

**ANDRZEJ KANICKI**

**WYZNACZANIE  
WIELKOŚCI ZWARCIOWYCH  
W SYSTEMIE ELEKTROENERGETYCZNYM**

ŁÓDŹ 2001



## SPIS TREŚCI

	Str
1. <b>WSTĘP</b> .....	7
2. <b>WIADOMOŚCI OGÓLNE O ZWARCIACH</b> .....	8
2.1. <b>Określenia</b> .....	8
2.2. <b>Częstość występowania zwarć</b> .....	9
2.3. <b>Przyczyny występowania zwarć</b> .....	10
2.4. <b>Skutki zwarć</b> .....	10
2.5. <b>Przebieg prądu zwarciovego</b> .....	13
2.5.1. <b>Wprowadzenie</b> .....	13
2.5.2. <b>Zwarcia odległe</b> .....	13
2.5.3. <b>Zwarcia pobliskie</b> .....	21
2.5.4. <b>Wyższe harmoniczne prądu zwarciovego</b> .....	28
2.5.5. <b>Wpływ regulacji napięcia</b> .....	29
2.6. <b>Metoda jednostek względnych</b> .....	30
2.7. <b>Pytania kontrolne</b> .....	34
2.8. <b>Zadania</b> .....	34
2.8.1. <b>Zadanie 1</b> .....	34
3. <b>ZASADY OBLICZANIA PRĄDÓW I NAPIĘĆ PRZY ZWARCIACH NIESYMETRYCZNYCH</b> .....	37
3.1. <b>Element liniowy i jego macierz impedancyjna</b> .....	37
3.2. <b>Podstawy teorii składowych symetrycznych</b> .....	39
3.3. <b>Schematy zastępcze dla składowych symetrycznych</b> .....	44
3.4. <b>Transformacja składowych symetrycznych</b> .....	48
3.5. <b>Zwarcie jednofazowe</b> .....	53
3.6. <b>Zwarcie dwufazowe</b> .....	59
3.7. <b>Zwarcie dwufazowe doziemne</b> .....	64
3.8. <b>Zwarcie trójfazowe doziemne, zwarcie trójfazowe</b> .....	69
3.9. <b>Porównanie prądu początkowego dla różnych rodzajów zwarcia</b> .....	69
3.10. <b>Wpływ stosunku <math>\frac{X(0)}{X(1)}</math> ma wartość prądu początkowego i napięcia</b> .....	71
3.11. <b>Modele trójfazowe elementów układu elektroenergetycznego dla analizy zakłóceń niesymetrycznych</b> .....	74
3.12. <b>Pytania kontrolne</b> .....	77
4. <b>IMPEDANCJE ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ W UKŁADZIE SKŁADOWYCH SYMETRYCZNYCH</b> .....	79
4.1. <b>Maszyny synchroniczne</b> .....	79
4.2. <b>Maszyny asynchroniczne</b> .....	80
4.3. <b>Dławiki przeciwzwarciovowe</b> .....	81
4.4. <b>Impedancje wzdluzne napowietrznych linii elektroenergetycznych</b> .....	81
4.4.1. <b>Linia jednotorowa bez przewodu odgromowego</b> .....	81
4.4.2. <b>Linia jednotorowa z jednym przewodem odgromowym</b> .....	82
4.4.3. <b>Linia jednotorowa z dwoma przewodami odgromowymi</b> .....	84
4.4.4. <b>Linia dwutorowa z dwoma przewodami odgromowymi</b> .....	85
4.5. <b>Pojemności linii napowietrznej</b> .....	89
4.6. <b>Impedancje wzdluzne linii kablowych</b> .....	90

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

4.6.1.	Linia kablowa zbudowana z kabli ekranowanych jednofazowych.....	90
4.6.2.	Linia kablowa zbudowana z kabla z izolacją rdzeniową.....	92
4.7.	<b>Pojemności kabli</b> .....	92
4.7.1.	Kabel trójfazowy z izolacją rdzeniową.....	92
4.7.2.	Kabel ekranowany jednofazowy.....	93
4.8.	<b>Transformatory dwuuzwojeniowe</b> .....	93
4.8.1.	Wstęp.....	93
4.8.2.	Transformator YNd.....	94
4.8.3.	Transformator YNyn.....	95
4.8.4.	Transformator YNy.....	97
4.8.5.	Impedancja magnesująca transformatora dla składowej zerowej.....	98
4.9.	<b>Transformatory trójuzwojeniowe</b> .....	99
4.10.	<b>Transformatory dwuuzwojeniowe połączone w zygzak</b> .....	101
4.11.	<b>Autotransformatory</b> .....	102
4.11.1.	Autotransformator bez uzwojenia kompensacyjnego z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej.....	102
4.11.2.	Autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym i z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej $YN_{auto,d}$ .....	104
4.11.3.	Autotransformator z uzwojeniem kompensacyjnym, z zamkniętą drogą dla strumienia składowej zerowej oraz z nie uziemionym punktem neutralnym.....	106
4.11.4.	Autotransformator trójkolumnowy bez uzwojenia kompensacyjnego.....	107
4.11.5.	Autotransformator trójkolumnowy z uzwojeniem kompensacyjnym.....	107
4.12.	<b>Warunki skuteczności uziemienia punktu neutralnego sieci i sposoby pracy punktów neutralnym transformatorów elektroenergetycznych</b> .....	108
4.13.	<b>Zestawienie schematów zastępczych i impedancji transformatorów elektroenergetycznych</b> .....	109
4.14.	<b>Transformacja prądów zwarć niesymetrycznych przez transformatory</b> .....	112
4.15.	<b>Napięcia poza miejscem zwarcia</b> .....	115
4.16.	<b>Pytania kontrolne</b> .....	117
4.17.	<b>Zadania</b> .....	122
4.17.1.	Zadanie 1.....	122
4.17.2.	Zadanie 2.....	123
4.17.3.	Zadanie 3.....	133
4.17.4.	Zadanie 4.....	139
4.17.5.	Zadanie 5.....	140
4.17.6.	Zadanie 6.....	140
5.	<b>ZWARCIA DOZIEMNE W SIECI Z NIESKUTECZNIE UZIEMIONYM PUNKTEM NEUTRALNYM</b> .....	142
5.1.	<b>Własności sieci z nieskończone uziemionym punktem neutralnym</b> .....	142
5.2.	<b>Prąd i napięcie w miejscu zwarcia doziemnego – sieć z izolowanym punktem neutralnym</b> .....	144
5.3.	<b>Rozpływ prądu zwarcia doziemnego – sieć z izolowanym punktem neutralnym</b> ...	149
5.4.	<b>Kompensacja prądu doziemnego</b> .....	157
5.5.	<b>Uziemienie punktu neutralnego sieci przez rezystor</b> .....	162
5.6.	<b>Pytania kontrolne</b> .....	164
5.6.1.	Sieć z izolowanym punktem neutralnym.....	164
5.6.2.	Sieć z kompensacją prądu zwarcia doziemnego.....	164
5.6.3.	Sieć z punktem neutralnym uziemionym przez rezystor.....	165
5.6.4.	Różne typy sieci.....	165
6.	<b>ZASADY OBLICZANIA CHARAKTERYSTYCZNYCH PARAMETRÓW ZWARCIOWYCH</b> .....	167
6.1.	<b>Zasady obliczania charakterystycznych parametrów zwarciovych według</b>	

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

<b>normy PN-74/E-05002</b> .....	167
6.1.1. Postanowienia ogólne.....	167
6.1.2. Założenia upraszczające.....	167
6.1.3. Wybór konfiguracji systemu elektroenergetycznego.....	168
6.1.4. Wybór miejsca i rodzaju zwarcia.....	168
6.1.5. Składowa zgodna prądu początkowego w miejscu zwarcia $I_{(1)}$ .....	169
6.1.6. Prąd początkowy $I_p$ w miejscu zwarcia.....	169
6.1.7. Prąd zwarciový udarowy $i_u$ w miejscu zwarcia.....	169
6.1.8. Moc zwarciová.....	171
6.1.9. Prąd wyłączeniowy symetryczny $I_{ws}$ .....	171
6.1.10. Prąd wyłączeniowy niesymetryczny $I_{wus}$ .....	172
6.1.11. Prąd zastępczy zwarciový $t_z$ – sekundowy $I_{tz}$ .....	173
6.1.12. Wpływ silników asynchronicznych na charakterystyczne parametry prądu zwarciového.....	174
6.1.12.1. <i>Prąd udarowy</i> .....	174
6.1.12.2. <i>Prąd wyłączeniowy symetryczny</i> .....	175
6.1.12.3. <i>Prąd wyłączeniowy niesymetryczny</i> .....	176
6.1.12.4. <i>Zastępczy prąd zwarciový <math>t_z</math> – sekundowy</i> .....	176
6.2. <b>Metoda ogólnego i indywidualnego zanikania</b> .....	178
6.3. <b>Zasady obliczania charakterystycznych parametrów zwarciových według normy PN-EN 60909-0:2002 (U)</b> .....	179
6.3.1. Założenia do obliczeń.....	179
6.3.2. Maksymalny prąd zwarciový.....	180
6.3.3. Minimalny prąd zwarciový.....	181
6.3.4. Impedancje elementów systemu elektroenergetycznego i współczynniki korekcyjne impedancji.....	181
6.3.4.1. <i>Sieć elektroenergetyczna zastępcza</i> .....	181
6.3.4.2. <i>Transformatory</i> .....	181
6.3.4.3. <i>Generator synchroniczny</i> .....	183
6.3.4.4. <i>Silniki asynchroniczne</i> .....	185
6.3.4.5. <i>Przekształtniki statyczne</i> .....	187
6.3.4.6. <i>Kondensatory i obciążenia niewirujące</i> .....	187
6.3.5. Prąd zwarciový początkowy $I_k''$ .....	187
6.3.6. Prąd zwarciový udarowy $i_p$ .....	188
6.3.6.1. <i>Zwarcie w sieci promieniowej</i> .....	188
6.3.6.2. <i>Zwarcie w sieci zamkniętej</i> .....	189
6.3.7. Składowa aperiodyczna prądu zwarciového $i_{d.c.}$ .....	190
6.3.8. Prąd wyłączeniowy symetryczny $I_b$ .....	190
6.3.8.1. <i>Zwarcie odległe</i> .....	190
6.3.8.2. <i>Zwarcie pobliskie w sieci nie zamkniętej</i> .....	190
6.3.8.3. <i>Zwarcie pobliskie w sieci zamkniętej</i> .....	192
6.3.9. Prąd zwarciový ustalony $I_k$ .....	193
6.3.9.1. <i>Uwagi ogólne</i> .....	193
6.3.9.2. <i>Maksymalny prąd zwarciový ustalony</i> .....	193
6.3.9.3. <i>Minimalny prąd zwarciový ustalony</i> .....	194
6.3.10. Prądy zwarciové przy zwarciu na zaciskach silnika asynchronicznego.....	195
6.3.11. Całka Joule'a i zastępczy prąd zwarciový cieplny $I_{th}$ .....	195
6.3.12. Zwarcia w sieci niskiego napięcia z jednoczesną przerwą po stronie średniego napięcia.....	198
6.3.13. Algorytm obliczania wielkości zwarciových wg PN-EN 60909-0:2002.....	199
6.4. <b>Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarć doziemnych wg normy PN-EN 60909-3: 2002 (U)</b> .....	200

