

# OBSERWACJA NAPIĘĆ POWROTNYCH W UKŁADZIE MODELOWYM

## 1. Objasnienia wstępne do ćwiczenia

### 1.1. Napięcie powrotne

Tematem ćwiczenia jest badanie napięć powrotnych na modelu fragmentu układu elektroenergetycznego.

Napięcie powrotne jest to napięcie, jakie pojawia się między zaciskami jednego bieguna łącznika po zgaszeniu łuku ([1]).

Przebieg napięcia powrotnego jest zależny od parametrów i konfiguracji obwodu, w którym zainstalowany jest łącznik, jak również od parametrów dobudowanych do łącznika pojemności i oporności oraz parametrów łuku, jak: oporność połukowa i wartość napięcia gaszenia.

Napięcie powrotne występujące na stykach przy uwzględnieniu wpływu łuku i dodatkowych pojemności oraz oporności dobudowanych do łącznika nazywamy **napięciem powrotnym rzeczywistym**.

Napięcie to dla danego miejsca zainstalowania łącznika i przyjętego rodzaju zakłócenia nie jest jednoznaczne z uwagi na różnorodność wykonania łączników, a więc różnice w parametrach łuku i dobudowanych elementach,

Z uwagi na niejednoznaczność rzeczywistego napięcia powrotnego wprowadzono tzw. **napięcie powrotne spodziewane**, rozumiane jako napięcie powrotne na stykach łącznika idealnego, tj. łącznika bez łuku i bez dodatkowych dobudowanych oporności i pojemności. Napięcie to zależy jedynie od parametrów i konfiguracji układu elektroenergetycznego, w którym zainstalowany jest łącznik.

Znajomość przebiegu napięcia powrotnego ma duże znaczenie praktyczne. Przy danym przebiegu wzrostu wytrzymałości międzystykowej obwód może być przerwany tylko dla określonych przebiegów napięcia powrotnego. Przebiegi napięcia powrotnego przecinające przebiegi wytrzymałości międzystykowej powodują powstanie zapłonu, a co za tym idzie, ponowne pojawienie się łuku. Tak więc znajomość napięć powrotnych jest istotna dla doboru łącznika do danych warunków pracy.

Z drugiej strony, znajomość tych przebiegów dla różnych punktów układu elektroenergetycznego pozwala na ustalenie wymagań dla normalizacji prób łączników.

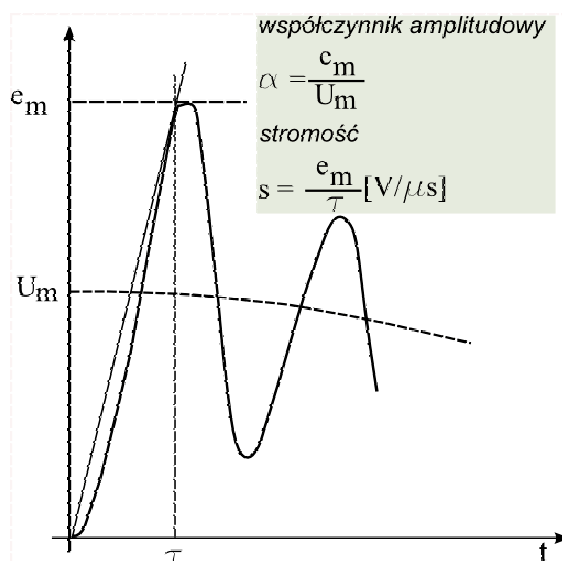
Przebiegi napięć powrotnych mogą być jednoczęstotliwościowe lub wieloczęstotliwościowe. Zgodnie z ostatnimi poglądami w normalizacji międzynarodowej, przebieg jednoczęstotliwościowy pokazany na rys.1 scharakteryzowany jest stromością oraz współczynnikiem amplitudy.

