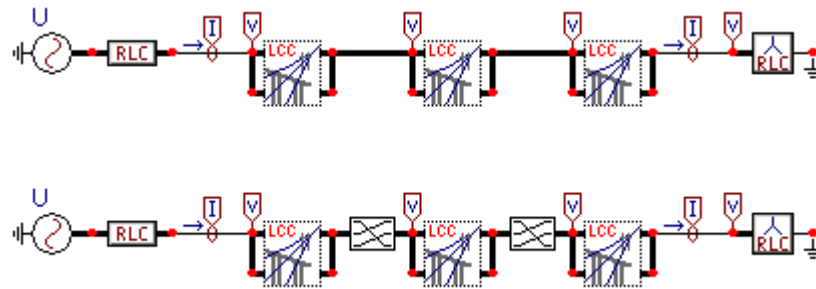


Príklad 1

Štandardným problémom pri dlhých vedeniach je nesymetria pozdĺžnej a priečnej impedancie vedenia. Táto nesymetria sa rieši transpozíciou vedenia. Jedná sa prakticky o výmenu uloženia vodičov jednotlivých fáz. Podľa dĺžky vedenia je možné uskutočniť jednu alebo aj viac transpozícií. V modeli sú rovnaké vedenia, jedno z nich je po tretinách transponované. Je možné jednoduchým spôsobom zmeniť parametre zdroja a aj záťaže. Pri vedeniach je možné meniť dĺžku úsekov medzi miestom transpozície a taktiež parametre vedenia ako pri ostatných modeloch.



Obr. 1 Schéma zapojenia

Komponenty a ich hodnoty:

Elektrický prvok	Názov v programe	Zložka	Nastavenie	Hodnota
3f striedavý zdroj napätia	AC 3-ph type 14	Source	Amp	$150000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$
			f	50
			Pha	-90
3f-RLC symetrická záťaž	RLC_3	Standard Component ...	R	5
			L	180
			C	0
Ampérmeter	Probe Curr	Probes & 3-phase		
Voltmeter	Probe Volt	Probes & 3-phase		
Model vedenia	LCC	Lines / Cables		
Transpozícia ABC → BCA	Transp ABC-BCA	Probes & 3-phase		

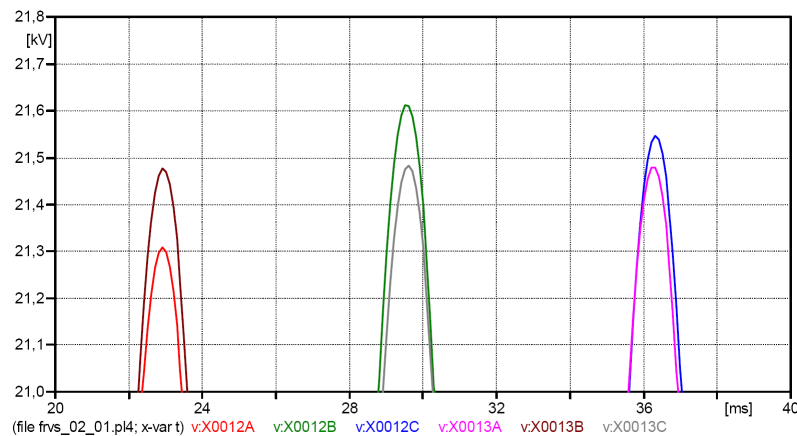
Komponenty vedenia a ich hodnoty:

#	Ph.no.	Rlin [cm]	Rout [cm]	Rresis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.35	1.06	0.122	2.92	10.35	7.35
2	2	0.35	1.06	0.122	3.5	16.45	13.45
3	3	0.35	1.06	0.122	2.67	19.85	16.85
4	4	0.35	1.06	0.122	-2.92	10.35	7.35
5	5	0.35	1.06	0.122	-3.5	16.45	13.45
6	6	0.35	1.06	0.122	-2.67	19.85	16.85
7	0	0	0.54	4	0	23.85	20.85

Obr. 2 Komponenty vedenia a ich parametre

Model LCC je na vstupe aj výstupe prepojený, teda využívajú sa obidva poľahy sústavy vedenia. Pri modeli záťaže je úmyselne zvolená nízka hodnota odporu kvôli väčším úbytkom napätia na modeli vedenia.