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

6.5.	<b>Pytania kontrolne</b> .....	202
6.6.	<b>Zadania</b> .....	202
6.6.1.	Zadania wykonane zgodnie z normą PN-74/E-05002.....	202
6.6.1.1.	<i>Zadanie 1</i> .....	202
6.6.2.	Zadania wykonane zgodnie z normą PN-EN 60909-0.....	209
6.6.2.1.	<i>Zadanie 2</i> .....	209
7.	<b>OBLICZENIA WIELKOŚCI ZWARCIOWYCH ZA POMOCĄ KOMPUTERÓW</b> .....	216
7.1.	<b>Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do obliczania zwarć przy założeniu jednakowych sił elektromotorycznych generatorów</b> .....	216
7.1.1.	Obliczanie prądów i napięć przy zwarciach symetrycznych.....	216
7.1.2.	Obliczanie prądów i napięć przy zwarciach niesymetrycznych.....	219
7.2.	<b>Zastosowanie metody potencjałów węzłowych do obliczania zwarć w sieci ze skutecznym i nieskutecznym uziemionym punktem neutralnym</b> .....	221
7.3.	<b>Pytania kontrolne</b> .....	223
8.	<b>METODY OGRANICZANIA PRĄDÓW ZWARCIOWYCH</b> .....	225
8.1.	<b>Wzrost mocy zwarciovych</b> .....	225
8.2.	<b>Metody ograniczania mocy zwarciovych</b> .....	225
8.2.1.	Wstęp.....	225
8.2.2.	Optymalizacja struktury sieci w celu ograniczenia prądów zwarciovych.....	226
8.2.3.	Automatyczny podział sieci podczas zwarcia.....	228
8.2.4.	Przegląd specjalnych urządzeń ograniczających prądy zwarciovowe.....	228
8.2.5.	Dławiki przeciwzwarciovowe.....	229
8.2.6.	Wyłączniki ograniczające.....	230
8.2.7.	Ograniczanie prądów zwarć doziemnych.....	232
8.3.	<b>Pytania kontrolne</b> .....	232
	<b>LITERATURA</b> .....	233
Z1	<b>PODKŁADY DO RYSOWANIA WYKRESÓW WSKAZOWYCH</b> .....	235
Z2	<b>PRZYKŁADOWE ZADANIA EGZAMINACYJNE</b> .....	237

### 1. WSTĘP

Skrypt opisuje metodologię obliczania prądów zwarciovych w systemie elektroenergetycznym. We wstępnej części zdefiniowano pojęcie zwarcia oraz przeanalizowano przyczyny i skutki zwarć zwracając szczególną uwagę na skutki powodowane przez palący się swobodnie łuk elektryczny towarzyszący zwarceniu. Omówiono także przebiegi prądów i napięć podczas zwarcia w różnych miejscach i w różnych sieciach elektroenergetycznych. Następnie została omówiona metoda składowych symetrycznych, ciągle jeszcze jedyna metoda stosowana do praktycznego obliczania zakłóceń niesymetrycznych. Metodę tę zastosowano do wyprowadzenia wzorów na prądy i napięcia podczas różnych zwarć niesymetrycznych w sieci ze skutecznie i nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym oraz wzorów na impedancje elementów sieci elektroenergetycznej w układzie składowych symetrycznych. Położono nacisk na rysowanie wykresów wskazowych dla zakłóceń niesymetrycznych jako bardzo ważnego sposobu obrazowania zjawisk towarzyszącym tego typu zakłóceniu. Bardzo szczegółowo zostały omówione zwarcia doziemne (jednofazowe) w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym albowiem częściej inżynierowie mają do czynienia z sieciami średnich napięć niż z sieciami wysokich napięć. Wyjaśniono zjawiska fizyczne charakterystyczne dla doziemień. Następna część skryptu dotyczy obliczeń charakterystycznych parametrów zwarciovych według zaleceń normatywnych, obliczeń zgodnie z Polską Normą PN-74/E-05002. Obliczenia prądów i napięć podczas zwarcia z wykorzystaniem programów komputerowych to następny rozdział tego skryptu, przy czym podano tu jedynie ogólne wzory umożliwiające tego typu obliczenia nie analizując sposobów zapamiętywania tych informacji w komputerze oraz metod rozwiązywania układu równań liniowych opisujących sieć elektroenergetyczną podczas zwarcia. Ostatnia część skryptu dotyczy sposobów ograniczania prądów zwarciovych.

Poszczególne rozdziały zostały uzupełnione o pytania kontrolne oraz zadania obliczeniowe zarówno rozwiązane jak i do samodzielnego rozwiązania. Te uzupełnienia ułatwią studentom zrozumienie całości zagadnień zwarciovych i umożliwią lepsze przygotowanie się do egzaminu. Spis literatury obejmuje jedynie podstawowe pozycje książkowe i normy. Skrypt zamykają załączniki pomocne w wykonaniu ćwiczeń laboratoryjnych polegających na wykonaniu obliczeń zwarciovych za pomocą programu komputerowego opracowanego przez autora skryptu.

Szereg istotnych zjawisk pominięto w skrypcie, co starano się sygnalizować w różnych jego miejscach. Pominięte zostały całkowicie m.in. zagadnienia:

- wyznaczania prądów i napięć podczas przerw w jednej lub w dwóch fazach sieci,
- obliczania zwarć podwójnych doziemnych w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- obliczania zakłóceń wielokrotnych tzn. jednoczesnych zwarć i przerw w fazach,
- obliczania charakterystycznych wielkości zwarciovych według norm IEC 909, 865 czy 781.

Czas trwania wykładu, dla którego skrypt jest przeznaczony, nie pozwala na dalsze rozbudowywanie jego treści.

Skrypt jest przeznaczony dla słuchaczy kierunku „Elektrotechnika” studiów magisterskich i inżynierskich, dziennych jak i zaocznych, specjalność „Elektroenergetyka”.

Autor

## 2. WIADOMOŚCI OGÓLNE O ZWARCIACH

### 2.1. Określenia

Określenia dotyczące charakterystycznych parametrów zwarciovych, zasad doboru urządzeń w zależności od warunków zwarciovych jak i podstawowe metody obliczeniowe zawarć są podane w polskich normach:

- a) PN-74/E-05002. Urządzenia elektroenergetyczne. Dobór aparatów wysokonapięciowych w zależności od warunków zwarciovych (Nieaktualna).
  - b) PN-90/E-05025. Obliczanie skutków prądów zwarciovych (Nieaktualna).
  - c) PN-EN 60909-0: 2002 (U) Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego. Część 0. Obliczanie prądów.
  - d) PN-EN 60909-3: 2002 (U) Prądy zwarciove w sieciach trójfazowych prądu przemiennego - Część 3: Prądy podwójnych, jednoczesnych i niezależnych zwarć doziemnych i częściowe prądy zwarciove płynące w ziemi.
  - e) PN-EN 60865-1:2002(U) Obliczanie skutków prądów zwarciovych.
- czy normach międzynarodowych z International Electrotechnical Commission IEC (patrz literatura).

**Zwarcie** jest to zakłócenie polegające na połączeniu punktów sieci elektroenergetycznych o różnych potencjałach, wynikłe z utraty własności izolacyjnych jej elementów.

Zwarcie może być poprzez:

- a) łuk elektryczny lub inny przedmiot o pewnej, małej rezystancji i nazywamy je pośrednim lub niemetalicznym,
- b) impedancję równą zeru i nazywane jest bezpośrednim lub metalicznym.

Przyjmuje się, że pod pojęciem zwarcie rozumiemy zwarcie bezpośrednie, metaliczne. Jeśli jest inaczej to jest to zaznaczone, przy czym obydwa typy tych zwarć będą przedmiotem dalszych rozważań.

Ze względu na liczbę faz i ziemi, które są zwarte rozróżnia się:

- a) zwarcie trójfazowe,
- b) zwarcie trójfazowe doziemne,
- c) zwarcie dwufazowe,
- d) zwarcie dwufazowe doziemne,
- e) zwarcie jednofazowe.

Zgodnie z definicją, wielkości wielofazowe prądu lub napięcia są symetryczne, jeżeli mają jednakowe amplitudy (wartości skuteczne) oraz jednakowe przesunięcia fazowe względem siebie. Z drugiej części definicji wynika, że w układzie trójfazowym wektory mające jednakowe wartości skuteczne oraz przesunięcia fazowe równe  $120^\circ$  lub  $0^\circ$  tworzą układy symetryczne. W związku z powyższą definicją można powiedzieć, że zwarcie trójfazowe i zwarcie trójfazowe doziemne może być zwarcie symetrycznym ze względu na fakt, że przy tych zwarciach układy wektorowe prądów i napięć mogą być symetryczne. Podczas zwarcia trójfazowego lub trójfazowego doziemnego układy wektorowe prądów i napięć będą symetryczne, jeżeli układ przesyłowy jest symetryczny w stanie przed zwarcie. Pozostałe rodzaje zwarć to zawsze zwarcia niesymetryczne. Zwarcie w układzie elektroenergetycznym jest związane z nagłą zmianą parametrów tego układu, polegającą na zmniejszeniu się impedancji obwodu zewnętrznego względem źródeł energii. Nagła zmiana warunków pracy układu elektroenergetycznego powoduje stan przejściowy. W zależności od położenia miejsca zwarcia w stosunku do źródeł energii mamy:

- a) zwarcie na zaciskach generatora lub w jego pobliżu, wywołujące znaczące stany przejściowe w generatorze, zwane zwarciami pobliskimi,



## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

- b) zwarcie odległe od zacisków generatora, wywołujące poważne stany przejściowe w sieci elektroenergetycznej w pobliżu miejsca zwarcia lecz nie powodujące znaczących stanów przejściowych w generatorach.

