додека бараната максимална вредност на напонот можеме да ги добиеме со пишување на наредбата $\max(\text{abs}(\text{napon}))$ во командниот простор во MATLAB со што добиваме $69,37 \text{ kV}$.

Коефициентот на пренапон за овој случај изнесува

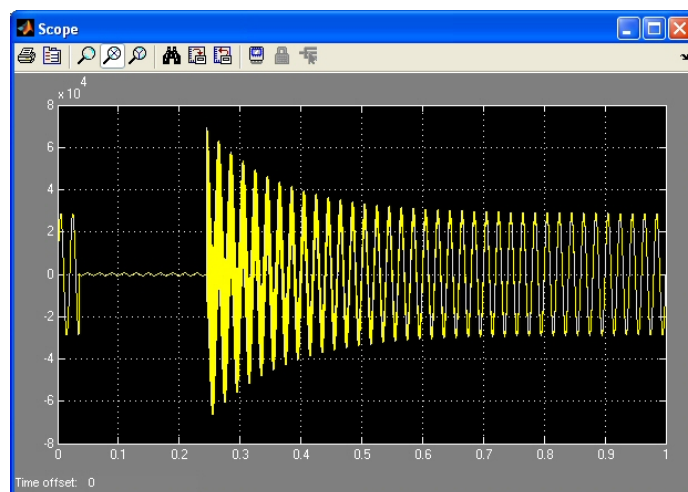
$$k = \frac{69,37}{\sqrt{2} \frac{35}{\sqrt{3}}} = 2,43.$$

Како што може да се забележи од сликите 2.14 и 2.15 напонот по исклучувањето на кусата врска се состои од напон со фреквенција од 50 Hz врз кој е суперпониран друг напон со многу повисока фреквенција. Таа фреквенција изнесува:

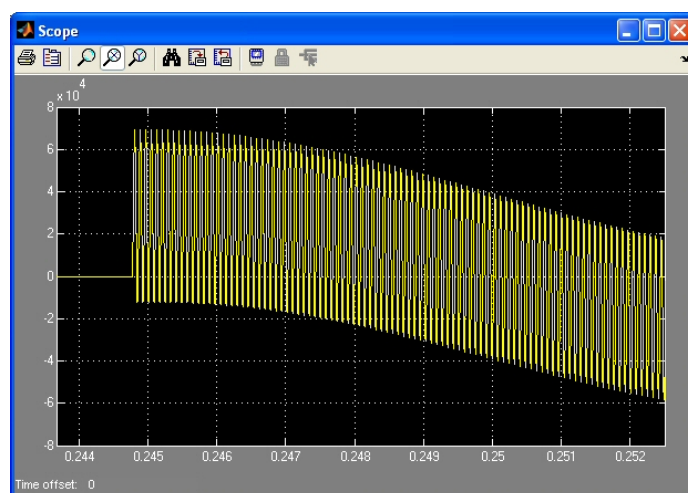
$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{14,9 \cdot 10^{-3} \cdot 11 \cdot 10^{-9}}} = 12,451 \text{ kHz}.$$



Слика 2.13. Модел за симулација на исклучување на куса врска на секундарна страна на трансформатор



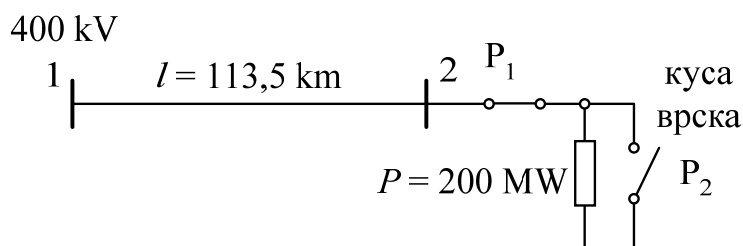
Слика 2.14. Напон на секундарната страна на трансформаторот по исклучувањето на кусата врска



Слика 2.15. Крива на напонот на секундарната страна на трансформаторот зумирана околу момент 235 ms

□ □ □

Пример 2.5. Разгледуваме 400 kV вод со должина 113,5 km кој што на крајот е оптоварен со чисто активна моќност од 200 MW (слика 2.16). Водот е со следните надолжни параметри: $r = 0,03 \, \Omega/\text{km}$, $x = 0,34 \, \Omega/\text{km}$ и $b = 3,26 \, \mu\text{S}/\text{km}$. Напонот на собирниците 1 изнесува 400 kV, а вредноста на струјата на трифазна куса врска во истите собирници изнесува $I_{K3} = 16 \, \text{kA}$ и е познато дека односот помеѓу активниот отпор и реактанцијата во системот изнесува $X/R = 10$. Во моментот $t = 35 \, \text{ms}$ настанува трифазна куса врска на крајот од водот (прекинувачот P_2 се затвора). Кусата врска се исклучува со помош на прекинувачот P_1 кој што го исклучува потрошувачот во моментот $t = 100 \, \text{ms}$. Да се одреди обликот на напонот на крајот на водот по исклучувањето на кусата врска. Да се одреди коефициентот на пренапон кој што е дефиниран како однос на максималниот напон во преодниот процес и максималниот напон во нормален работен режим.

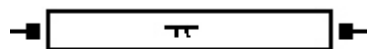


Слика 2.16. Куса врска на крај од вод

Решение

Моделот на колото според кое што ќе го симулираме ислучувањето на куса врска на крајот од водот е Primer2_5.mdl и неговиот изглед е даден на сликата 2.17.

Напонскиот генератор е со фреквенција од 50 Hz, фазен агол еднаков на нула и максимална вредност на напонот еднаква на $400e3/\sqrt{3} \cdot \sqrt{2}$, додека редната RL гранка ја симулира еквивалентната отпорност и индуктивност на јазелот 1 во кој што е приклучен водот. Параметрите на R и L се внесени со следните изрази $400/\sqrt{3}/16/(100 \cdot \pi)/10$ и $400/\sqrt{3}/16/(100 \cdot \pi)$.



Елементот **Vod** го симулира 400 kV вод и тој се наоѓа во Elements од SimPowerSystems (блок Pi Section Line). Неговите надолжни параметри се R, L и C од кои R е дадено во самата задача, а L и C ги пресметуваме со следните изрази $0.34/(100 \cdot \pi)$ и $3.26e-6/(100 \cdot \pi)$. Освен тоа за водот треба да се внесе и неговата должина (113,5 km) и фреквенцијата (50 Hz).

Потрошувачот е симулиран со Series RLC load кој што се наоѓа во Elements од SimPowerSystems. Неговите параметри се внесуваат во дијалогот прикажан на сликата 2.18. Во него се внесуваат номиналниот напон $400e3/\sqrt{3}$, активната моќност $200e6/3$ (поделено е со 3 затоа што тука работиме со еднофазна претстава на водот), додека вредностите за реактивната моќност (индуктивна и капацитивна) во овој случај се 0.