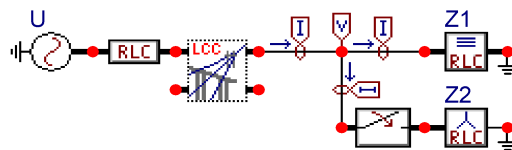
Na nasledujúcom obrázku sú znázornené vrcholové hodnoty napätia na záťaži pre transponované a aj pre netransponované vedenie. Netransponované vedenie je charakterizované krivkami červená, zelená, modrá (v poradí fáz A, B, C, pri zdroji), transponované vedenie sériou kriviek ružová, hnedá a sivá (podľa napätia zdroja fázy A, B, C). Z obrázku je zrejmé, že každou transpozíciou sa posunie fáza zdroja A na fázu B záťaže (B → C, C → A). V našom prípade je teda posun „o dve fázy.“ Je zrejmý tiež rozdiel hodnôt napätia, ktorý je v danom prípade na úrovni 100 až 200 V.



Obr. 3 Špičkové hodnoty napätia na záťaži

Príklad 2

Ďalším z bežných problémov v elektrizačnej sústave je kompenzácia indukčnej záťaže. V našich podmienkach sa používa paralelná kompenzácia kondenzátorovou batériou. Pre jednoduchú ukážku je vytvorený model podľa nasledujúcej schémy zapojenia. Daný model je použitý dvakrát, s tým rozdielom, že je pomocou vypínača odpojená kondenzátorová batéria (tým sa získa možnosť porovnať priebehy v jednom grafe).



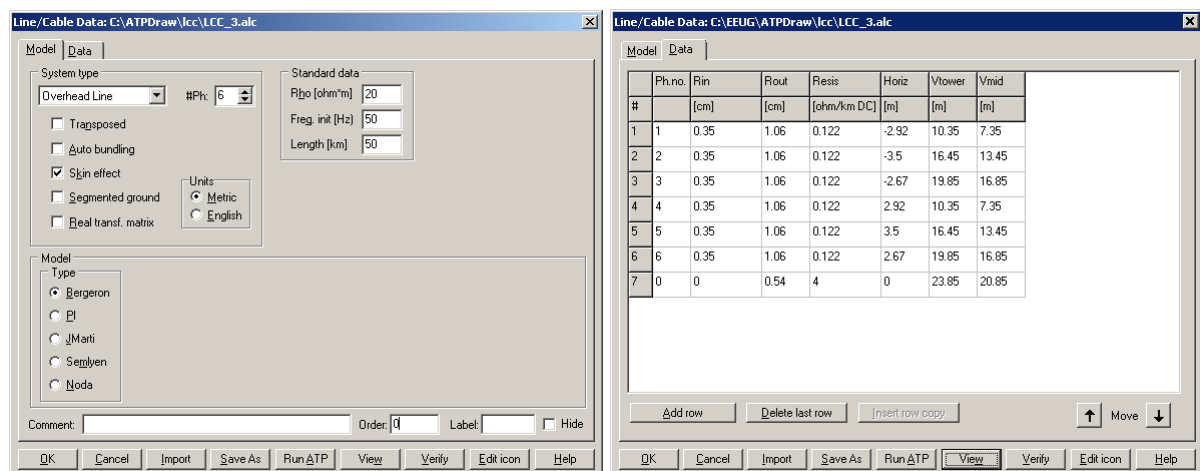
Obr. 4 Schéma zapojenia pri využití paralelnej kompenzácie

Komponenty a ich hodnoty:

Elektrický prvok	Názov v programe	Zložka	Nastavenie	Hodnota
3f striedavý zdroj napätia	AC 3-ph type 14	Source	Amp	$90000 \cdot \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$
			f	50
			Pha	-90
3f-RLC symetrická záťaž	RLC_3	Standard Component ...	R	5
			L	180
			C	0
3f-RLC symetrická záťaž	RLC3ph	Branch Linear	R	400
			L	300
			C	0
3f-RLC symetrická záťaž	RLC-Y 3ph	Branch Linear	R	?
			L	?
			C	?
Ampérmeter	Probe Curr	Probes & 3-phase		
Voltmeter	Probe Volt	Probes & 3-phase		
Model vedenia	LCC	Lines / Cables		
Časovo riadený vypínač	Switch time 3-ph	Switches		