Przebiegi wieloczęstotliwościowe opisane są czterema parametrami, tj. dwoma stromościami i dwoma współczynnikami amplitud. Sposób wyznaczania w/w czterech parametrów przedstawiony jest na rys.2.

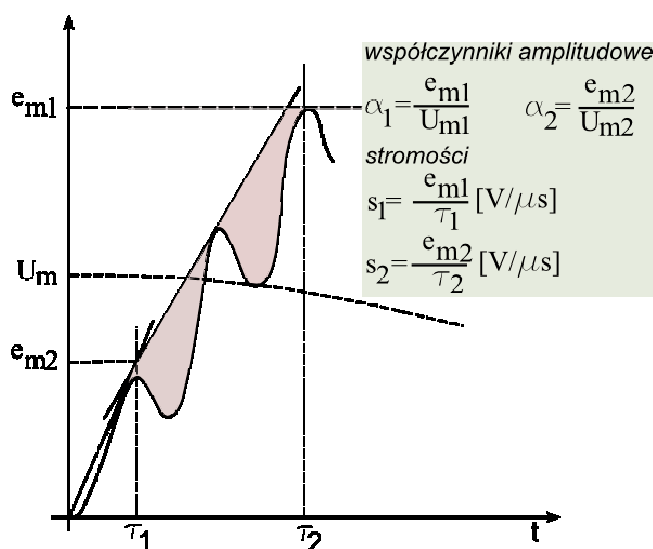
Przy wyznaczaniu stromości  $S_2$  i współczynnika amplitudy  $\alpha_1$  należy mieć na uwadze, że pola  $A_1$  i  $A_2$  pokazane na rys.2 powinny być równe.

Do obliczania przebiegów napięć powrotnych lub też dla budowy modeli, przy pomocy których istnieje możliwość pomiaru tych przebiegów, konieczna jest znajomość schematów zastępczych i parametrów elektrycznych dla tych schematów, dla elementów układu elektroenergetycznego, jak: gene-

ratory, transformatory, dławiki, przekładniki i linie długie.



Rys.1. Przebieg napięcia powrotnego jednoczęstotliwościowego z podaniem metody wyznaczenia dwu parametrów opisujących ten przebieg, tj. współczynnika amplitudy i stromości



Rys.2. Przebieg napięcia powrotnego wieloczęstotliwościowego z podaniem metody wyznaczenia czterech parametrów opisujących ten przebieg, tj. dwóch współczynników amplitud i dwóch stromości

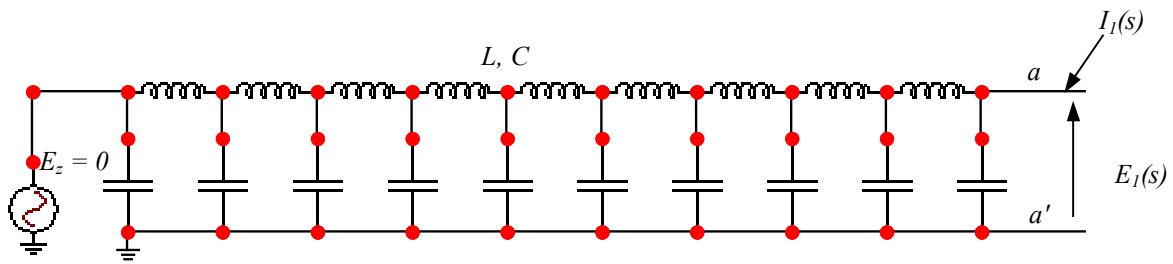
W ćwiczeniu prowadzone są pomiary na modelu o parametrach skupionych. Poniżej wykazano, że dla wyznaczania napięć powrotnych praktycznie wszystkie elementy sieciowe, z wyłączeniem linii długich, mogą być przedstawione schematami zastępczymi o parametrach skupionych.