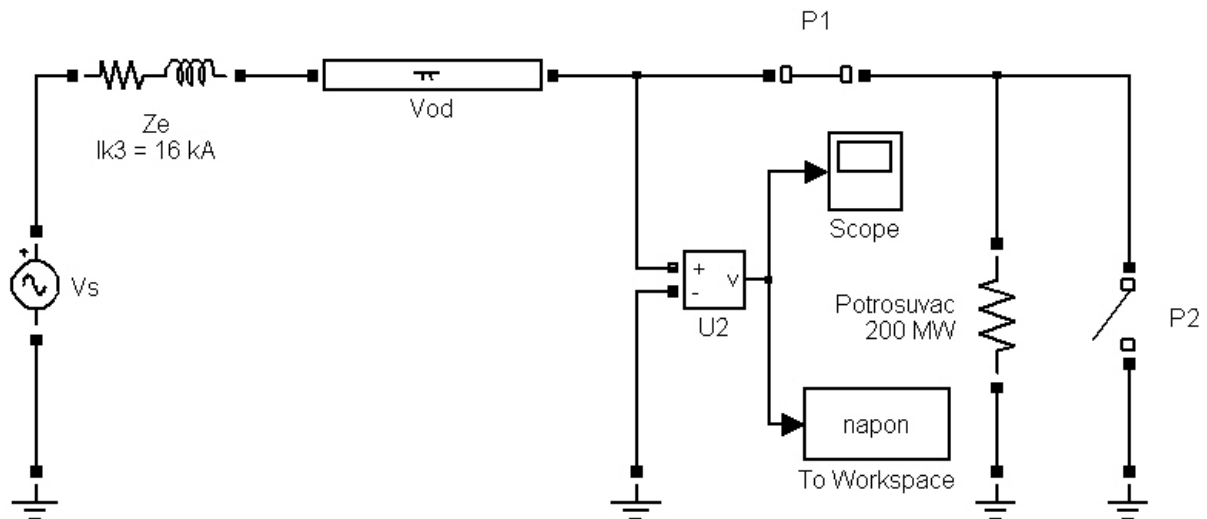
Почетната состојба на прекинувачот P_1 е 1, а на прекинувачот P_2 е 0. Временските моменти во кои што тие ќе ја променат состојбата се $[35e-3]$ за прекинувачот P_2 и $[100e-3]$ за прекинувачот P_1 . Прекинувачот P_2 во затворена положба има отпор од 1 Ω .

Обликот на напонот ќе го прикажеме до времето од 0,5 s, а бараниот резултат го прикажуваме на осцилоскоп и го праќаме во работниот простор во MATLAB во променливите парон при што кај Save format е избрано Array.

Резултатите од симулацијата се прикажани на сликите 2.19 и 2.20, додека бараната максимална вредност на напонот можеме да ги добиеме со пишување на наредбата `max(abs(napov))` во командниот простор во MATLAB со што добиваме 643,3 kV.

Коефициентот на пренапон за овој случај изнесува

$$k = \frac{643,3}{\sqrt{2} \frac{400}{\sqrt{3}}} = 1,97.$$



Слика 2.17. Модел за симулација на исклучување на куса врска на крајот од еден вод

Parameters

Nominal voltage Vn (Vrms):
400e3/sqrt(3)

Nominal frequency fn (Hz):
50

Active power P (W):
200e6/3

Inductive reactive power QL (positive var):
0

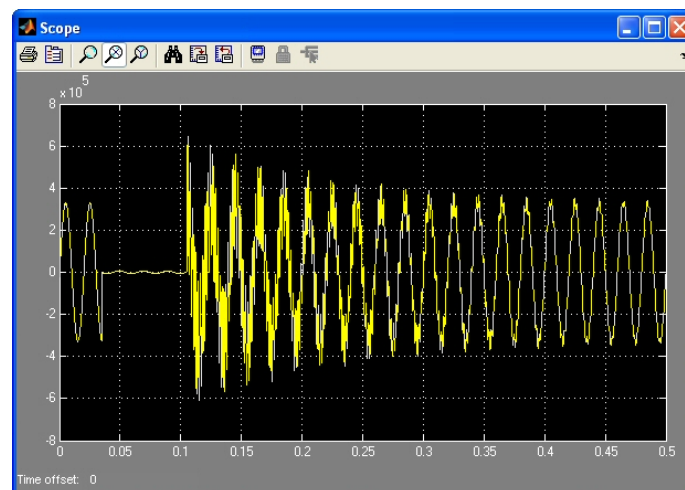
Capacitive reactive power Qc (negative var):
0

☐ Set the initial capacitor voltage
Capacitor initial voltage (V):
0

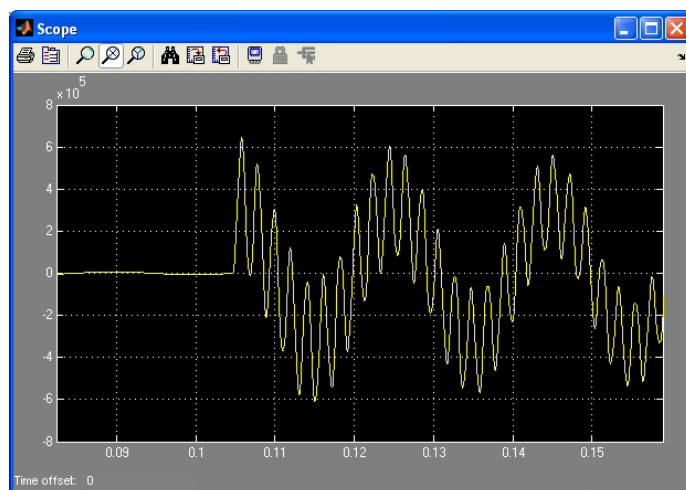
☐ Set the initial inductor current
Inductor initial current (A):
0

Measurements: None

Слика 2.18. Дијалог за внесување параметри на потрошувач претставен со редна RLC гранка



Слика 2.19. Напон на крајот на водот по исклучувањето на кусата врска



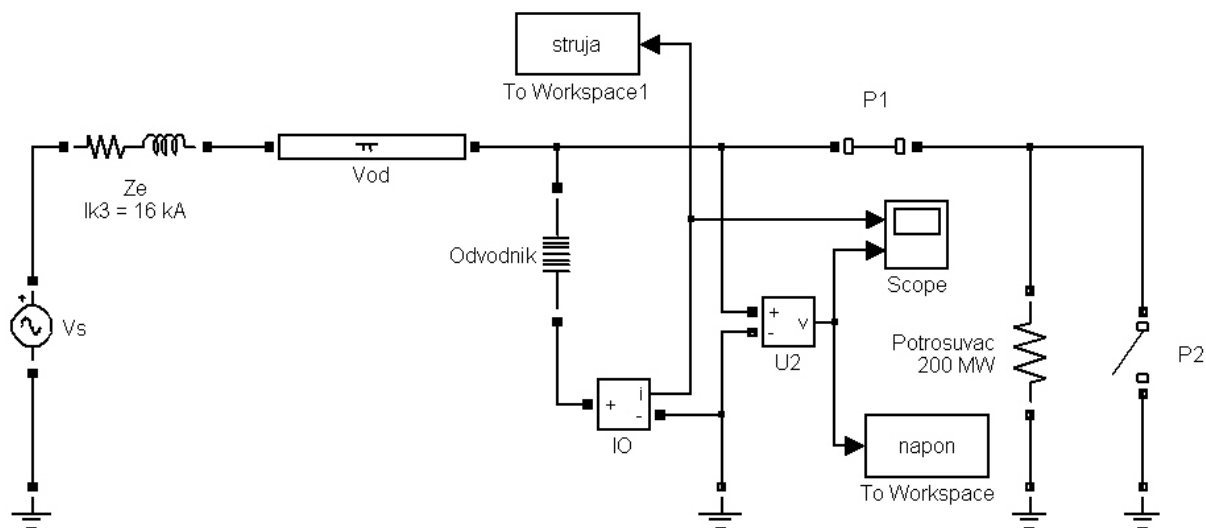
Слика 2.20. Крива на напонот на крајот на водот зумирана околу момент 100 ms

□ □ □

Пример 2.6. Да се реши примерот 2.5 за случајот кога на крајот на водот е поставен одводник на пренапони со кој што се постигнува коефициентот на пренапон да изнесува 1,3.

Решение

Моделот на колото за овој случај е Primer2_6.mdl и неговиот изглед е даден на сликата 2.21. Во него се е идентично како во Primer2_5.mdl само што тука има додадено одводник на пренапон на крајот од водот. Во серија со одводникот е поставен блок за мерење на струјата во одводникот која што се покажува на осцилоскоп и се праќа во работниот простор во MATLAB во векторот *struja*.