Charakter stanu przejściowego istotnie zależy od sposobu pracy punktu neutralnego sieci, i tak:

- a) Dowolny typ zwarcia w sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym wywołuje prąd zwarcia o amplitudzie wielokrotnie większej od prądu znamionowego, są to tzw. zwarcia wielkopądowe.
- b) Doziemienie w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym wywołuje prąd zwarcia o amplitudzie mniejszej od prądu znamionowego, są to tzw. zwarcia małopądowe.

Ze względu na liczbę i położenie miejsc zwarcia rozróżnia się:

- a) zwarcie jednomiejscowe – występujące w jednym miejscu sieci,  
b) zwarcie wielomiejscowe – występujące w różnych miejscach sieci,  
c) zwarcie wewnętrzne – występujące w uzwojeniach maszyn lub transformatorów,  
d) zwarcie zewnętrzne – występujące w innych miejscach sieci niż zwarcie wewnętrzne.

W dalszej części zajęto się jedynie zwarciami jednomiejscowymi, zewnętrznymi. Metody obliczania zwarć wielomiejscowych czy wewnętrznych wykraczają poza przyjęty zakres skryptu.

Ze względu na chwilę występowania zwarć rozróżnia się:

- a) zwarcie jednoczesne tj. gdy połączenia między poszczególnymi fazami i ziemią nastąpiło jednocześnie,  
b) zwarcie niejednoczesne.

W rzeczywistości chyba wszystkie zwarcia są niejednoczesnymi poza zwarcie jednofazowym i dwufazowym. Nawet zwarcie spowodowane przez załączanie wyłącznikiem napięcia na sieć z pozostawionym uziemiaczem jest zwarcie niejednoczesnym. W obliczeniach przyjmuje się, że zwarcia są zwarciami jednoczesnymi, a teoria obliczania zwarć niejednoczesnych także wykracza poza przyjęty zakres skryptu..

Ze względu na zjawiska występujące w łączniku przy wyłączaniu prądu zwarcia mamy:

- a) zwarcie na zaciskach łącznika,  
b) zwarcie pobliskie tj. zwarcie w linii elektroenergetycznej występujące w takim przedziale odległości od wyłącznika wyłączającego prąd zwarcia, że przebieg napięcia powrotnego wpływa szczególnie na zdolność wyłączenia wyłącznika,  
c) zwarcie rozwijające się – powstające podczas wyłączania obwodu.

Ostatni podział jest przedmiotem książek zajmujących się teorią łączenia obwodów elektrycznych.

### 2.2. Częstość występowania zwarć

Opierając się na statystykach wielu państw względne częstości występowania różnych rodzajów zwarć są następujące:

- a) zwarcie jednofazowe - średnio 65% (od 30% do 97%),  
b) podwójne zwarcie z ziemią i zwarcie dwufazowe z ziemią - średnio 20% (od 0% do 55%),  
c) zwarcie dwufazowe – średnio 10% (od 0% do 55%),  
d) zwarcie trójfazowe – średnio 5% (od 0% do 35%).

Częstość występowania zwarć jednofazowych zależy od:

- a) napięcia znamionowego sieci,  
b) udziału długości linii napowietrznych w całkowitej długości linii,

W sieciach napowietrznych występuje większa liczba zwarć jednofazowych w stosunku do sieci kablowych. Wynika to przede wszystkim z szybkiego przeradzania się zwarć jednofazowych w zwarcia głównie trójfazowe w sieciach kablowych. Przy wyższych napięciach znamionowych zmniejsza się liczba zwarć spowodowanych takimi przyczynami jak: omyłki łączeniowe, uszkodzenia mechaniczne, przeciążenia czy niewłaściwa eksploatacja. Przyczyny te w większości powodują zwarcia trójfazowe. Reasumując można stwierdzić, że czym wyższe napięcie znamionowe sieci i czym większy udział linii napowietrznych tym większy udział zwarć jednofazowych sięgający w sieciach 400 kV do 97% wszystkich zwarć.

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

Tabl. 2.1. Ilości zwarć na 100km linii i na rok

Rodzaj linii	Sieć WN	Sieć SN	Sieć nN
Linie napowietrzne	0.8	6.0	20.0
Linie kablowe	-	22.0	30.0

Oprócz względnych częstości występowania różnych rodzajów zwarć ważna jest ilość zwarć na 100km linii w ciągu roku. Dane takie zamieszczone w tabl. 1.1.

### 2.3. Przyczyny występowania zwarć

Do głównych przyczyn pojawiania się zwarć w sieciach elektroenergetycznych zaliczamy:

- a) przepięcia atmosferyczne,
  - b) przepięcia łączeniowe,
  - c) omyłki łączeniowe,
  - d) długotrwałe przeciążenia ruchowe: maszyn, kabli, przewodów,
  - e) starzenie się izolacji,
  - f) uszkodzenia mechaniczne,
  - g) zawilgocenie izolacji,
  - h) zanieczyszczenie izolacji,
  - i) zbliżenie się przewodów linii napowietrznych podczas wiatru, sadzi lub samoczynnych kołysań przewodów,
  - j) wady fabryczne urządzeń elektroenergetycznych,
  - k) niewłaściwa eksploatacja lub naprawa,
  - l) zwierzęta,
  - m) zarzutki na przewody linii napowietrznych i stłuczenia izolatorów,
- Powyższe przyczyny nie zostaną tutaj dokładnie omówione.

### 2.4. Skutki zwarć

Podczas zwarcia płyną zazwyczaj prądy wielokrotnie przekraczające prądy znamionowe urządzeń. Prądy te wywołują wielkie siły działające na przewodniki przewodzące prąd zwarciový, mogące spowodować mechaniczne zniszczenie urządzeń elektroenergetycznych. Działające na przewodniki siły mechaniczne są wprost proporcjonalne do kwadratu wartości chwilowej prądu zwarciovýego. Takie działanie nazywa się **dynamicznym** lub **elektrodynamicznym działaniem prądu zwarciovýego**.

Podczas przepływu prądów zwarciovýych w przewodnikach wydzielają się duże ilości ciepła powodujące, że przewodniki osiągają temperatury znacznie wyższe niż dopuszczalne w stanie normalnym. Należy tutaj pamiętać, że ilość wydzielonego ciepła jest wprost proporcjonalna do całki z kwadratu wartości chwilowej prądu zwarciovýego i czasu trwania zwarcia. To wydzielanie się ciepła podczas zwarcia może również prowadzić do zniszczenia urządzeń. Tego rodzaju działanie prądu zwarciovýego nazywa się **cieplnym (termicznym) działaniem prądu zwarciovýego**. Skutek cieplny prądu zwarciovýego musimy ograniczać poprzez skracanie czasu trwania zwarcia. Do wykrycia pojawienia się zwarcia, identyfikacji obiektu, w którym występuje zwarcie oraz wyłączenia tego obiektu służy elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa.

Dalszym skutkiem zwarcia może być zniszczenie (eksplozja) wyłącznika przy wyłączaniu lub załączaniu w czasie zwarcia, a więc prądy zwarciovýe decydują o koniecznej **zdolności łączeniowej stosowanych wyłączników**.

W przypadku uszkodzenia izolacji urządzenia, część tego urządzenia nie będąca pod napięciem może znaleźć się pod napięciem względem ziemi – nazywa się je napięciem dotykowym.

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

Dla ochrony przed napięciem dotykowym instaluje się urządzenia **ochrony przeciwporażeniowej**. W przypadku zwarcia z ziemią upływ prądu do ziemi może być powodem znacznych różnic potencjałów między punktami na powierzchni ziemi zwane napięciem krokowym. Ograniczenie oddziaływania napięcia krokowego uzyskuje się przez instalowanie uziomów w miejscu prawdopodobnego przepływu prądu do ziemi.

Zwarcie doziemne (jednofazowe) w sieci z nieskutecznie uziemionym punktem neutralnym powstałe przez łuk może być powodem wysokich przepięć ziemnozwarciowych. W sieci ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym zwarcia niesymetryczne mogą być powodem groźnych przepięć ustalonych.

Często zwarciom towarzyszy **łuk elektryczny** palący się w miejscu zwarcia. Łuk zwarciowy w urządzeniach elektroenergetycznych (liniach i stacjach elektroenergetycznych) jest zjawiskiem wysoce niepożądanym. Nie jest możliwa całkowita eliminacja powstawania łuku podczas zwarć. Paleniu się łuku towarzyszy bardzo wysoka temperatura dochodząca do kilku a nawet kilkunastu tysięcy stopni Kelvina a ponadto:

- a) topienie się przewodów na których pali się łuk, parowanie i rozbryzgi stopionego metalu z tych przewodów,
- b) zapłon materiałów izolacyjnych szczególnie takich jak olej czy izolacja papierowo-olejowa,
- c) zapłonowi materiałów izolacyjnych może towarzyszyć wydzielanie się trujących gazów, dotyczy przede wszystkim pomieszczeń kablowych z kablami w izolacji polwinitowej,
- d) paleniu się materiałów izolacyjnych towarzyszy wydzielanie się dużych ilości czarnego, nieprzejrzystego, być może toksycznego dymu,
- e) paleniu się oleju towarzyszy jego rozbryzgiwanie oraz wydzielanie się wodoru w wyniku rozkładu oleju,
- f) promieniowanie cieplne łuku,
- g) promieniowanie ultrafioletowe łuku,
- h) przemieszczanie się łuku wzdłuż szyn zbiorczych i do góry,
- i) efekty dźwiękowe,
- j) powietrze nagrzane przez łuk, które powoduje nagły wzrost ciśnienia w przestrzeni gdzie pali się łuk co sprawia, że następuje wydmuch tego powietrza,
- k) palący się łuk zużywa tlen, wobec czego człowiekowi znajdującemu się w małych, nie mających wentylacji pomieszczeniach grozi uduszenie.