## 1.2. Schematy zastępcze i parametry elementów układu sieciowego

### Generator

Uzwojenia stojana generatora można przedstawić jako linię długą o równomiernie rozłożonych indukcyjnościach, rezystancjach i pojemnościach. Do dalszych rozważań wydzielono jedną fazę gene-

ratora, co pokazano na rys.3. Ponieważ dla generatorów energetycznych  $\frac{L}{R} > 0.1$ , pominięto w schemacie zastępczym oporności czynne.



Rys.3. Schemat zastępczy wydzielonej do analizy matematycznej jednej fazy generatora

W dalszych rozważaniach wykorzystano zasadę superpozycji, dlatego przyjęto, że wewnętrzna SEM jest zwarta, tj.  $E_2(s) = 0$ , natomiast zaciski wyjściowe  $a-a'$  są przyłączone do źródła prądowego  $I_1(s)$ . Podanym na rys.3 oznaczeniom odpowiadają równania dla linii długiej w stanie nieustalonym:

$$E_1(s) = E_2(s) \cdot \text{ch}(s\sqrt{LC}) + ZI_2(s) \cdot \text{sh}(s\sqrt{LC}) = I_2(s)Z \cdot \text{sh}(s\sqrt{LC}) \quad (1.1)$$

$$I_1(s) = I_2(s) \cdot \text{ch}(s\sqrt{LC}) + \frac{E_2(s)}{Z} \cdot \text{sh}(s\sqrt{LC}) = I_2(s) \cdot \text{ch}(s\sqrt{LC}) \quad (1.2)$$

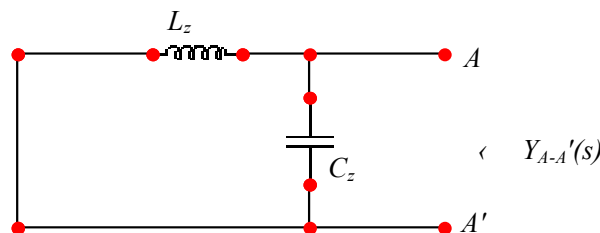
gdzie:  $L, C$  - całkowita indukcyjność i pojemność jednej fazy uzwojenia generatora,

$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$  - oporność falowa.

Przewodność generatorowa widziana z zacisków  $a-a'$  jest równa:

$$Y_{a-a'}(s) = \frac{I_1(s)}{E_1(s)} = \frac{\text{ctgh}(s\sqrt{LC})}{\sqrt{\frac{L}{C}}} \quad (1.3)$$

Modelowanie takiej funkcji jest możliwe przy pomocy linii łańcuchowych, dlatego dalej dla uproszczenia przeprowadzone będą rozważania dla dobrania parametrów obwodu zastępczego o jednej częstotliwości drgań własnych. Schemat tego obwodu podano na rys.4.



Rys.4. Schemat zastępczy jednej fazy generatora o jednej częstotliwości drgań własnych

Przewodność widziana z zacisków  $A-A'$  tego schematu wyraża się wzorem:

$$Y_{A-A'}(s) = \frac{1}{sL_z} + sC_z = \frac{1 + s^2L_zC_z}{sL_z} \quad (1.4)$$

Należy sobie zdawać sprawę z tego, że schemat zastępczy odpowiadający linii długiej posiada nieskończenie wiele oscylacji, ponieważ funkcja  $\text{ctgh}(s\sqrt{LC})$  jest funkcją okresową, natomiast sche-

mat uproszczony posiada tylko jedną pulsację drgań własnych. Dlatego też obwód uproszczony podany na rys.4 może być dobrany jedynie dla jednej częstotliwości drgań własnych obwodu reprezentowanego linią długą, pokazanego na rys. 3.