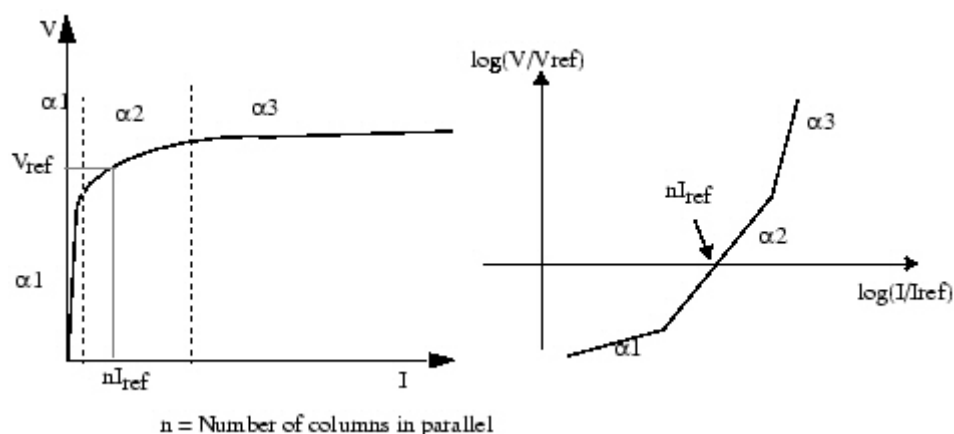


Слика 2.21. Модел за симулација на исклучување на куса врска на крајот од еден вод штитен од пренапони со помош на одводник на пренапони

Одводникот на пренапони се наоѓа во Elements од SimPowerSystem (блок Surge Arrester). Тој е нелинеарен отпорник (метал-оксиден) кој е наменет за заштита од пренапони. Во случаите каде што е потребна поголема моќност на одводниците тие се поврзуваат во паралела во заедничко порцеланско куќиште. Нелинеарната U-I карактеристика на одводникот е моделирана како комбинација од 3 експоненцијални функции од обликот

$$\frac{U}{U_{ref}} = k_i \left(\frac{I}{I_{ref}} \right)^{\alpha_i} \quad (2.17)$$

Референтниот напон (напонот на заштита) се добива кога низ одводникот тече референтната струја (обично 500 или 1000 А). На сликата 2.22 е прикажана U-I карактеристика на одводникот при што на левата страна е дадена во линеарен размер на оските, а на десната страна во логаритамски. Параметрите на одводникот се внесуваат преку дијалогот даден на сликата 2.23 каде што за референтниот напон е внесено $1.3 \cdot 400\sqrt{3} / \sqrt{2}$ додека сите останати параметри се земени според податоците дадени во самиот MATLAB и кои се однесуваат само на еден тип одводници на пренапон.



Слика 2.22. U-I карактеристика на одводник на пренапони

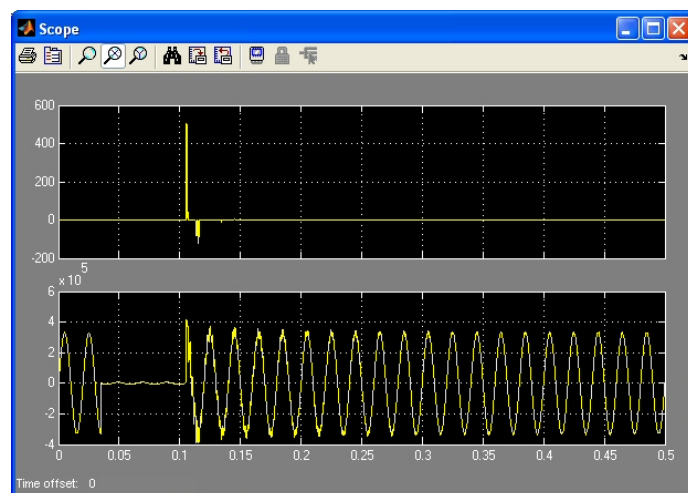
Parameters	
Protection voltage Vref[V]:	1.3*400e3/sqrt(3)*sqrt(2)
Number of columns:	2
Reference current per column Iref[A]:	500
Segment 1 characteristics [k1 alpha1]:	[.955 50]
Segment 2 characteristics [k2 alpha2]:	[1.0 25]
Segment 3 characteristics [k3 alpha3]:	[.9915 16.5]
Measurements	None
☐ Show additional parameters	

Слика 2.23. Дијалог за внесување параметри на одводник на пренапони

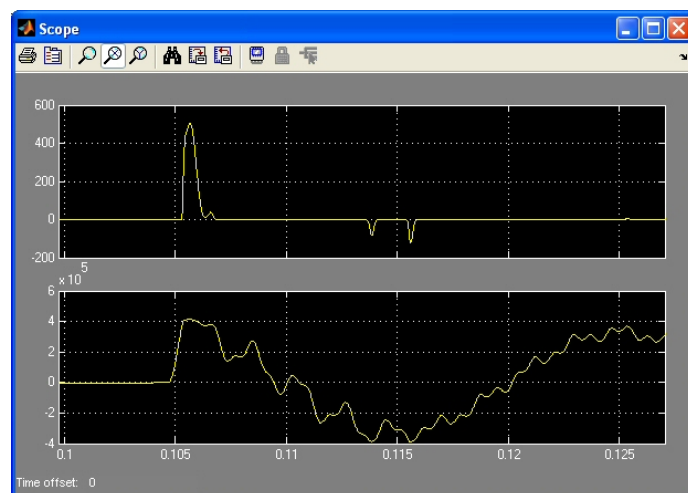
Резултатите од симулацијата се прикажани на сликите 2.24 и 2.25, додека бараната максимални вредност на напонот можеме да ги добиеме со пишување на наредбата `max(abs(напон))` во командниот простор во MATLAB со што добиваме 413,1 kV. Од сликите се забележува дека во првите неколку моменти по исклучувањето на кусата врска, кога напонот е најголем, одводникот на пренапони проведува со што ги елиминира превисоките напони одведувајќи струја во земјата.

Коефициентот на пренапон за овој случај изнесува

$$k = \frac{413,1}{\sqrt{2} \frac{400}{\sqrt{3}}} = 1,26.$$



Слика 2.24. Струја во одводникот и напон на крајот на водот по исклучувањето на кусата врска



Слика 2.25. Криви на струјата во одводникот и напонот на крајот на водот зумирани околу моментот 100 ms

□ □ □

Домашна задача бр. 2. Во табелата 2.1, за секој студент, е даден редниот број на задачата која што треба да се реши. Задачите се дадени во прилог.

Табела 2.1.

Бр.	Студент	Задача	Бр.	Студент	Задача
1	Алили Елвир	3.1	9	Карамачоски Драган	4.2
2	Анѓелова Слаѓана	3.3	10	Ласков Александар	4.3
3	Василевски Бојан	3.4	11	Митровски Дарко	4.6
4	Ѓелов Лазар	3.7	12	Наков Киро	4.7
5	Грендев Миле	3.8	13	Спасова Марјана	4.8
6	Јосифовски Стевче	3.9	14	Станков Петре	4.9
7	Камчева Марика	3.12	15	Тренов Методи	4.10
8	Карадаков Сашко	4.1	16	Цветковски Димитар	4.13

Издадена на 19.3.2008, рок за предавање до 2.4.2008.

- 3.1** Viewed from the point of fault, a three-phase system can be represented by an ideal three-phase, 13.8 kV (rms) generator, with a series impedance of $(0.02 + j0.43) \Omega/\text{phase}$. The system is solidly grounded. A fault-to-ground occurs on one phase when the instantaneous voltage is 3.5 kV and declining. Calculate the approximate value of the first and second peaks of the fault current.

Calculate approximately the maximum force/meter on the phase and ground buses at a point where they run parallel, 20 cm apart.

3.2

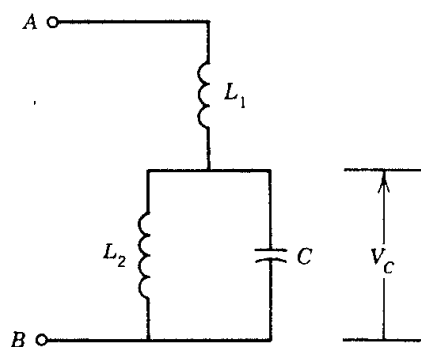


Fig. 3P.1.