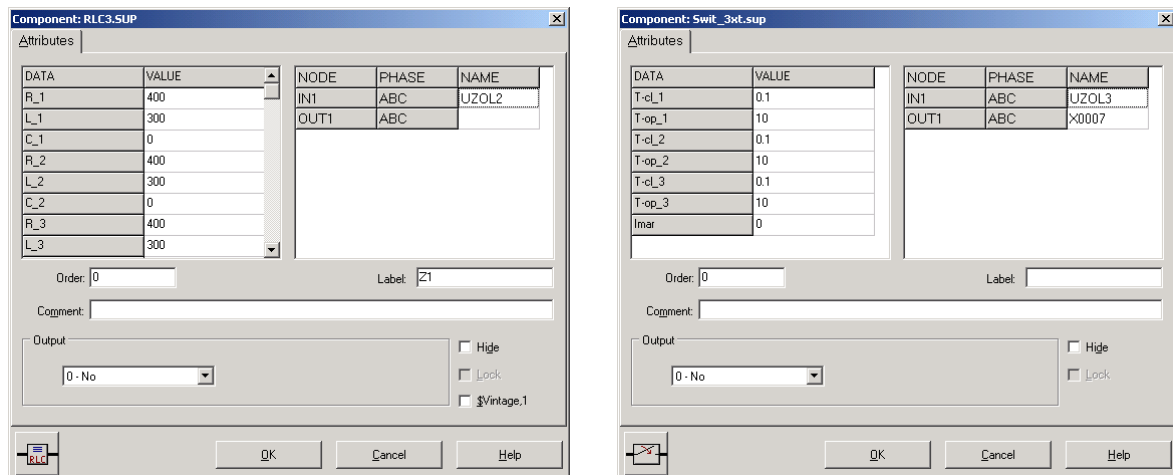
Parametre vedenia v_1 (na vstupe aj výstupe LCC modelu sa využíva len jeden poťah):

	vodič	h_{max} [m]	h_{min} [m]	x_{horiz} [m]		fázové vodiče	zemniacie lano	$\rho_{el} = 20 \Omega \cdot m$, $f = 50 \text{ Hz}$, $l = 50 \text{ km}$
	1, 4	10,35	7,35	2,92	r_{in} [cm]	0,35	0	
	2, 5	16,45	13,45	3,5	r_{out} [cm]	1,06	0,54	
	3, 6	19,85	16,85	2,67	R [Ω/km]	0,122	4	
	0	23,85	20,85	0	Počet fáz: 6 Typ modelu článku: Bergeron			



Obr. 5 Komponenty vedenia a ich parametre

V modeli LCC sú na vstupe aj výstupe dva poťahy, pričom sa využíva len jeden z nich.



Obr. 6 Nastavenie parametrov záťaže Z_1 a časového spínača pre vetvu s paralelnou kompenzáciou

Pre paralelnú kompenzáciu, s podmienkou $\cos \varphi = 1$ platí:

$$\mathbf{Z}_1 = R + j \cdot X_L \quad \mathbf{Z}_2 = -j \cdot X_C$$

$$\mathbf{Z} = \frac{\mathbf{Z}_1 \cdot \mathbf{Z}_2}{\mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2} = \frac{(R + j \cdot X_L) \cdot (-j \cdot X_C)}{R + j \cdot X_L - j \cdot X_C} = \frac{R \cdot X_C^2}{R^2 + (X_C - X_L)^2} + j \cdot \frac{X_C \cdot (X_L \cdot (X_C - X_L) - R^2)}{R^2 + (X_C - X_L)^2} = \text{Re} + j \cdot \text{Im}$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(\mathbf{Z})}{|\mathbf{Z}|}$$

$$\text{Ak } \cos \varphi = 1 \Rightarrow \text{Re}(\mathbf{Z}) = |\mathbf{Z}| \Rightarrow \text{Im}(\mathbf{Z}) = 0$$

$$\text{Im}(\mathbf{Z}) = \frac{X_C \cdot (X_L \cdot (X_C - X_L) - R^2)}{R^2 + (X_C - X_L)^2} = 0 \Rightarrow \text{Dve riešenia: } X_C = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L}; X_C = 0$$