Parametry obwodu uproszczonego dobrane będą dla pierwszej harmonicznej drgań linii długiej, tj. dla:

$$s = j\nu = j\nu_1 \quad (1.5)$$

Przyrównując równanie (1.3) i (1.4) stronami, podstawiając w nich za  $s$  zależność z równania (1.5) i wykorzystując fakt, że:

$$\operatorname{ctgh}(j\nu) = \frac{\operatorname{ch}(j\nu)}{\operatorname{sh}(j\nu)} = \frac{e^{j\nu} + e^{-j\nu}}{2} \cdot \frac{2}{e^{j\nu} - e^{-j\nu}} = \frac{\cos \nu + j \sin \nu - \cos \nu + j \sin \nu}{\cos \nu + j \sin \nu + \cos \nu - j \sin \nu} = \frac{1}{j} \operatorname{ctg} \nu$$

otrzymano:

$$\frac{\nu_1 \sqrt{LC} \cdot \operatorname{ctg}(\nu_1 \sqrt{LC})}{j \nu_1 L} = \frac{1 - \nu_1^2 L_z C_z}{j \nu_1 L} \quad (1.6)$$

W równaniu występują dwa parametry, które należy dobrać, a mianowicie  $L_z$  i  $C_z$ . Ponieważ w obu schematach muszą być te same prądy przy zwarceniu zacisków wyjściowych  $a-a'$  i  $A-A'$ , stąd

$$L_z = L \quad (1.7)$$

Ze wzoru (1.6) można obecnie wyznaczyć zastępczą pojemność:

$$C_z = \frac{1 - \nu_1 \sqrt{LC} \cdot \operatorname{ctg}(\nu_1 \sqrt{LC})}{\nu_1^2 LC} \cdot C \quad (1.8)$$

Rozwijając w szereg wyrażenie na  $\operatorname{ctg} \operatorname{ctgh}(\nu_1 \sqrt{LC})$  otrzymano:

$$C_z = \frac{1 - \nu_1 \sqrt{LC} \cdot \left[ \frac{1}{\nu_1 \sqrt{LC}} - \frac{1}{3} \nu_1 \sqrt{LC} - \frac{1}{45} (\nu_1 \sqrt{LC})^3 + \dots \right]}{(\nu_1^2 \sqrt{LC})^2} \cdot C = \frac{1}{3} + \frac{1}{45} \nu_1^2 LC + \dots \quad (1.9)$$

Z powyższego równania wynika, że przy drganiach wymuszonych  $\nu_1$  mniejszych od drgań swobodnych, proporcjonalnych do  $\frac{1}{\sqrt{LC}}$ , pojemność zastępcza równa się

$$C_z \cong \frac{1}{3} C \quad (1.10)$$

Przypadek ten ma miejsce wtedy, gdy do zacisków generatora dołączony jest obwód zewnętrzny. Parametry tego obwodu zmniejszają drgania wymuszone w stosunku do drgań swobodnych. Jeżeli natomiast rozważamy drgania swobodne dla wydzielonego generatora, wtedy pulsacje tych drgań można wyznaczyć z przyrównania do zera równania (1.3):

$$Y(j\nu) = \frac{\nu \sqrt{LC} \operatorname{ctg}(\nu \sqrt{LC})}{j \nu L} = 0 \quad (1.11)$$

stąd:

$$\operatorname{ctg}(\nu \sqrt{LC}) = 0 \quad (1.12)$$

a więc:

$$\nu = (2k - 1) \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{dla } k = 1, 2, 3, \dots \quad (1.13)$$

Dla pierwszej harmonicznej  $k = 1$ , mamy:

$$\nu = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (1.14)$$

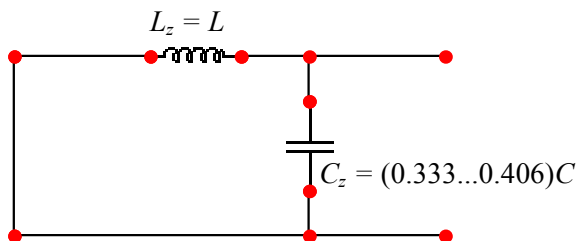
Pulsacja dla obwodu podanego na rys.1.4 wyrażana jest wzorem:

$$\nu_z = \frac{1}{\sqrt{L_z C_z}} \quad (1.15)$$

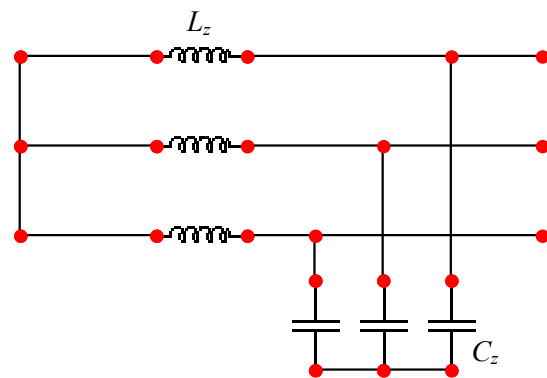
Przyrównując obie zależności na pulsacje stronami i wykorzystując zależność (1.5) otrzymano:

$$C_z = \left(\frac{2}{\pi}\right)^2 C \approx 0.406 \cdot C \quad (1.16)$$

Ostatecznie przyjęty schemat zastępczy dla jednej fazy generatora podano na rys.5, a dla generatorów trójfazowych nieziemionych lub uziemionych przez duże oporności, co praktycznie ma zawsze miejsce, można przyjąć schemat podany na rys.6.



Rys.5. Schemat zastępczy jednej fazy generatora



Rys.6. Schemat zastępczy generatora trójfazowego

Wartości liczbowe indukcyjności i pojemności fazowych generatora można wyznaczyć z podanych niżej wzorów.

Indukcyjność fazową generatora można obliczyć ze wzoru:

$$L = \frac{x_d''}{\omega} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (1.17)$$

gdzie:  $x_d''$  - oporność przejściowa wstępna w jednostkach względnych:

dla turbogeneratorów  $x_d'' = 0.125 \dots 0.15$

dla hydrogeneratorów  $x_d'' = 0.20 \dots 0.35$

$U_n$  - napięcie przewodowe,

$S_n$  - moc znamionowa generatora,

$\omega$  - pulsacja ( $\omega = 314 \text{ s}^{-1}$ )

Pojemność fazy generatora może być obliczona z poniższego wzoru empirycznego:

$$C = \gamma \frac{S}{U} \quad (1.18)$$

gdzie:  $\gamma$  - współczynnik wynoszący:

dla turbogeneratorów  $\gamma = (0.025 \dots 0.035) \cdot 10^{-9}$  [F/A]

dla hydrogeneratorów  $\gamma = (0.05 \dots 0.10) \cdot 10^{-9}$  [F/A]

### Transformator

Ustalenie schematu zastępczego transformatora jest zagadnieniem stosunkowo trudnym, ponieważ w schematach zastępczych uzwojeń fazowych reprezentowanych przez linię długą należy uwzględniać sprzężenia indukcyjne, nieliniowość wprowadzoną przez żelazo rdzenia, znaczną zależność parametrów elektrycznych od częstotliwości, z drugiej zaś strony różnice w liczbie faz, w połączeniach i w konstrukcji,

Nie wnikając bliżej w szczegóły rozważań matematycznych, poniżej podano schemat zastępczy transformatora opracowany przez Vogelsangera w oparciu o pomiary na transformatorach rzeczywistych.