Without formal analysis involving differential equations, determine the voltage V_C across the capacitor in Fig. 3P.1 when

- A step of voltage, V , is applied at the terminals A and B from an infinite bus
 - A ramp of current, $I't$, is injected from a current source into the terminals A and B
- 3.3** Figure 3P.2 shows two capacitor banks, C_1 and C_2 , in a substation. C_1 is energized, but C_2 is discharged. The three-phase, 60 Hz ratings of the banks are: C_1 , 5 MVA; C_2 , 3 MVA, on a 13.8 kV base. The source has a short circuit rating of 20 kA rms at 13.8 kV. The inductance of the loop between C_1 and C_2 , represented by L_2 is $30 \mu\text{H}$.

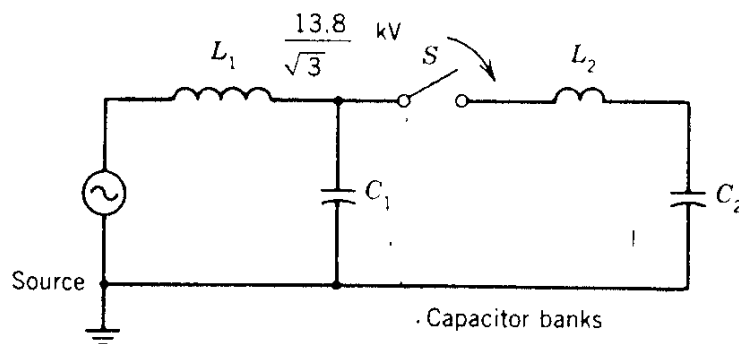


Fig. 3P.2.

Calculate the peak transient voltage that will appear on C_2 and the peak transient current that will flow in L_1 , if the switch S is closed at the peak of the voltage cycle. Point out any assumptions you make.

3.4

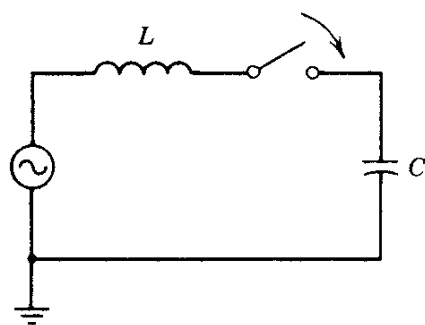


Fig. 3P.3.

Figure 3P.3 represents one phase of a three-phase, 69 kV circuit, containing a source and a capacitor bank C , which is rated at 15 MVA/phase. $L = 60 \mu\text{H}$.

Calculate:

- The peak voltage that can be attained by C when the switch is closed and C has an initial voltage of +40 kV, recognizing that the closing can take place at any point in the cycle
- The time it will take for C to reach this voltage
- The peak current during the operation
- The steady state rms current passing through the switch after the transient has subsided (any practical circuit would contain some damping)

3.5

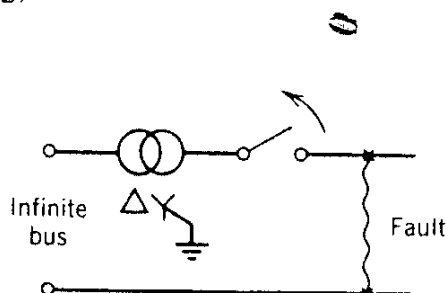


Fig. 3P.4.

A line to ground fault occurs as indicated in Fig. 3P.4, close to the secondary terminals of a 230/34.5 kV transformer. The transformer has a three-phase rating of 100 MVA; it has 0.1 pu reactance on this base.

Calculate:

- The fault current
- The time to peak of the transient recovery voltage when the circuit breaker opens to interrupt the fault current. A value of 12.7 nF can be assumed for the effective capacitance per phase of the transformer secondary winding.

3.6

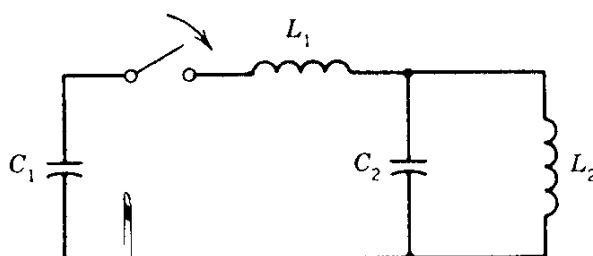


Fig. 3P.5.

The capacitor C_1 in Fig. 3P.5 is initially charged to $V_{C_1}(0)$; C_2 is uncharged. Show that when the switch is closed, the voltage across C_2 is of the form

$$V_{C_2}(t) = AV_{C_1}(0)\{\cos \omega_1 t - \cos \omega_2 t\}$$

Determine the constants A , ω_1 , and ω_2 .

3.7

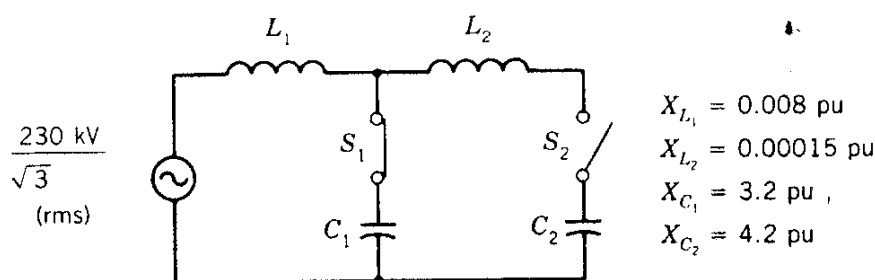


Fig. 3P.6.

The circuit in Fig. 3P.6 represents one phase of a three-phase installation in which capacitors can be connected to, or removed from, a 230 kV bus. The reactances are based on 250 MVA, three-phase.

The switch S_1 has been closed for some time. The switch S_2 is closed when the supply voltage of this phase is 20° beyond its peak

and C_2 is completely discharged. Compute the lowest voltage and the highest voltage that the point P attains during the transient disturbance that follows the closing of S_2 .

- 3.8** A 138 kV/13.8 kV, 20 MVA, three-phase transformer has a reactance of 10% and a resistance of 0.4%. Calculate to a reasonably close approximation the peak fault current in the low voltage winding, under the worst conditions, if a three-phase fault occurs at the low voltage terminals. For the purpose of the calculation the impedance of the source can be considered negligible.

If the fault current is interrupted by a circuit breaker on the high voltage side of the transformer, and if the capacitance per phase of this winding is 5200 pF, determine the frequency of the transient recovery voltage seen by the breaker.

- 3.9** Refer again to Problem 3.8. Let us now assume that the impedance of the 138 kV source is not negligible and that it has the same X/R ratio as the transformer itself. Let us further state that a symmetrical fault on the 138 kV bus would develop a fault current of 18 kA rms.

Determine the frequency and relative magnitude of the transient recovery voltage of the circuit breaker when it interrupts the fault described in Problem 3.2.

Assume that the stray capacitance on the source side of the breaker is 12,000 pF.

3.10

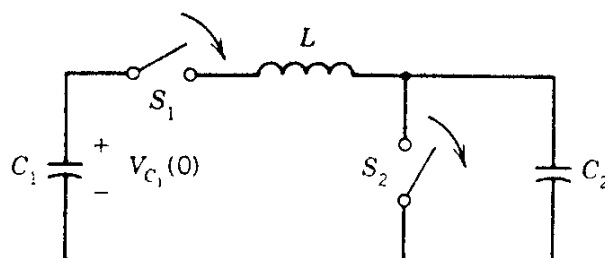


Fig. 3P.7.