Jak widać z powyższego zestawienia, palący się łuk elektryczny stanowi duże zagrożenie:

- a) dla osób obsługujących urządzenia elektroenergetyczne,
- b) pożarowe,
- c) dla urządzeń elektroenergetycznych powodując ich niszczenie.

Skutki, jakie ostatecznie powoduje palący się łuk elektryczny zależą od wielu czynników a przede wszystkim od urządzenia elektroenergetycznego, w którym łuk się pali oraz wartości prądu zwarciowego. Poniżej omówiono wybrane aspekty zjawisk towarzyszących paleniu się łuku zwarciowego.

Zapalenie się łuku elektrycznego na odkrytych szynach zbiorczych stacji elektroenergetycznej powoduje, że pod wpływem sił elektrodynamicznych łuk przemieszcza się wzdłuż tych szyn w kierunku powodującym zwiększeniem impedancji pętli zwarcia, w kierunku przeciwnym do kierunku zasilania szyn, dochodząc do końca tych szyn. Szybkość przemieszczania się łuku zależy od wartości prądu zwarciowego i przykładowo w przybliżeniu wynosi:

- a) przy prądzie 5 kA ok. 30 m/s,
- b) przy prądzie 35 kA ok. 300 m/s.

Tak duża prędkość daje duży efekt dźwiękowy. Łuk palący się na końcu szyn zbiorczych wydłuża się w poziomie szyn zbiorczych około trzykrotnie, stwarzając niebezpieczeństwo poza szynami zbiorczymi. Palący się łuk elektryczny wygina się również do góry. Przyczyną tego jest konwekcja cieplna otaczającego powietrza. Z doświadczeń wiadomo, że tym sposobem łuk powiększa swoją długość od 2 do 5 razy odstepu między elektrodami, pomiędzy którymi pali się. W miarę wędrowania łuku ku górze wzrasta opór i napięcie łuku. Przy odpowiednio dużej wartości napięcia

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

łuku dochodzi do zapłonu między elektrodami a zatem następuje skrócenie łuku. Łuk ponownie zaczyna wędrować ku górze powtarzając ten proces wielokrotnie. Pomiędzy prądem łuku a jego opornością na jednostkę długości istnieją zależności otrzymane empirycznie. Poniżej zostaną podane dwie z nich:

$$R_{\tau} = \frac{1800}{I_{\tau}} \quad (2.1)$$

lub

$$R_{\tau} = \frac{370}{I_{\tau}^{0.87}} \quad (2.2)$$

gdzie:

- $R_{\tau}$  - rezystancja łuku w  $\Omega/m$ ,
- $I_{\tau}$  - prąd łuku w A.

Na podstawie tych wzorów można oszacować moc wydzielaną przez palący się łuk zwarciowy. Przyjmując prąd łuku równy 10 000 A, z wzoru (1.1) wynika, że rezystancja jednostkowa łuku wynosi  $R_{\tau} = 0.18 \Omega/m$ . Przy odległości elektrod wynoszącej np. 20 cm zakładamy długość łuku na ok. 0.5 m. Dla tych danych rezystancja łuku wynosi  $R_{\tau} = 0.09 \Omega$ , napięcie łuku  $U_{\tau} = R_{\tau} I_{\tau} = 900 \text{ V}$  a moc łuku  $P_{\tau} = 9.0 \text{ MW}$ . Tak duże ilości ciepła wydzielane przez łuk są niebezpieczne również na drodze promieniowania. Wyniki badań natężenia promieniowania w odległości 1.5 m podano w tabl. 2.2. Charakterystyczny jest tu wpływ rodzaju materiału szyny zbiorczej co wynika z wpływu par metalu elektrody na plazmę łuku. Dla porównania intensywność promieniowania słonecznego na powierzchni ziemi wynosi ok.  $0.1-0.2 \text{ W/cm}^2$ . Promieniowanie o intensywności  $25 \text{ W/cm}^2$  powoduje w ciągu 1 s zwęglenie się skóry człowieka.

Tabl. 2.2 Gęstość promieniowania cieplnego łuku w odległości 1.5 m w  $\text{W/cm}^2$

Rodzaj elektrody	Moc łuku w MW				
	1	3	5	10	15
Elektroda miedziana	0.5	2	3	4	4
Elektroda aluminiowa	1	3	5	8	11

Środkiem zaradczym jest stosowanie rozdzielni osłoniętych. Jednak i w tego typu rozdzielniach występują razem z łukiem bardzo niekorzystne zjawiska polegające na termicznym i dynamicznym działaniu powietrza rozgrzanego łukiem zwarciowym. Po powstaniu łuku następuje sprężenie powietrza wewnątrz rozdzielni osłoniętej na skutek jego podgrzania. Powstałe ciśnienie powoduje wyrzucenie tego powietrza na zewnątrz. Powietrze to ma temperaturę  $1000-1500^{\circ} \text{ C}$ , zajmuje 3-4 razy większą objętość niż wynosi objętość pola rozdzielni a szybkość wyrzucanego powietrza może dochodzić do 100 m/s. W celu zmniejszenia zagrożenia wywołanego wyrzucanym powietrzem stosuje się specjalne klapy bezpieczeństwa, które umożliwiają ujście rozgrzanego powietrza oraz nadają strumieniowi tego powietrza określony, bardziej bezpieczny kierunek.

Zjawisku zwarcia towarzyszy ponoszenie pewnych kosztów zwanych „skutkami gospodarczymi” co wynika z poniższych powodów:

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- zwarcie jest wywołane przez zniszczenie izolacji urządzenia elektroenergetycznego co powoduje konieczność jej naprawy,
- na skutek zwarcia mamy zazwyczaj przerwę w dostawie energii elektrycznej dla odbiorców,
- występowanie zwarcia jest zawsze związane ze zwiększonym zagrożeniem pożarowym,
- oddziaływanie prądów zwarciovych na urządzenia elektroenergetyczne powoduje, że musimy instalować urządzenia wytrzymujące te oddziaływania co zwykle prowadzi do konieczności instalowania urządzeń droższych,
- z powodu zwarć musimy instalować w sieci elektroenergetycznej dodatkowe urządzenia do: elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej, ochrony przeciwporażeniowej, ochrony przeciwpożarowej czy ochrony przeciwłukowej.

### 2.5. Przebieg prądu zwarciovego

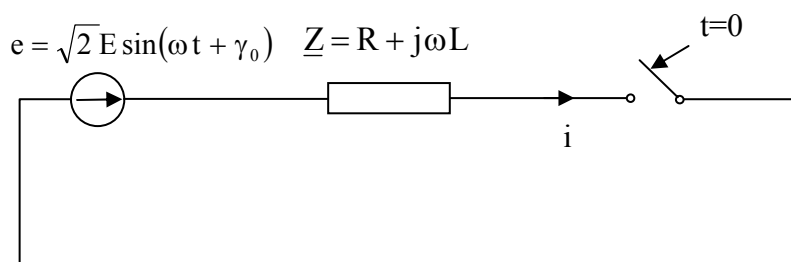
#### 2.5.1. Wprowadzenie

Zwarcie wielkoprądowe w układzie elektroenergetycznym jest związane z nagłą zmianą parametrów tego układu polegającą na zmniejszeniu się impedancji obwodu zewnętrznego względem źródeł energii. Nagła zmiana warunków pracy układu elektroenergetycznego powoduje stan przejściowy, który przechodzi po pewnym czasie w stan ustalony zwarciovowy. W zależności od położenia miejsca zwarcia w stosunku do źródeł energii (generatorów synchronicznych) wyróżniono dwa przypadki:

- zwarcie na zaciskach generatora lub w jego pobliżu, wywołujące znaczące stany przejściowe w generatorze, zwane zwarciami pobliskimi,
- zwarcie odległe od zacisków generatora, wywołujące poważne stany przejściowe w sieci elektroenergetycznej w pobliżu miejsca zwarcia lecz nie powodujące znaczących stanów przejściowych w generatorach.

#### 2.5.2. Zwarcia odległe

Zwarcia odległe nie wywołują stanów przejściowych w generatorach i dlatego można maszyny synchroniczne zastąpić dwójnikiem aktywnym o stałej sile elektromotorycznej (SEM). Impedancja tego dwójnika jest równa impedancji widzianej z miejsca zwarcia. Zwarcie w sieci elektroenergetycznej jest modelowane w tym dwójniku poprzez jego zwarcie w momencie odpowiadającym momentowi zwarcia – rys. 2.1.



Rys. 2.1 Schemat dwójnika aktywnego modelującego zwarcie, gdzie:

- $Z$  - impedancja widziana z miejsca zwarcia;
- $E$  - wartość skuteczna SEM;
- $\gamma_0$  - kąt początkowy SEM w chwili zwarcia.

Powstający w powyższym obwodzie stan nieustalony można opisać równaniem różniczkowym:

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

$$R i + L \frac{di}{dt} = \sqrt{2} E \sin(\omega t + \gamma_0) \quad (2.3)$$

Warunek początkowy dla powyższego równania wynika z zasady ciągłości prądu w cewce. W tym przypadku założono, że przed zwarciem układ był w stanie nieobciążonym tzn.

$$i(t = 0^-) = 0 \quad (2.4)$$

Rozwiązanie tego równania różniczkowego zawiera dwie składowe:

a) składową okresową (składową ustaloną) wyrażoną wzorem

$$i_{ok} = \sqrt{2} I_{ok} \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_z) \quad (2.5)$$

gdzie:

$$I_{ok} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + X^2}} \quad (2.6)$$

$$\varphi_z = \arctan\left(\frac{X}{R}\right) \quad (2.7)$$

- $I_{ok}$  - wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego,
- $\varphi_z$  - kąt impedancji zwarcioviej.