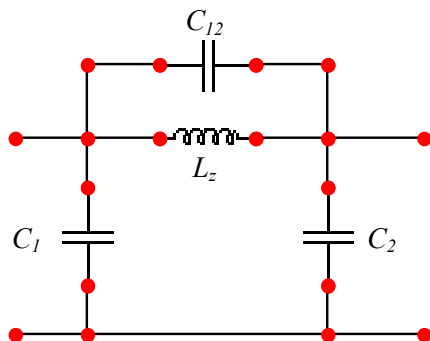
Schemat ten pokazano na rys.1.7. W schemacie tym:

$L_z$  - indukcyjność proporcjonalna do indukcyjności rozproszenia

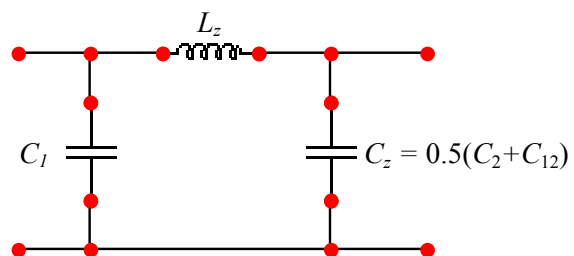
$C_1$  - pojemność od strony uzwojenia wewnętrznego, tj. uzwojenia o niższym napięciu,

$C_2$  - pojemność uzwojenia o górnym napięciu,

$C_{12}$  - pojemność międzyuzwojeniowa.



Rys.7. Schemat zastępczy transformatora jednofazowego



Rys.8. Uproszczony schemat zastępczy transformatora jednofazowego

Dalsze uproszczenie podane na rys.8 wprowadzone było przez Wagnera. W układzie tym przyłączono pojemność międzyuzwojeniową do strony górnego napięcia, przy czym:

$$C_z = \frac{1}{2}(C_2 + C_{12}) \quad (1.19)$$

W dalszych rozważaniach wykorzystany będzie schemat podany na rys.8, przy czym należy tu zaznaczyć, że przy próbach prowadzonych przez Katedrę z transformatorami dużej mocy o górnym napięciu 110kV uzyskano praktyczną zgodność przebiegów zmierzonych i obliczonych w oparciu o ten schemat.

Indukcyjność  $L_z$  występująca w tym schemacie można wyznaczyć znając indukcyjność rozpro-

szeniową transformatora:

$$L_r = \frac{\Delta U_z}{\omega} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \quad (1.20)$$

gdzie:  $\Delta U_z$  - napięcie zwarcia transformatora w jednostkach względnych,  
 $U_n$  - napięcie znamionowe,  
 $S_n$  - moc znamionowa transformatora,  
 $\omega$  - pulsacja ( $\omega = 314\text{s}^{-1}$ )

Na skutek wpływu efektu naskórkowości na indukcyjność wewnętrzną przewodów uzwojeń oraz wpływu prądów wirowych w żelazie, indukcyjność  $L_z$  w schemacie zastępczym jest mniejsza od indukcyjności rozproszeniowej  $L_r$  wyznaczonej przy 50Hz. Praktycznie stwierdzono, że ma to miejsce w zakresie częstotliwości do ok. 20kHz.

$$L_z = (0.8 \dots 0.95) \cdot L_r \quad (1.21)$$

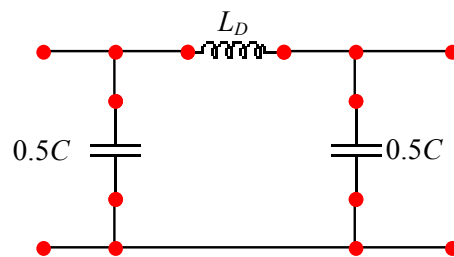
Pojemności w schemacie zastępczym można wyznaczyć ze wzorów empirycznych podanych przez Vogelsangera:

$$C = \gamma \frac{S_n}{U_n} \quad (1.22)$$

gdzie:  $\gamma$  - współczynnik wynoszący:  
 $(0.025 \dots 0.035) \cdot 10^{-9}$  [F/A] dla pojemności  $C_2$  od strony górnego napięcia,  
 $(0.004 \dots 0.01) \cdot 10^{-9}$  [F/A] dla pojemności  $C_1$  od strony dolnego napięcia,  
 $U_n$  - napięcie znamionowe międzyprzewodowe,  
 $S_n$  - moc znamionowa transformatora

## Dławik

Schemat zastępczy jednej fazy dławika można przedstawić w sposób podany na rys.1.9.