Pre paralelnú kompenzáciu, s podmienkou $\cos \varphi = 0,95$ platí:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(\mathbf{Z})}{|\mathbf{Z}|} = \frac{\frac{R \cdot X_C^2}{R^2 + (X_C - X_L)^2}}{\left| \frac{R \cdot X_C^2}{R^2 + (X_C - X_L)^2} + j \cdot \frac{X_C \cdot (X_L \cdot (X_C - X_L) - R^2)}{R^2 + (X_C - X_L)^2} \right|}$$

$$\cos \varphi = \frac{R \cdot \sqrt{R^2 + X_C^2 - 2 \cdot X_C \cdot X_L + X_L^2} \cdot |X_C|}{\sqrt{(R^2 + X_L^2) \cdot (R^2 + (X_C - X_L)^2)}}$$

$$\text{Dve riešenia: } X_C = \frac{\cos \varphi \cdot (R^2 + X_L^2) \cdot (X_L \cdot \cos \varphi - R \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi})}{R^2 \cdot (\cos^2 \varphi - 1) + X_L^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

$$X_C = \frac{\cos \varphi \cdot (R^2 + X_L^2) \cdot (R \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} + X_L \cdot \cos \varphi)}{R^2 \cdot (\cos^2 \varphi - 1) + X_L^2 \cdot \cos^2 \varphi}$$

Po dosadení hodnôt: pre $\cos \varphi = 0,95$; $\mathbf{Z}_1 = R + j \cdot X_L = 400 + j \cdot 300 \Omega$:

$$0,95 = \frac{400 \cdot \sqrt{400^2 + X_C^2} - 2 \cdot X_C \cdot 300 + 300^2 \cdot |X_C|}{\sqrt{(400^2 + 300^2)} \cdot (400^2 + (X_C - 300)^2)}$$

$$X_C = \frac{7220}{7} - \frac{1520 \cdot \sqrt{39}}{21} \cong 1483,447474 \Omega \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = 5,493693035 \mu\text{F}$$

$$X_C = \frac{1520 \cdot \sqrt{39}}{21} + \frac{7220}{7} \cong 579,4096686 \Omega \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = 2,145744232 \mu\text{F}$$

Po dosadení hodnôt: pre $\cos \varphi = 1$; $\mathbf{Z}_1 = R + j \cdot X_L = 400 + j \cdot 300 \Omega$:

$$X_C = \frac{R^2 + X_L^2}{X_L} = \frac{400^2 + 300^2}{300} = 833,3 \Omega \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = 3,819718634 \mu\text{F}$$

$$X_C = 0 \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} = \infty \text{ F (neplatné riešenie)}$$

Pre sériovú kompenzáciu, s podmienkou $\cos \varphi = 1$ platí:

$$\mathbf{Z}_1 = R + j \cdot X_L \quad \mathbf{Z}_2 = -j \cdot X_C$$

$$\mathbf{Z} = \mathbf{Z}_1 + \mathbf{Z}_2 = R + j \cdot X_L - j \cdot X_C = \text{Re} + j \cdot \text{Im}$$

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(\mathbf{Z})}{|\mathbf{Z}|}$$

$$\text{Ak } \cos \varphi = 1 \Rightarrow \text{Re}(\mathbf{Z}) = |\mathbf{Z}| \Rightarrow \text{Im}(\mathbf{Z}) = 0$$

$$\text{Im}(\mathbf{Z}) = j \cdot X_L - j \cdot X_C = 0 \Rightarrow X_C = X_L$$

Pre sériovú kompenzáciu, s podmienkou $\cos \varphi = 0,95$ platí:

$$\cos \varphi = \frac{\text{Re}(\mathbf{Z})}{|\mathbf{Z}|} = \frac{R}{|R + j \cdot X_L - j \cdot X_C|} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_C - X_L)^2}}$$