Ze wzoru na prąd  $i_{ok}$  wynika, że wartość skuteczna tego prądu zależy od wartości SEM i impedancji obwodu zwarciovego, a prąd ten jest opóźniony w stosunku do SEM o kąt impedancji zwarcioviej,

b) składową nieokresową (składową przejściową) pojawiającą się w obwodzie w celu zapewnienia warunku ciągłości prądu w cewce, tzn.

$$i(t = 0^-) = 0 = i_{ok}(t = 0) + i_{nok}(t = 0) \quad (2.8)$$

$$i_{nok}(t = 0) = -i_{ok}(t = 0) = -\sqrt{2} I_{ok} \sin(\gamma_0 - \varphi_z) \quad (2.9)$$

Składowa nieokresowa zanika wykładniczo do zera ze stałą czasową

$$T_a = \frac{L}{R} = \frac{X}{\omega R} \quad (2.10)$$

Reasumując, składowa nieokresowa wyraża się wzorem:

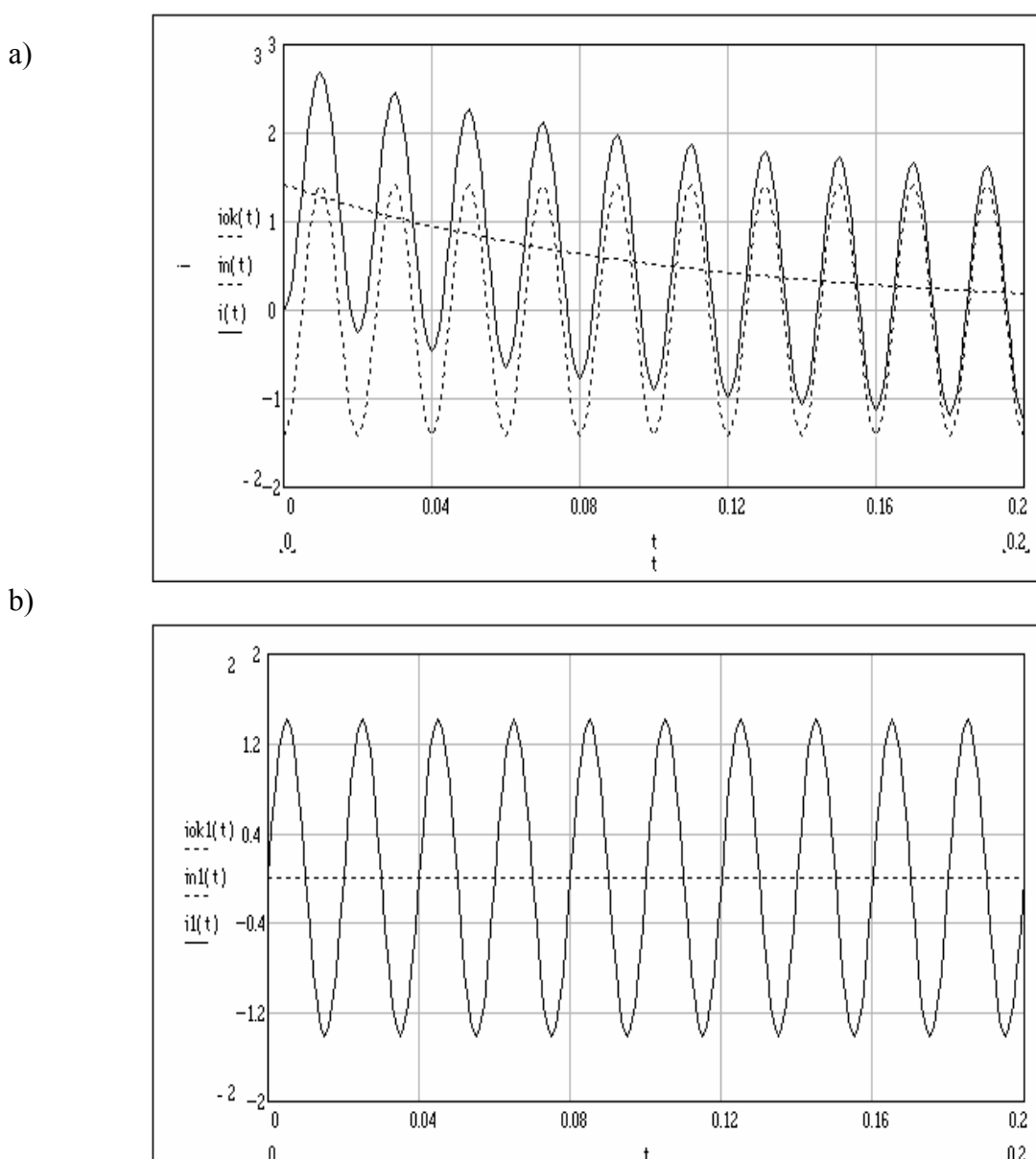
$$i_{nok} = -\sqrt{2} I_{ok} \sin(\gamma_0 - \varphi_z) e^{-t/T_a} \quad (2.11)$$

Całkowity prąd zwarciovowy, będący sumą tych dwóch składowych, można zapisać w postaci:

$$i = \sqrt{2} I_{ok} \left[ \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_z) - \sin(\gamma_0 - \varphi_z) e^{-t/T_a} \right] \quad (2.12)$$

Na rys. 2.2 wykreślono przebiegi prądu zwarciovego i jego składowych dla dwóch różnych chwil początkowych zwarcia w obwodzie czysto indukcyjnym. Z analizy wzoru na przebieg prądu zwarciovego wynika, że składowa nieokresowa jest różna od zera wtedy, gdy nie jest zachowana ciągłość prądu pomiędzy prądem przed zwarcieciem a składową okresową prądu zwarciovego wyznaczoną dla chwili zerowej. Przebiegi prądu zwarciovego w obwodzie trójfazowym (rys. 2.3) narysowano biorąc pod uwagę:

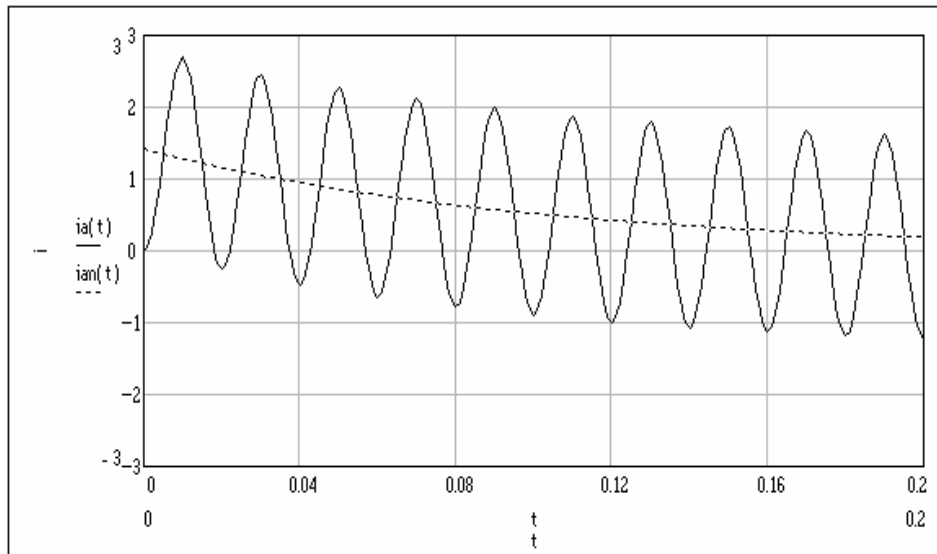
- dla fazy R kąt początkowy  $\gamma_0$ ,
- dla fazy S kąt początkowy  $\gamma_0 + 240^\circ$
- dla fazy T kąt początkowy  $\gamma_0 + 120^\circ$



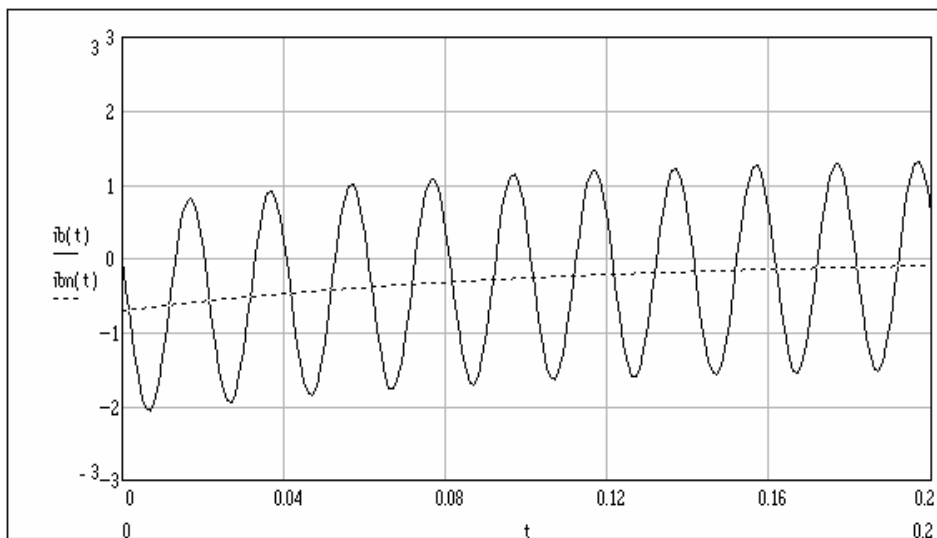
Rys. 2.2 Przebieg prądu zwarciovego dla:

- $\gamma_0 = 0^\circ$ ;  $\varphi_z = 90^\circ$  - zwarcie przy przejściu SEM przez zero,
- $\gamma_0 = 90^\circ$ ;  $\varphi_z = 90^\circ$  - zwarcie przy przejściu SEM przez maksimum.