Rys.9. Schemat zastępczy dławika

Indukcyjność zastępczą dławika przy uwzględnieniu wpływu naskórkowości można obliczyć ze wzoru:

$$L_z = (0.75 \dots 0.80) \frac{\Delta U_z}{\sqrt{3}} \cdot \frac{U_n}{\omega I_n} \quad (1.23)$$

gdzie:  $\Delta U_z$  - procentowe napięcie dławika,  
 $U_n$  - napięcie znamionowe dławika,  
 $I_n$  - prąd znamionowy dławika,  
 $\omega$  - pulsacja ( $\omega = 314\text{s}^{-1}$ )

## Przekładniki prądowe i napięciowe

Przekładniki napięciowe są zazwyczaj pomijane w analizie napięć powrotnych. Przekładniki prądowe modelowane są jako pojemności skupione stosując poniższą zasadę:

- dla napięć 3 ... 10kV przyjmuje się ok. 150pF
- 20 ... 40kV przyjmuje się ok. 300pF
- 110kV przyjmuje się ok. 350pF
- 220kV przyjmuje się ok. 500pF

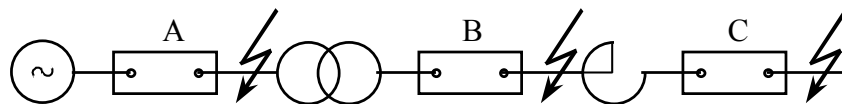
Indukcyjności przekładników prądowych są rzędu kilkudziesięciu  $\mu\text{H}$ /fazę i są pomijane.

## Linia długa

Linie długie są modelowane przy pomocy linii łańcuchowych ułożonych z czwórników typu  $\pi$ ,  $T$  lub  $\Gamma$ . Analiza tychże opisana szczegółowo w [2] nie wchodzi w zakres niniejszego ćwiczenia i zostanie pominięta w rozważaniach.

## 2. Badany obwód i jego model elektryczny

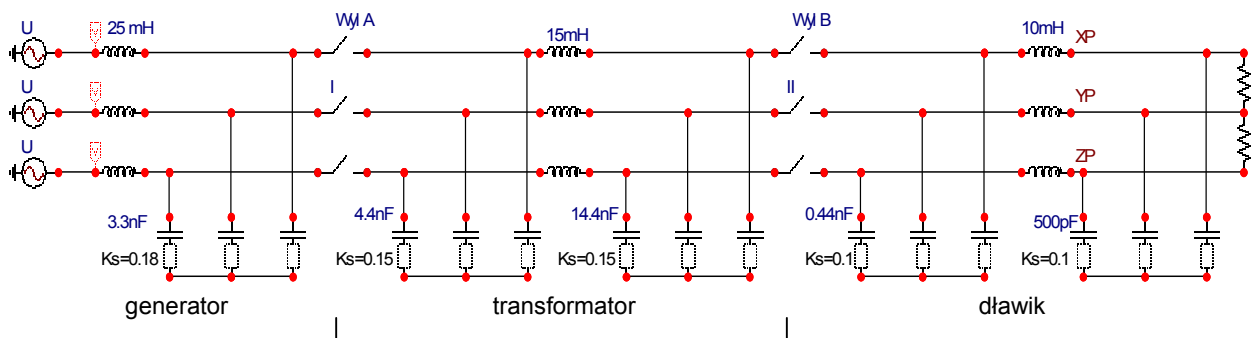
Obliczanie napięć powrotnych w wieloczęstotliwościowych układach rzeczywistych zostanie zrealizowane do fragmentu sieci elektroenergetycznej, jakiej schemat ideowy pokazano na rys. 10.