Dve riešenia:

$$X_C = \frac{X_L \cdot \cos \varphi - R \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi}$$

$$X_C = \frac{R \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi} + X_L \cdot \cos \varphi}{\cos \varphi}$$

Po dosadení hodnôt: pre $\cos \varphi = 0,95$, $\mathbf{Z}_1 = R + j \cdot X_L = 400 + j \cdot 300 \Omega$:

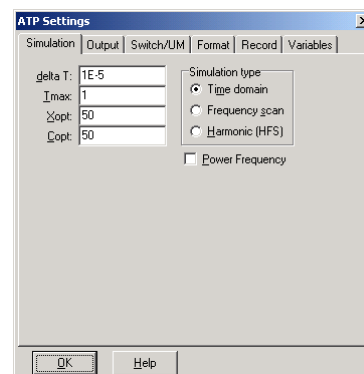
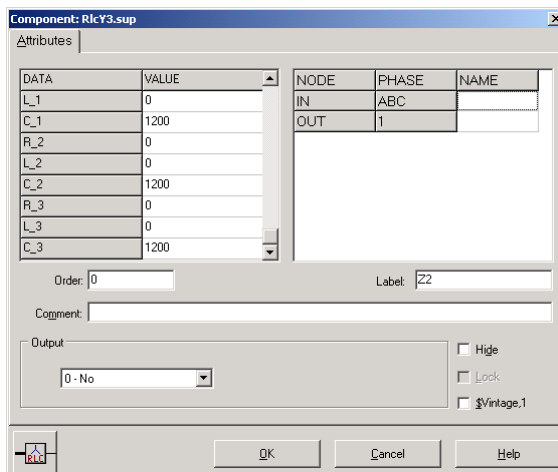
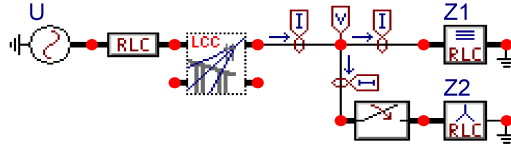
$$X_C = 300 - \frac{400 \cdot \sqrt{39}}{19} \cong 431,473642 \Omega \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} \cong 18,88783986 \mu\text{F}$$

$$X_C = \frac{400 \cdot \sqrt{39}}{19} + 300 \cong 168,5263579 \Omega \Rightarrow C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} \cong 7,377273027 \mu\text{F}$$

Po dosadení hodnôt: pre $\cos \varphi = 1$; $Z_1 = R + j \cdot X_L = 400 + j \cdot 300 \Omega$:

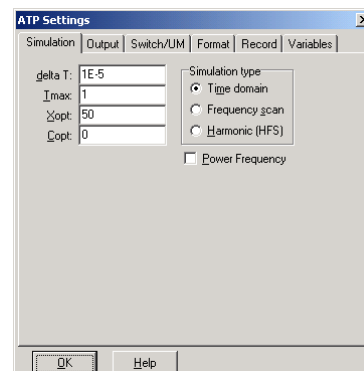
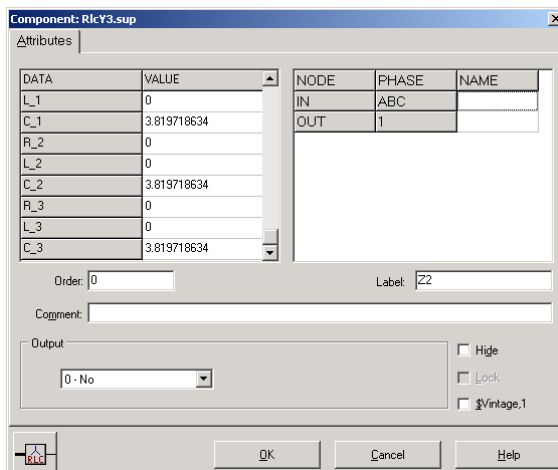
$$X_C = X_L = 300 \Omega \quad \Rightarrow \quad C = \frac{1}{\omega \cdot X_C} \cong 10,61032954 \mu\text{F}$$