The circuit shown in Fig. 3P.7 is designed for “synthetically” testing circuit breakers, i.e., making a meaningful test on a breaker without a power system or large test generator. The circuit breaker under test, S_2 , is initially closed. The test starts by closing S_1 (this will probably be some kind of triggered gap), which causes C_1 , which has been previously charged, to discharge through S_2 and the reactor L . The contacts of S_2 are opened soon after this current starts to flow. S_2 arcs until current zero, at which time, if interruption occurs, the circuit automatically applies a transient recovery voltage across S_2 .

It is required to test a breaker with a peak current of 15 kA at 60 Hz, and then apply a TRV with a peak of 20 kV at 900 Hz. What

should be the values of C_1 , C_2 , and L , and to what initial voltage should C_1 be charged?

Make a sketch showing:

- The current through S_2
- The voltage on C_1 before and after current zero
- The TRV

3.11 If the X/R ratio of the transformer in Problem 3.5 is 12, calculate the peak value of the fault current if the fault occurs when the voltage is 70° past its peak.

3.12

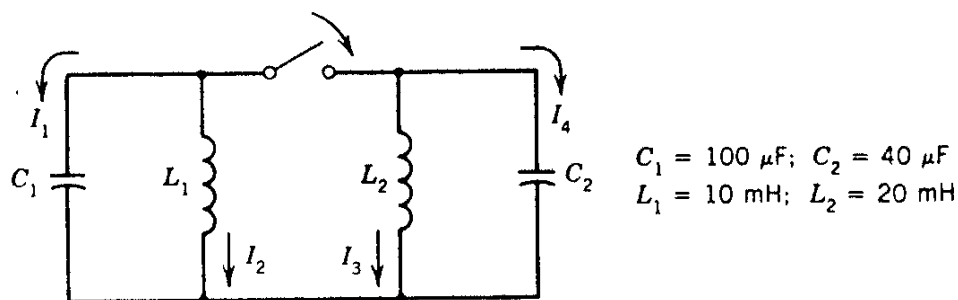


Fig. 3P.8.

C_2 and L_2 in Fig. 3P8 are oscillating; C_2 and P_2 are de-energized. The switch is closed when $V_{C_1} = 0$ and $I_2 = 500 \text{ A}$. Calculate:

- Peak voltage reached on C_2
- Peak current reached in L_2
- Frequency of the current in L_1
- Maximum voltage on C_1 prior to closing the switch

- 4.1** A 13.8 kV, 60 Hz, single phase transformer takes a current of 2.8 A rms (assumed sinusoidal) at a power factor 0.15 when energized on no load at its rated voltage. When disconnecting the transformer under these conditions, a circuit breaker chops 2 A. Calculate the peak of the voltage transient that ensues *due to the chop*. The effective winding capacitance is 2.5×10^{-9} F.

4.2

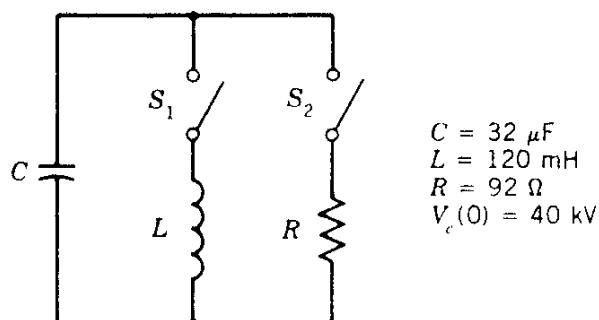


Fig. P4.1.

The switch S_1 in Fig. P4.1 is closed first, followed 5 ms later by the closing of switch S_2 . Determine the current in each branch at the instant S_2 closes. Determine the current in L at this time if S_1 and S_2 are closed simultaneously.

4.3

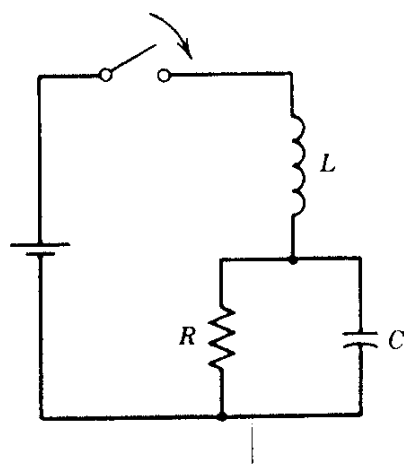


Fig. P4.2.

Derive *operational solutions* for the voltage across C and the current through L , after the switches closed in Fig. P4.2.

- 4.4 Section 4.5 of the text describes how resistors are sometimes used to modify recovery voltages.

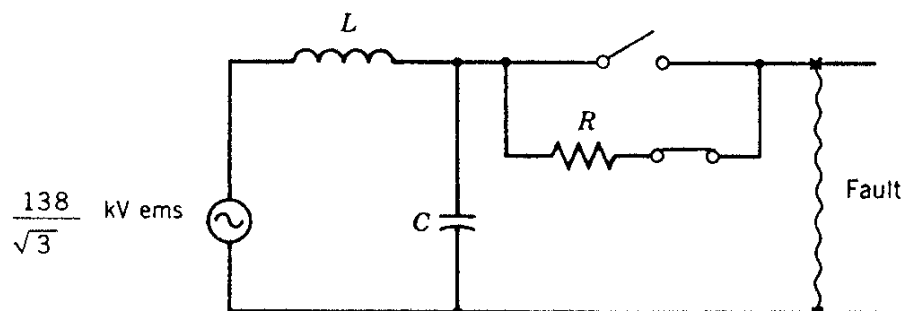


Fig. P4.3.

In the circuit shown in Fig. P4.3 a breaker with an opening resistor is clearing a 28,000 A symmetrical fault. Its resistor is $800\ \Omega$, the bus capacitance, $C = 4 \times 10^{-8}\text{ F}$. What will be the peak TRV? If the resistor is in the circuit for two cycles, how much energy will it dissipate?

4.5

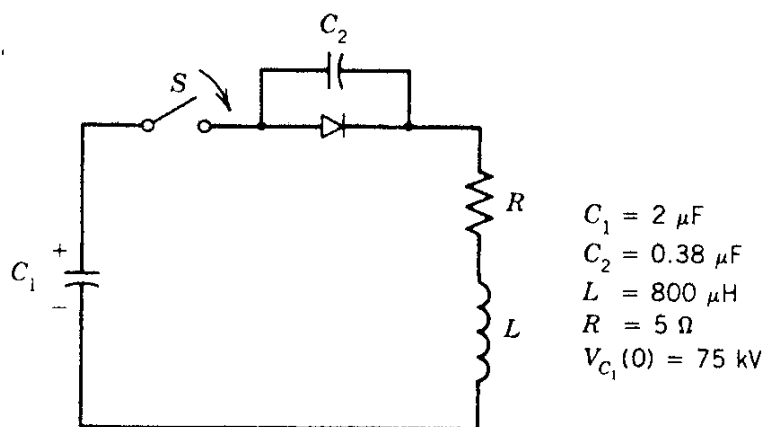


Fig. P4.4.

After the switch is closed in Fig. P4.4, determine the following:

- The maximum energy ever stored in L
- The time before current flows in C_2
- The voltage on C_1 when current starts to flow in C_2
- The highest voltage appearing across C_2

Use the curves of Figs. 4.4, 4.6, and 4.7.

- 4.6 A 138 kV substation is operating with a three-phase 90 MVAR capacitor bank on the bus. A second identical bank (uncharged) is connected in parallel with the first by closing a switch. The source reactance is $2.8\ \Omega$ at 60 Hz; the inductance of the circuit between the

two banks is $40 \mu\text{H}$. What frequencies would you expect to see in the transient current that would flow in the switch?

If a resistor of 4.4Ω was placed in series with the switch to reduce the inrush current, what percent reduction would you expect in the first peak? It can be assumed that source and capacitor banks have grounded neutrals.