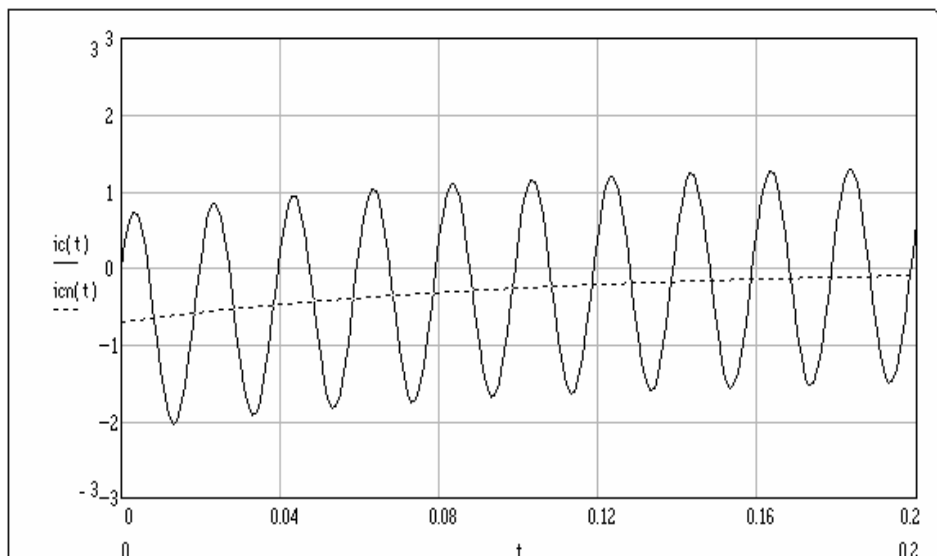
a)



b)

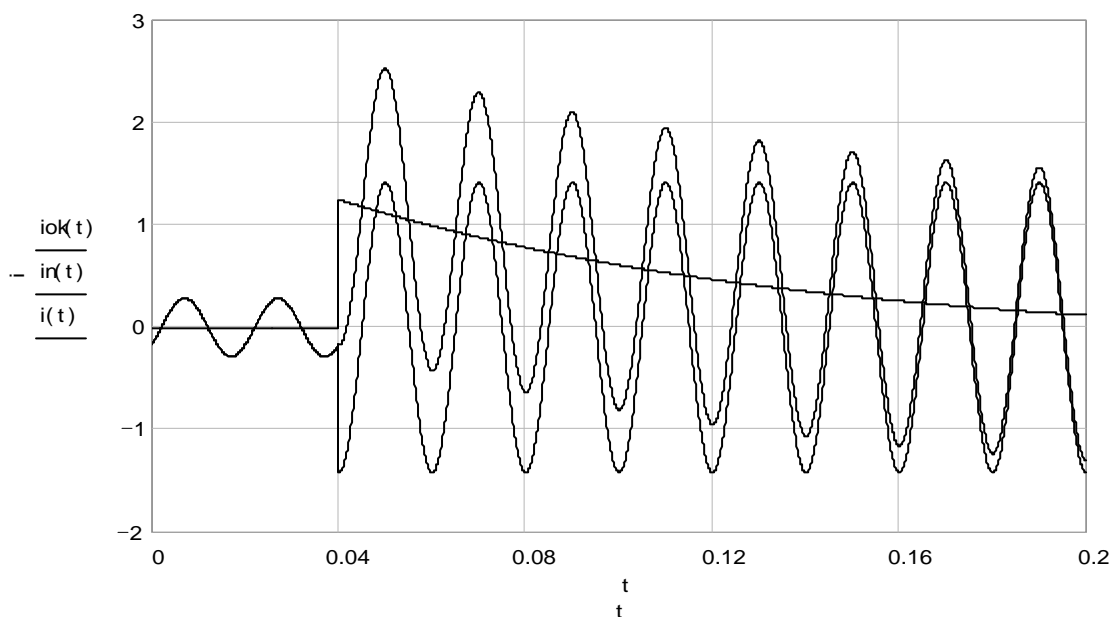


c)



Rys. 2.3 Przebieg prądu zwarciovego w trzech fazach dla  $\gamma_0 = 0^\circ$ ;  $\varphi_z = 90^\circ$  - zwarcie przy przejściu SEM przez zero w fazie R: a) faza R; b) faza S; c) faza T.





Rys. 2.4 Przebieg prądu obciążeniowego przed zwarcie występującym w chwili  $t=0.04$  s oraz prądu zwarciego dla:  $\gamma_0 = 0^\circ$  (zwarcie przy przejściu SEM przez zero);  $\varphi_z = 90^\circ$ ;  $\varphi_{ob} = 18^\circ$ ; amplituda prądu zwarciego pięć razy większa od prądu obciążeniowego.

W sytuacji gdyby należało uwzględnić prąd obciążenia układu płynący przed zwarcie, to:

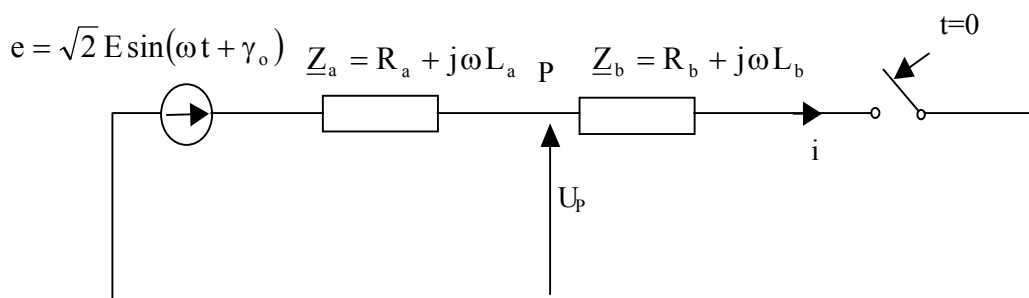
- składowa okresowa nie ulega zmianie,
- składowa nieokresowa wynikałaby z zasady ciągłości prądu, a więc gdyby prąd obciążenia opisać równaniem:

$$i_{ob}(t < 0) = \sqrt{2} I_{ob} \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_{ob}) \quad (2.13)$$

$$i_{nok}(t = 0) = \sqrt{2} I_{ob} \sin(\gamma_0 - \varphi_{ob}) - \sqrt{2} I_{ok} \sin(\gamma_0 - \varphi_z) \quad (2.14)$$

- Pozostałe równania pozostają bez zmian a przebieg taki został umieszczony na rys. 2.4.

W czasie zwarcia oprócz umiejętności obliczania prądu zwarciego, należy obliczyć także napięcie w dowolnym miejscu poza miejscem zwarcia. W tym celu przyjmujemy układ do obliczeń pokazany rys. 2.5.



Rys. 2.5 Schemat dwójnika aktywnego modelującego zwarcie dla obliczenia napięcia poza miejscem zwarcia.

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Napięcie  $u_p$  wyraża się wzorem:

$$u_p = \sqrt{2} U_p \left[ \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_z + \varphi_b) - K \sin(\gamma_0 - \varphi_z) e^{-t/T_a} \right] \quad (2.15)$$

gdzie:

$$U_p = E \frac{\sqrt{R_b^2 + X_b^2}}{\sqrt{(R_a + R_b)^2 + (X_a + X_b)^2}} \quad (2.16)$$

$$\varphi_z = \arctan \frac{X_a + X_b}{R_a + R_b} \quad (2.17)$$

$$\varphi_b = \arctan \frac{X_b}{R_b} \quad (2.18)$$

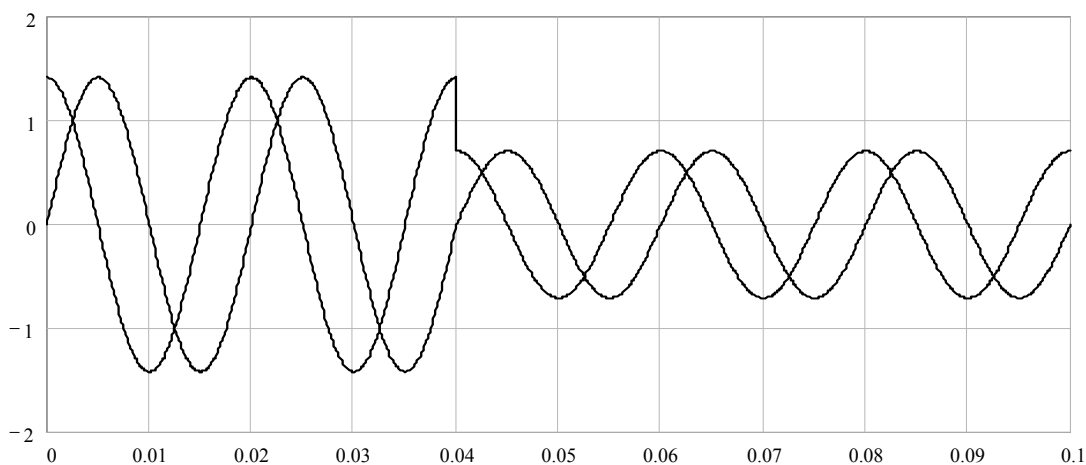
$$T_a = \frac{L_a + L_b}{R_a + R_b} \quad (2.19)$$

$$K = \left( \frac{R_b}{L_b} - \frac{R_a + R_b}{L_a + L_b} \right) \frac{L_b}{\sqrt{R_b^2 + X_b^2}} \quad (2.20)$$

Analizując powyższy wzór a w szczególności wzór na współczynnik  $K$  można zauważyć, że:

- gdzie  $\frac{R_a}{L_a} = \frac{R_b}{L_b}$  tzn. obie impedancje mają ten sam kąt impedancji, współczynnik  $K=0$  a napięcie  $u_p$  nie zawiera składowej nieokresowej,
- gdzie  $\frac{R_a}{L_a} \neq \frac{R_b}{L_b}$  to współczynnik  $K \neq 0$  lecz posiada małą wartość.