Rys.10. Schemat ideowy układu elektroenergetycznego, w którym badane są napięcia powrotne

Uwidoczniono na nim trzy główne elementy postrzegane od strony źródła, a mianowicie: generator, transformator i dławik a także wyłączniki separujące te elementy oraz rozważane lokalizacje dwu- i trójfazowych zwarć w tym systemie.

Model elektryczny budowany jest w środowisku programu ATP/EMTP wg podanych powyżej schematów zastępczych dla poszczególnych elementów układu, przy czym wartości indukcyjności, pojemności czy oporności modelu są równe liczbowo odpowiednim wartościom parametrów elementów rzeczywistych (rys.11)



Rys.11. Schemat zastępczy układu w/w fragmencie układu elektroenergetycznego

W ramach ćwiczenia należy obliczyć parametry elementów układu występujące w schemacie zastępczym z rys.11, dla danych:



generator	$U_n =$ " $x_d =$ " $x_d =$	kV	$S_n$	MVA
			dla turbogenerators dla hydrogenerators	
transformator	$U_1/U_2 =$ $\Delta U_z =$	kV/kV	$S_n$	MVA
dławik	$U_n =$ $\Delta U_z =$		$I_n$	A

## 2.1. Protokół z przeprowadzonych obliczeń symulacyjnych

Obliczone i dobrane parametry dla badanego układu należy zestawić w podanej niżej tablicy parametrów układu.

	Generator		Transformator			Dławik	
	$L_z$ [mH]	$C_z$ [nF]	$L_z$ [mH]	$C_1$ [nF]	$C_2$ [nF]	$L_z$ [mH]	$C$ [pF]
Parametry obliczone							

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów oblicz parametry charakteryzujące napięcia powrotnego i zestaw w podanej niżej tablicy pomiarów.

Symbol zwarcia	wsp. biegunowy	gdy wieloczęstotliwościowy					
		gdy jednoczęstotliwościowy			t[msek]	Um[kV]	s[kV/msek]
		t[msek]	Um[kV]	s[kV/msek]			
<b>A</b>							
I	1						
II	1						
III	1						
<b>B</b>							
II	1						
III	1						
<b>ZWARCIE TRÓJFAZOWE (BEZ ZIEMI)</b>							
Pierwszy biegun wyłączający							
<b>A</b>							
I	1.5						
II	1.5						
III	1.5						
<b>B</b>							
II	1.5						
III	1.5						

Drugi biegun wyłączający							
<b>A</b>							
I	$\sqrt{3/2}$						
II	$\sqrt{3/2}$						
III	$\sqrt{3/2}$						
<b>B</b>							
II	$\sqrt{3/2}$						
III	$\sqrt{3/2}$						

### 2.3. Opracowanie pomiarów i dyskusja wyników

1. Opierając się na otrzymanych przebiegach, należy wyznaczyć współczynnik amplitudy oraz stromość napięcia powrotnego.
2. Powyższe parametry należy wyznaczyć zgodnie z zasadami podanymi na rysunku 1 dla obwodów jednoczęstotliwościowych oraz na rys.2 dla obwodów wieloczęstotliwościowych.
3. W oparciu o uzyskane dane liczbowe należy wskazać na szczególnie niekorzystne - z uwagi na napięcia powrotne - lokalizacje wyłączników oraz zwarcia.
4. We wnioskach należy omówić wpływ poszczególnych elementów układu elektroenergetycznego na przebiegi napięcia powrotnego.

#### Literatura

1. Ciok Z.: Laboratorium techniki łączenia. WIW, Warszawa 1975.
2. Gert R.: Zjistoyani zotaveneho napeti v rozvodnych siticb. El. Obzor, 1952 (str.102).
3. Kryński J.: Elektryczne aparaty rozdzielcze, PWN, Łódź-Warszawa, 1964.
4. PN-/E-01000 - Łączniki elektroenergetyczne, nazwy i określenia. Projekt.