- 4.7 An 8 MVAR, three-phase, 13.8 kV capacitor bank is to be switched against a similar 20 MVAR bank, the 20 MVAR is already energized, the 8 MVAR bank is initially uncharged. A resistor is used in the connection to control the current and transient voltage. The inductance of the loop between the two capacitor banks is $30 \mu\text{H}$. What value should the resistor have if
- The peak current is not to exceed 10 kA
 - The peak voltage on either capacitor is not to exceed 10 kV regardless of the instant when the switching occurs?

4.8

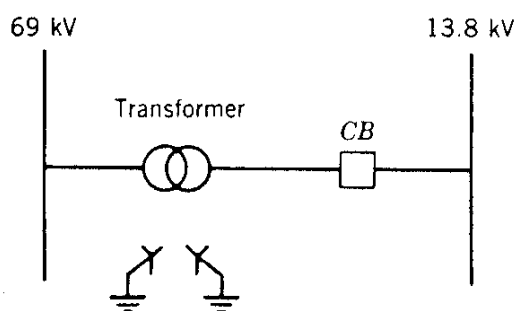


Fig. P4.5.

Figure P4.5 shows a step-down transformer connecting a 69 kV and a 13.8 kV bus. The transformer has 12% reactance and 1% resistance on a 30 MVA base. Its effective capacitance on the L.V. side is 11,000 pF. The impedance of the supply is negligible.

A fault on the L.V. bus is interrupted by opening the circuit breaker (CB). What will be the peak TRV of the circuit breaker? How soon after current interruption will it occur? Assume a symmetrical fault current. Do not waste time solving this problem formally. Use some engineering judgment.

- 4.9 A load on a solidly grounded 13.8 kV, three-phase bus takes 246 kW at a lagging power factor of 0.6. The load can be conveniently represented by a parallel combination of R and L . A capacitor bank, which improves the power factor to 1.0, is connected in parallel with the load. The load and power factor correcting capacitor are switched together, as a unit.

Calculate the peak voltage appearing across the load after it has been disconnected by opening the switch. It may be assumed that the supply impedance is negligible.

4.10

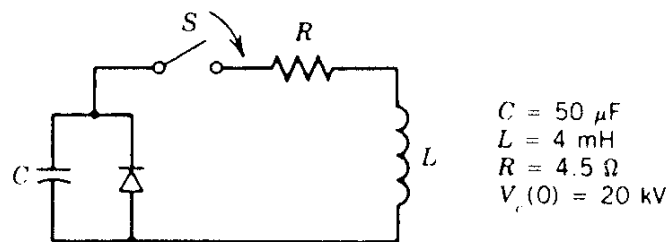


Fig. P4.6.

Calculate the peak current that will flow after the switch S is closed in the above circuit. Compute the value of the current 2 ms after S is closed. Take care to determine exactly when the rectifier becomes active. What fraction of the original stored energy is dissipated in the first 2 ms?

- 4.11** A 60 Hz, single phase, 13.8 kV transformer has a no-load current of $3.5 \angle -83^\circ$ A rms. When it is disconnected from the system by opening the circuit breaker, it is found that the transient voltage appearing across the transformer following current interruption is exactly critically damped. What is the effective capacitance of the transformer?

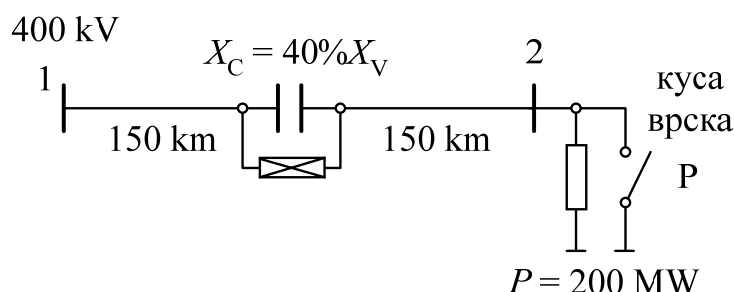
For the purpose of this question the transformer can be treated as a parallel RLC circuit in which the dissipation in the resistor represents the no-load losses.

- 4.12** Select a shunt resistor for the circuit breaker in Problem 3.11 that would reduce the magnitude of the TRV for the fault described by 40%.
- 4.13** A 7000 kVAR, 34.5 kV, solidly grounded capacitor bank, uncharged, is being connected to a similar bank of 10,000 kVAR which is already energized. The inductances between the two banks is $40 \mu\text{H}$. A 5Ω resistor is temporarily inserted in series with the switch to reduce the inrush current. Determine the peak current with and without the resistor, assuming that the closing can occur when the voltage is at its peak.

How much energy will the resistor have to dissipate during such an operation?

Пример 2.7. Разгледуваме 400 kV вод со должина од 300 km и надолжни параметри: $r = 0,03 \, \Omega/\text{km}$, $x = 0,34 \, \Omega/\text{km}$ и $b = 3,26 \, \mu\text{S}/\text{km}$. Тој на средината е компензиран со реден кондензатор чија што реактанција изнесува 40% од реактанцијата на водот. Кондензаторот се штити од пренапони при куси врски на водот со паралелно поставен одводник на пренапони кој има референтен напон од 100 kV (слика 2.26). Водот на крајот е оптоварен со чисто активна моќност од 200 MW. Напонот на собирниците 1 изнесува 400 kV, а вредноста на струјата на трифазна куса врска на истите собирници изнесува $I_{\text{кз}} = 16 \, \text{kA}$ и е познато дека односот помеѓу активниот отпор и реактанцијата во системот изнесува $X/R = 10$. Во моментот $t = 100 \, \text{ms}$ настанува трифазна куса врска на крајот од водот (прекинувачот P се затвора). Кусата врска се исклучува со помош на истиот прекинувачот во моментот $t = 150 \, \text{ms}$. Да се одреди обликот на напонот на редниот кондензатор и струјата во одводникот, како и нивните максимални вредности на напонот за следните два случаја

- редниот кондензатор е штитен со одводник на пренапони,
- редниот кондензатор е без заштита.



Слика 2.26. Куса врска на крај од редно компензиран вод

Решение

Моделот е даден во Primer2_7a.mdl и Primer2_7b.mdl, а неговиот изглед е прикажан на сликата 2.27. Параметрите на сите елементи во колото се еднакви со соодветните параметри од примерот 2.5 и 2.6 и се внесуваат на идентичен начин.

Од условот во задачата за реактанцијата на кондензаторот добиваме

$$X_C = 0,4 \cdot X_V = 0,4 \cdot 0,34 \cdot 300 = 40,8 \, \Omega, \quad (2.18)$$

од каде што за неговиот капацитет имаме

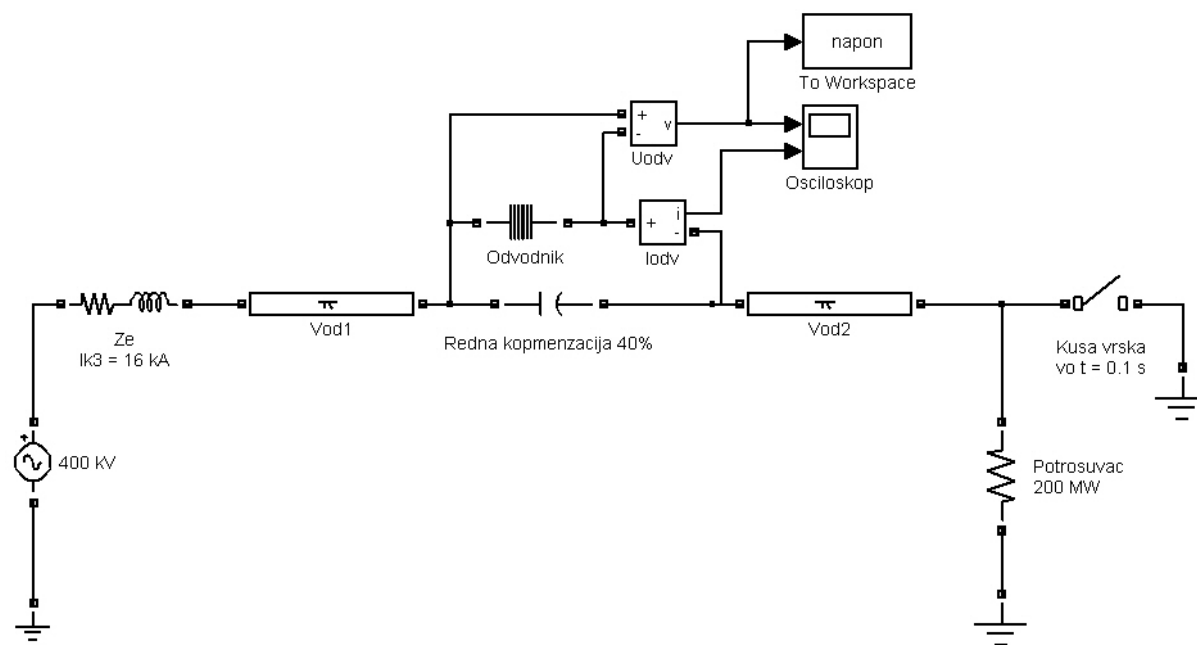
$$C = \frac{1}{\omega X_C} = \frac{1}{100\pi \cdot 40,8} = 7,8 \cdot 10^{-5} \, \text{F} = 78 \, \mu\text{F}. \quad (2.19)$$