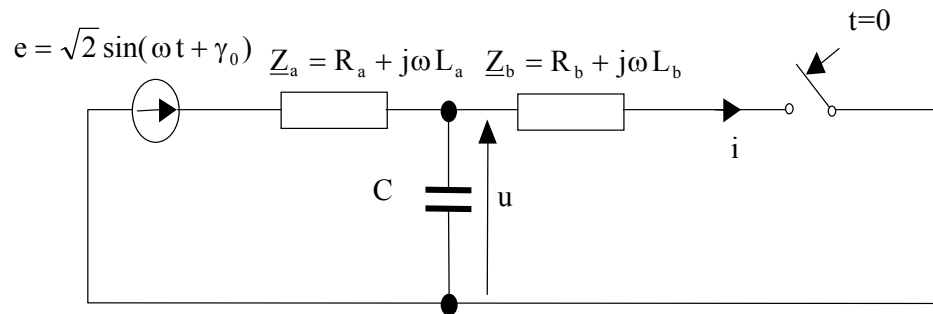
W związku z powyższym w obliczeniach praktycznych napięcia podczas zwarcia zazwyczaj pomija się składową nieokresową, co pokazano na rys. 2.6.



Rys. 2.6 Przebieg napięcia przed i po zwarcium występującym dla  $t=0.04$  s. Przebiegi dla kąta początkowego  $0^\circ$  oraz  $90^\circ$ .

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

W przebiegu napięcia na rys. 2.6 w momencie zwarcia dla kąta początkowego innego niż zero stopni występuje skok napięcia wynikły z pominięcia pojemności sieci. Uwzględnimy teraz wpływ pojemności na przebiegi prądu i napięcia podczas zwarcia. W tym celu założymy, że rozpatrywany układ elektroenergetyczny sprowadzimy do schematu zastępczego uwzględniającego pojemności tego układu tak jak pokazano to na rys. 2.7. Prąd zwarcia, oprócz składowej okresowej i nieokresowej obliczanych jak w obwodzie bez pojemności, będzie zawierał składową okresową o częstotliwości drgań wynikających z indukcyjności i pojemności obwodu a przebieg ten wyraża się równaniem:



Rys. 2.7 Schemat dwójnika aktywnego modelującego zwarcie z uwzględnieniem pojemności.

$$i = \sqrt{2} I_{ok} \left[ \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_z) - \sin(\gamma_0 - \varphi_z) e^{-t/T_a} - \frac{\omega}{\omega_p} \sin(\omega_p t) e^{-t/T_p} \right] \quad (2.21)$$

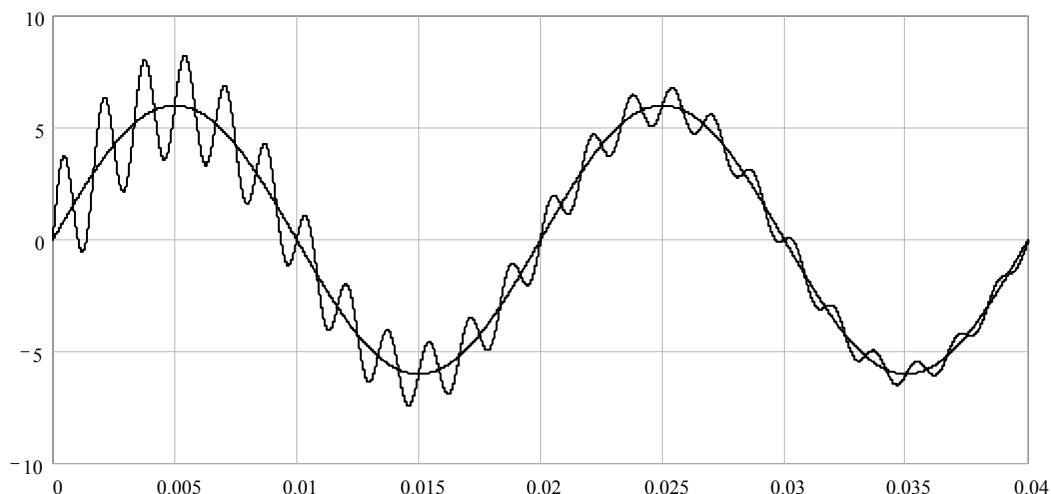
gdzie:

$$\omega_p = 2\pi f_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (2.22)$$

$$L \cong \frac{L_a L_b}{L_a + L_b} \quad (2.23)$$

$$T_p = \frac{2 L_b}{R_b} \quad (2.24)$$

Dla typowych wartości pojemności sieci WN częstotliwość  $f_p$  wypada od kilkuset Hz do kilku kHz a wartość skuteczna tej składowej jest mniejsza niż 20 %  $I_{OK}$ . (rys. 2.8).



Rys. 2.8 Przebieg prądu zwarcia w układzie uwzględniającym pojemności sieci. Przebieg dla kąta początkowego  $90^\circ$ .

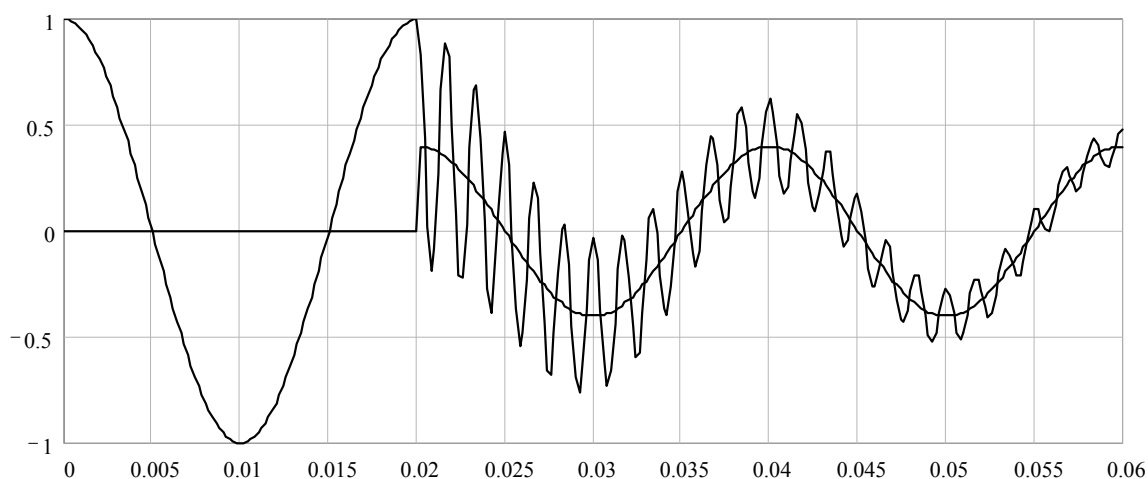
W przypadku obliczania napięcia w układzie z pojemnością wzór na napięcie jest postaci:

$$u_p = \sqrt{2} U_p \left[ \sin(\omega t + \gamma_0 - \varphi_z + \varphi_b) + \frac{L_a}{L_b} \sin(\gamma_0 - \varphi_z) \sin(\omega_p t) e^{-t/T_p} \right] \quad (2.25)$$

$$T_p = \frac{2 L_b}{R_b} \quad (2.26)$$

W napięciu mamy dwie składowe (rys. 2.9):

- a) składowa napięcia o częstotliwości źródła ze zmniejszoną amplitudą,
- b) zanikająca wykładniczo składowa oscylacyjna (swobodna) mająca częstotliwość  $f_p$ .



Rys. 2.9 Przebieg napięcia przed i po zwarcium występującym dla  $t=0.02$  s w układzie uwzględniającym pojemności sieci. Przebieg dla kąta początkowego  $90^\circ$ .

### 2.5.3. Zwarcia pobliskie

Analizę zjawisk przejściowych występujących w generatorze synchronicznym podczas zwarcia pobliskiego lub na zaciskach generatora wykonamy przyjmując następujące warunki:

- generator posiada trzy uzwojenia stojana, uzwojenie wzbudzenia w osi d (podłużnej) wirnika oraz uzwojenie tłumiące w osi d i q wirnika,
- generator był przed zwarcieciem nieobciążony,
- podczas zwarcia nie działa układ regulacji wzbudzenia generatora, a więc prąd wzbudzenia jest stały, niezmienny.

Reaktancja dowolnego uzwojenia w maszynie jest odwrotnie proporcjonalna do reluktancji drogi strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem. Każdemu odcinkowi drogi strumienia przyporządkowana jest reluktancja tej drogi. Należy pamiętać, że reluktancja drogi w żelazie jest pomijalnie mała w stosunku do reluktancji drogi w powietrzu – szczeliny maszyny. Reaktancja uzwojenia jest w przybliżeniu proporcjonalna do długości drogi poza żelazem. Dodatkowo należy pamiętać, że:

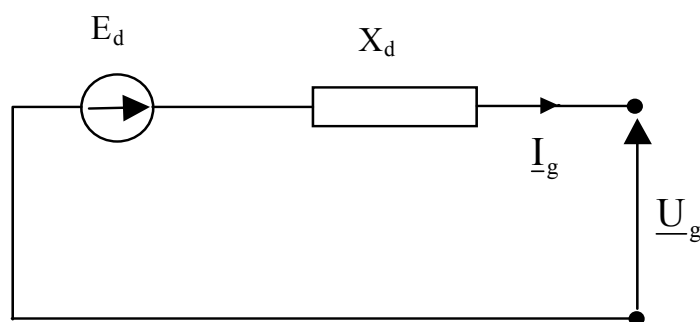
- szeregowym odcinkom drogi magnetycznej odpowiada równoległe połączenia reaktancji tych dróg,
- równoległym odcinkom drogi magnetycznej odpowiada szeregowe łączenie reaktancji.

W stanie ustalonym przed zwarcieciem reaktancja generatora nazywana reaktancją generatora synchronicznego  $X_d$  jest szeregowym połączeniem:

- reaktancji rozproszenia uzwojeń stojana generatora  $X_r$ ,
- reaktancji wynikającej z drogi magnetycznej przez szczelinę nazywaną reaktancją oddziaływania twornika  $X_{ad}$ .

$$X_d = X_r + X_{ad} \quad (2.27)$$

W stanie ustalonym generator synchroniczny można zamodelować za pomocą dwójnika aktywnego, w którym za reaktancją  $X_d$  występuje siła elektromotoryczna podłużna  $E_d$  – rys. 2.10.



Rys. 2.10 Schemat generatora w stanie ustalonym.