Nastavenia parametrov pre paralelnú kompenzáciu s $\cos \varphi = 1$:



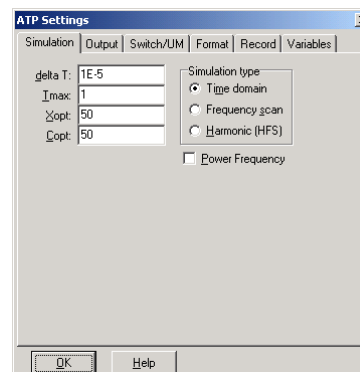
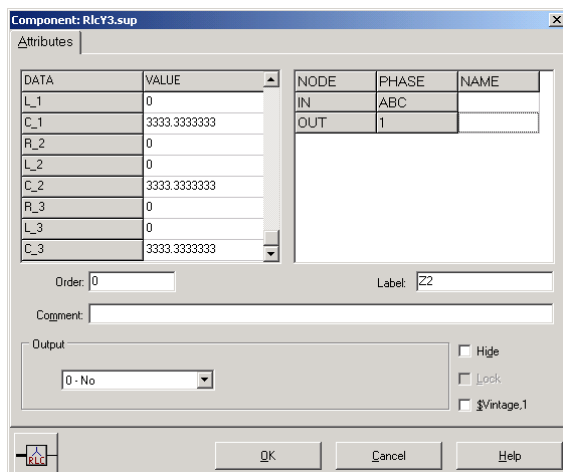
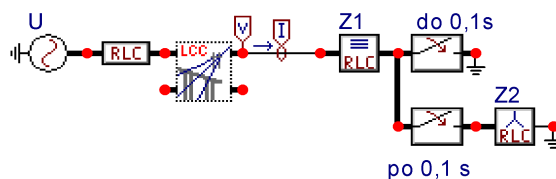
Obr. 7 Nastavenie parametrov kompenzačného prvku ($1/X_C = 1/833,33 = 1200 \mu\text{S}$) a časové podmienky

resp.:



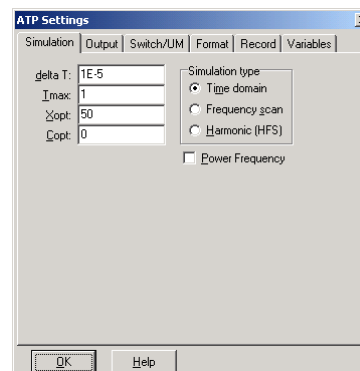
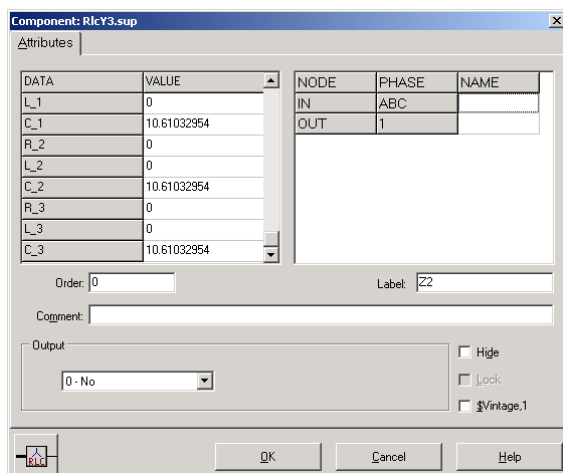
Obr. 8 Alternatívne nastavenie parametrov kompenzačného prvku ($C = 3,8197 \mu\text{F}$) a odpovedajúce časové podmienky pre simuláciu

Nastavenia parametrov pre sériovú kompenzáciu s $\cos \varphi = 1$:



Obr. 9 Nastavenie parametrov kompenzačného prvku ($1/X_C = 1/300 = 3333,333 \mu S$) a časové podmienky

resp.:

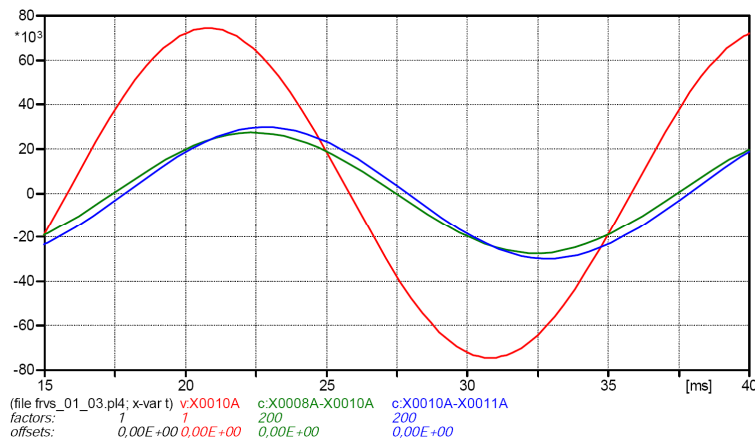


Obr. 10 Alternatívne nastavenie parametrov kompenzačného prvku ($C = 10,6103 \mu F$) a odpovedajúce časové podmienky pre simuláciu

Na priebehu rôznych veličín si ukážeme účinok kompenzácie.

Porovnaním **prúdov**:

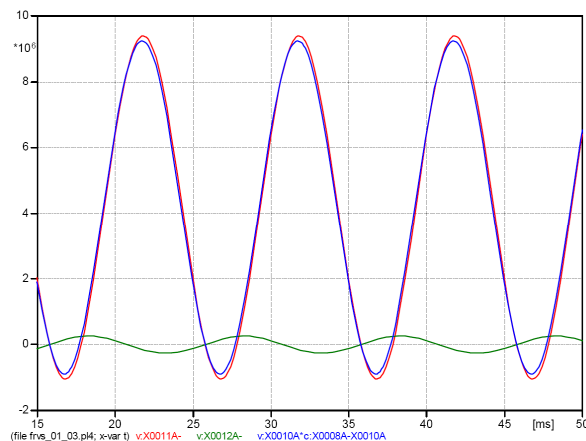
Na nasledujúcom obrázku je znázornený priebeh napätia v mieste kompenzácie a prúdy pred miestom kompenzácie (zelená krivka) a za miestom kompenzácie (modrá krivka). Je zřejmé, že prúd pred miestom kompenzácie má menšiu amplitúdu a tiež fázový posun voči napätiu. (**Pozn.:** pre potrebu zobrazenia bola amplitúda prúdu znásobená 200×).



Obr. 6 Priebeh napätia a prúdov v mieste kompenzácie

Porovnaním **výkonov**:

Činný výkon je definovaný ako stredná hodnota priebehu okamžitého výkonu $p(t) = u(t) \cdot i(t)$. Porovnaním nasledovných kriviek vidíme vplyv kompenzácie:



Obr. 7 Priebeh okamžitých hodnôt výkonov pri kompenzácii

kde:

Červená krivka je okamžitý výkon meraný na záťaži fázy A. Je zřejmé, že integrovaním v intervale jednej periódy a podelením dobou jednej periódy získame nenulovú hodnotu, ktorá odpovedá činnému výkonu spotrebovanému na odporovej časti záťaže. Pokles výkonu do zápornej hodnoty znamená jalovú časť výkonu, ktorá sa akumulovaním a vybíjaním indukčnosti vzájomne pri integrácii odčíta.

Zelená krivka je okamžitý výkon meraný na kondenzátorovej batérii. Je zřejmé, že integráciou po dobu periódy dostaneme nulovú hodnotu (pri čisto indukčnej záťaži). To znamená, že sa jedná o čisto jalovú spotrebu výkonu.

Modrá krivka je okamžitý výkon v mieste kompenzácie $p(t) = u(t) \cdot i(t)$. Vzhľadom k tomu, že kondenzátorová batéria nie je pripojená paralelne k čistej indukčnosti, ale k sériovej kombinácii rezistor a indukčnosť, nie je možné potlačiť jalovú zložku úplne (alebo priamym odčítaním výkonu kondenzátorov). Je však viditeľný úbytok v kladnej a aj v zápornej časti výkonovej charakteristiky, čo znamená, že časť jalovej energie pre záťaž je odoberaná z kondenzátora a nie zo zdroja.