Обликот на напонот на редниот кондензатор и струјата во одводникот на пренапони за случајот под а) е прикажан на сликата 2.28а, додека напонот за случајот под б) е прикажан на сликата 2.28б. Максималните вредности на напонот на редниот кондензатор изнесуваат

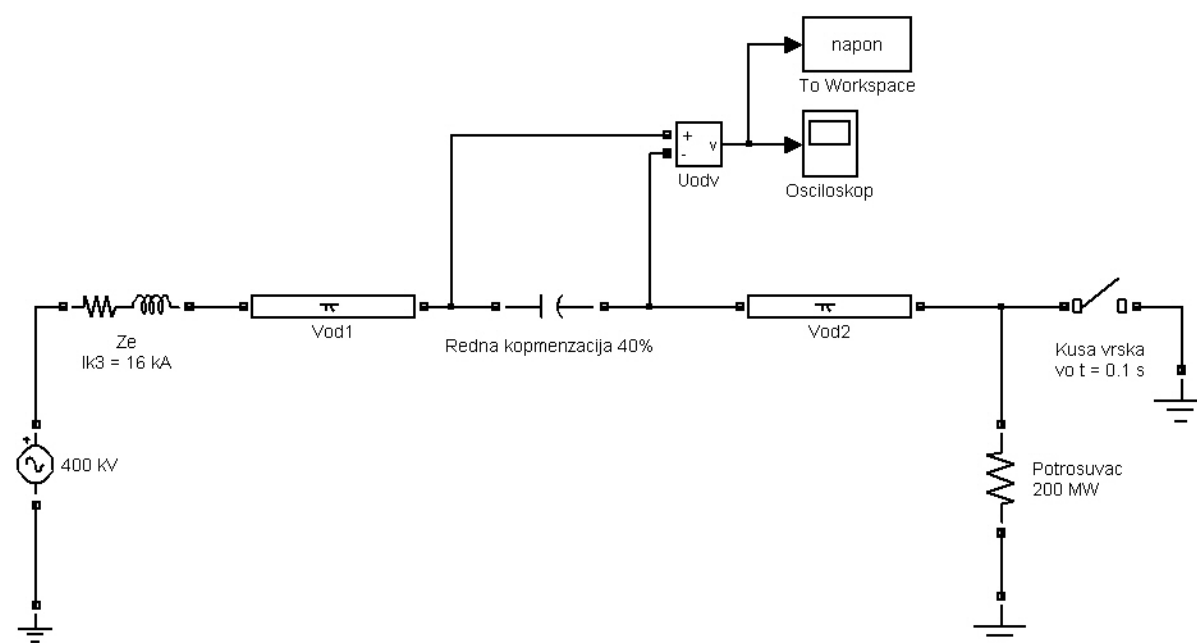
$$\text{а) } U_{C,\text{max}} = 99,1 \, \text{kV},$$

$$\text{б) } U_{C,\text{max}} = 380,6 \, \text{kV}$$

од каде што се забележува дека во случајот без заштита на кондензаторот во режимот со куса врска на крајот на водот напонот на неговите краеве достигнува скоро 4 пати поголема вредност.

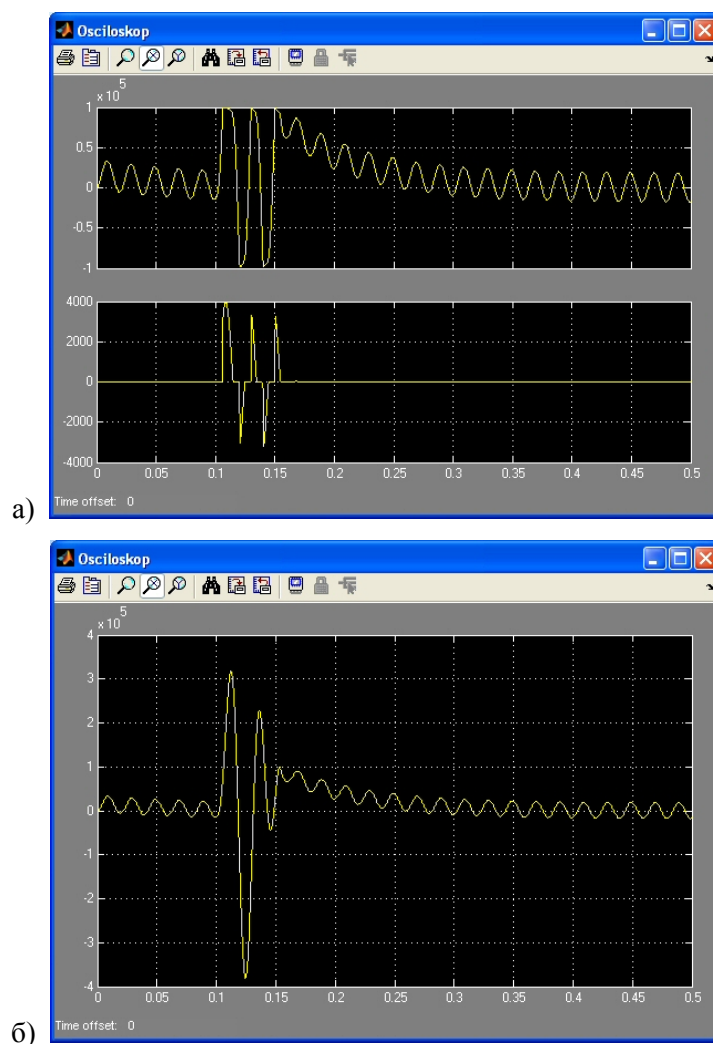


a)



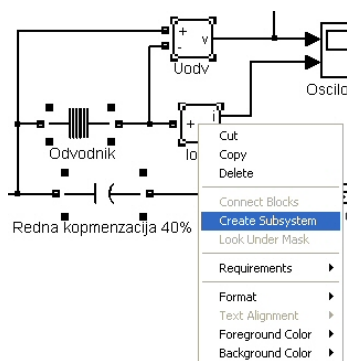
б)

Слика 2.27. Модел за симулација на куса врска на крај од редно компензиран вод

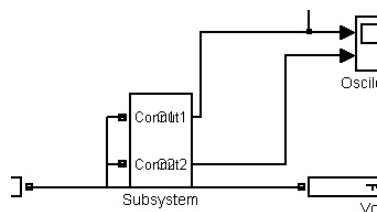


Слика 2.28. Облик на напонот на редниот кондензатор при куса врска на крајот од водот

На примерот од сликата 2.27a ќе покажеме како се креира подсистем во рамките на еден систем со што шемата во главниот систем би се упростила. Нека во моделот Primer2_7a.mdl ги селектираме редниот кондензатор, одводникот на пренапон и блоковите за мерење напон и струја така што ќе ги покажеме еден по еден со глушецот а истовремено ќе го држиме тастерот Shift притиснат. Потоа кликуваме на десниот тастер од глушецот и од менито избираме Create Subsystem како што тоа е прикажано на сликата 2.29. По извршувањето на оваа операција во главниот систем ја добиваме состојбата прикажана на сликата 2.30.

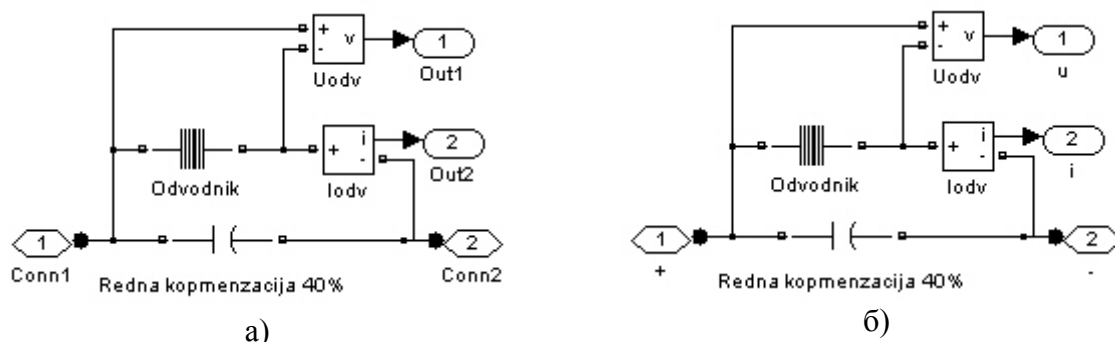


Слика 2.29. Креирање на подсистем



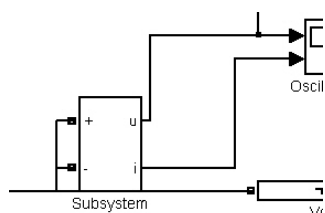
Слика 2.30. Креиран подсистем во рамките на главниот систем

На сликата 2.30 се забележува дека редниот кондензатор, одводникот на пренапон и блоковите за мерење напон и струја веќе ги нема и на нивно место постои еден правоаголник со 4 приклучоци и нејасно поврзани врски до нив. Со двојно кликување врз тој правоаголник влегуваме во подсистемот со што ни се отвора нов прозорец како на сликата 2.31a. На неа забележуваме дека постојат два приклучоци означени со Conn1 и Conn2 и два излези означени со Out1 и Out2. Со селектирање на овие текстови и пишување преку нив приклучоците ги означуваме со + и –, а излезите со u и i како што тоа е прикажано на сликата 2.31б.

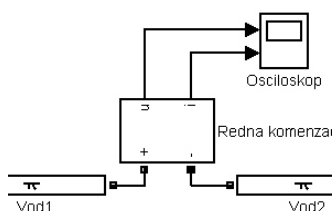


Слика 2.31. Уредување на влезовите и излезите од подсистемот

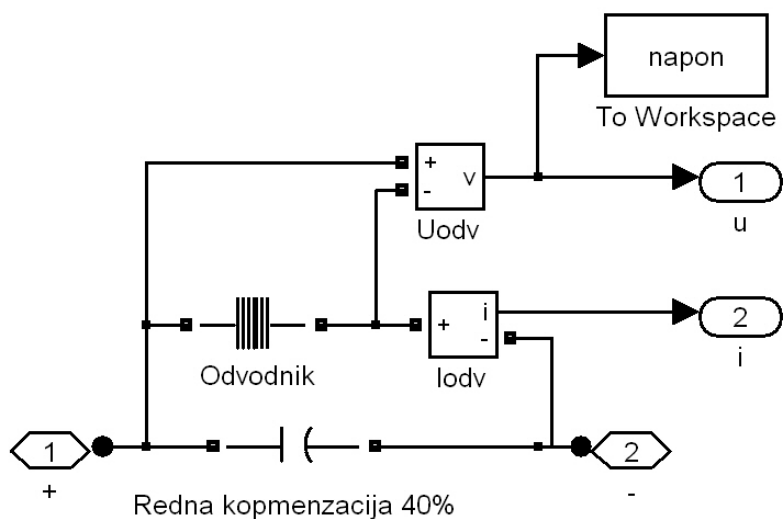
По преименувањето на приклучоците на подсистемот негоиот изглед во рамките на главниот систем ќе биде како на сликата 2.32. На крајот останува уште да ги дотераме врските кои што одат од него кон останатиот дел од колото со што го добиваме изгледот од сликата 2.33. Покрај тоа во подсистемот го имаме вметнато и блокот за запишување на сигналот на напонот во работниот простор во MATLAB како што тоа е прикажано на сликата 2.34. Со ваквата промена го добиваме моделот Primer2_7aa.mdl а неговиот изглед ќе биде како на сликата 2.35.



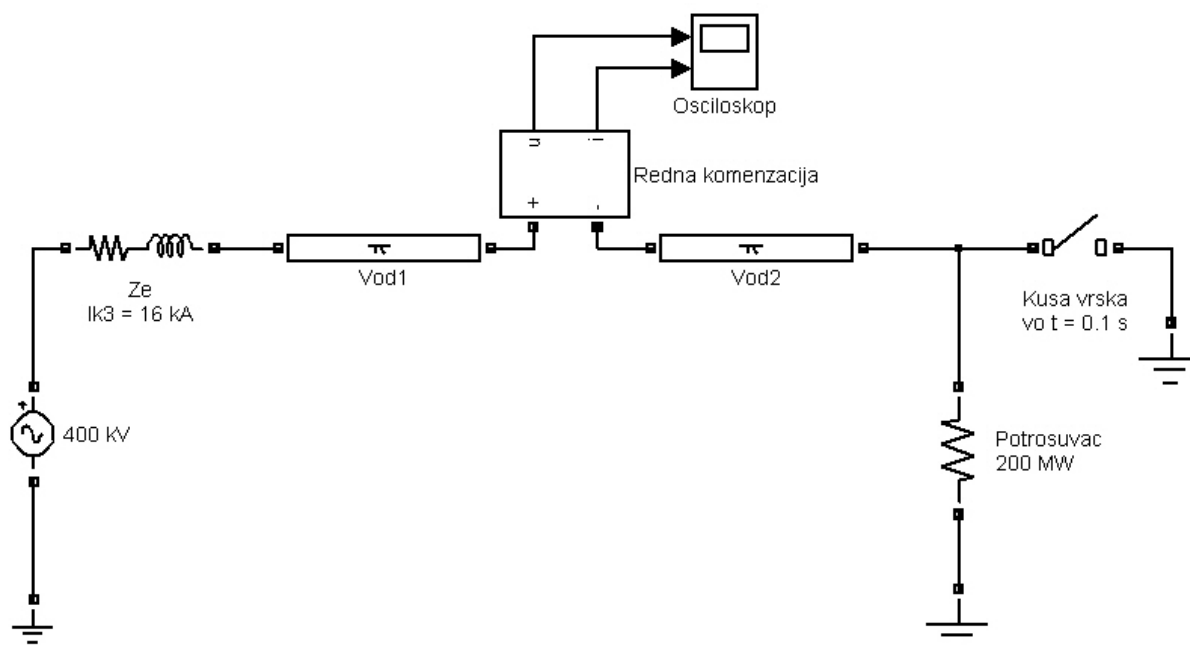
Слика 2.32. Изглед на подсистемот по преименувањето на неговите приклучоци



Слика 2.33. Изглед на подсистемот по преуредувањето на врските со останатиот дел од системот



Слика 2.34. Поглед во внатрешноста на подсистемот со додаден блок за снимање на напонот во работниот простор во MATLAB



Слика 2.35. Модел за симулација на куса врска на крај од редно компензиран вод со користење на подсистем (Redna kompenzacija)

□ □ □