W czasie biegu jałowego generatora SEM  $E_d$  jest równa napięciu generatora zaś w czasie obciążenia jest równa sumie napięcia na zaciskach generatora i stracie napięcia na reaktancji  $X_d$ :

$$\underline{E}_d = \underline{U}_g + j X_d \underline{I}_g \quad (2.28)$$

Wartości reaktancji  $X_d$  wahają się w granicach:

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- dla turbogeneratorów (150 – 250)% reaktancji (impedancji) wynikającej z podzielenia napięcia znamionowego przez prąd znamionowy generatora, przy czym większe wartości występują dla większych generatorów,
- dla hydrogeneratorów (70 – 160)%.

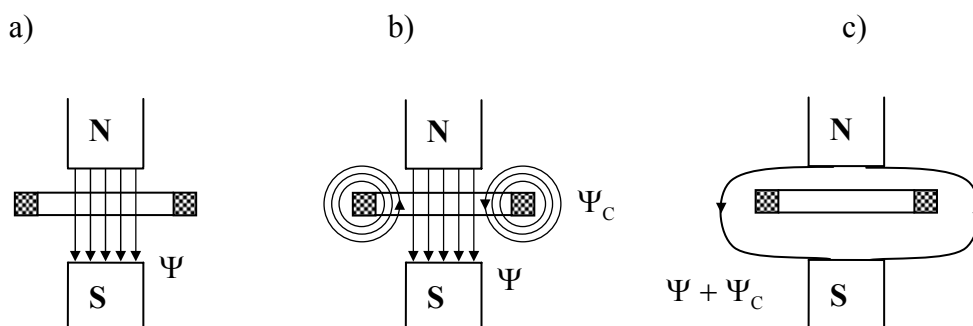
Ze wzoru na SEM  $E_d$  wynika, że siła ta może się zmieniać od  $U_{NG}$  do ok.  $2,8 U_{NG}$ .

Po tych wstępnych rozważaniach rozpatrzono zwarcie na zaciskach nieobciążonego generatora. Pod wpływem SEM  $E_d$  i reaktancji  $X_d$  pojawi się po zwarciu prąd zwarcia nazywany składową ustaloną prądu zwarcia generatora  $I_{ud}$ :

$$I_{ud} = \frac{E_d}{X_d} \quad (2.29)$$

Prąd zwarcia ustalony będzie więc co do wartości bliski prądowi znamionowemu generatora lub nieco większy.

Pojawienie prądu  $I_{ud}$  powoduje powstanie strumienia reakcji twornika, który skokowo zmienia się w szczelinie. Powoduje on skokową zmianę strumienia skojarzonego z uzwojeniem wzbudzenia. Ponieważ zasada ciągłości strumienia w cewce mówi nam, że taki stan jest niemożliwy, to w uzwojeniu wzbudzającym musi pojawić się dodatkowy zanikający aperiodycznie prąd o wartości zapewniającej zachowanie zasady ciągłości strumienia skojarzonego z cewką. Pojawienie się tego dodatkowego prądu wpływa na reaktancję generatora. W celu rozpatrzenia tego wpływu przeanalizowano zachowanie się w strumieniu w prostym układzie składającym się z dwóch magnesów trwałych wytwarzających strumień  $\Psi$  i leżącej pomiędzy magnesami cewki, w której w stanie początkowym nie płynie prąd.

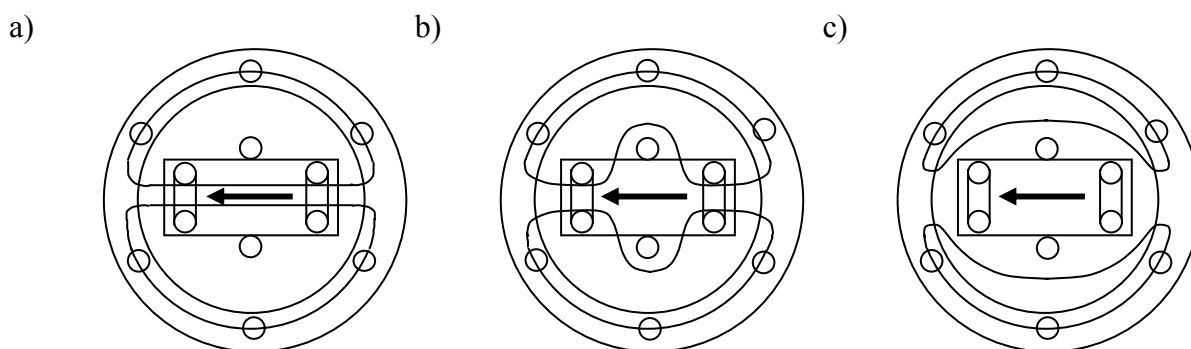


Rys. 2.11 Ilustracja efektu wypychania strumienia.

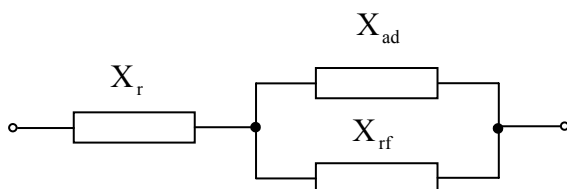
Rys. 2.11a można to uznać za analog do sytuacji przed zwarcie, gdzie strumień  $\Psi$  jest analogiem strumienia w szczelinie. Jeżeli przez cewkę popłynie prąd, to prąd ten wytwarza strumień  $\Psi_C$ . Założono, że kierunek tego prądu będzie taki, że strumień  $\Psi_C$  będzie skierowany w kierunku przeciwnym do strumienia  $\Psi$ . Przy założeniu, że strumienie te są jednakowe to wewnątrz cewki oba strumienie się znoszą, a wypadkowy obraz strumienia jest jak na rys. 2.11.c. Cewka z prądem ma ekranujące działanie dla strumienia magnesów - wypycha strumień magnesów na zewnątrz. W generatorze synchronicznym przed zwarcie będzie przepływ strumienia jak na rys. 2.12a, przy czym w pierwszym etapie uwzględniamy tylko uzwojenie wzbudzenia. Po zwarcie, czyli pojawieniu się w uzwojeniu stojana prądu  $I_U$ , w uzwojeniu wzbudzenia pojawi się dodatkowy prąd aperiodyczny wytwarzający strumień kompensujący skokowy wzrost strumienia reakcji twornika jak pokazano na rys. 2.12.b. Uzwojenie wzbudzenia wypycha strumień stojana poza wirnik. Przechodząc do reaktancji maszyny w tym stanie musimy pamiętać, że drogi strumienia

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

w powietrzu są szeregowe, a reaktancja obejścia przez strumień uzwojenia wzbudzenia jest równa reaktancji rozproszenia uzwojenia wzbudzenia  $X_{rf}$ . Schemat zastępczy maszyny jest na rys. 2.13.



Rys. 2.12 Drogi strumienia w stanie normalnym (przypadek a), podczas zwarcia uwzględniając tylko uzwojenie wzbudzenia (przypadek b) oraz uwzględniając także uzwojenia tłumiące (przypadek c).

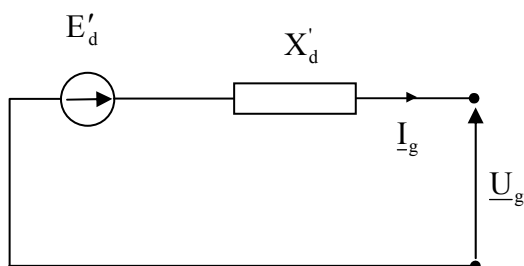


Rys. 2.13 Reaktancja przejściowa generatora.

Reaktancja generatora w tym stanie nazywamy reaktancją przejściową podłużną  $X'_d$  i wynosi ona:

$$X'_d = X_r + \frac{X_{rf} X_{ad}}{X_{rf} + X_{ad}} \quad (2.30)$$

Wartość tej reaktancji wynosi od 15 do 30%. Dla tego stanu możemy narysować schemat zastępczy generatora – rys. 2.14.



Rys. 2.14 Schemat generatora w stanie przejściowym, gdzie:

- $E'_d$  - SEM przejściowe podłużne generatora.

$$\underline{E}'_d = \underline{U}_g + j X'_d I_g \quad (2.31)$$

Dodatkowy prąd (strumień), jaki pojawił się w uzwojeniu wzbudzenia jest aperiodyczny i zanika ze stałą czasową  $T'_d$ . W katalogu generatora mamy podawaną tą stałą przy rozwartym uzwojeniu

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

stojana  $T'_{d0}$ , którą można wyznaczyć ze schematu na rys. 2.13 uwzględniając rezystancję obwodu wzbudzenia  $R_f$ :

$$T'_{d0} = \frac{X_{rf} + X_{ad}}{\omega R_f} \quad (2.32)$$

Podczas zwarcia na zaciskach  $T'_d$  wynosi, więc:

$$T'_d = \frac{X_{rf} + \frac{X_r X_{ad}}{X_r + X_{ad}}}{\omega R_f} = \frac{X_{rf} + X_{ad}}{\omega R_f} \frac{X_{rf} X_r + X_{rf} X_{ad} + X_r X_{ad}}{(X_r + X_{ad})(X_{rf} + X_{ad})} = T'_{d0} \frac{X'_d}{X_d} \quad (2.33)$$

W przypadku zwarcia za reaktancją zewnętrzną  $X_Z$  zależność powyższa będzie:

$$T'_d = \frac{X_{rf} + \frac{(X_r + X_Z) X_{ad}}{(X_r + X_Z) + X_{ad}}}{\omega R_f} = T'_{d0} \frac{X'_d + X_Z}{X_d + X_Z} \quad (2.34)$$

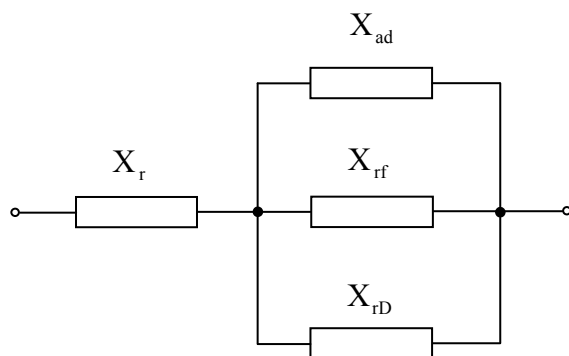
Stała czasowa  $T'_{d0}$  wynosi od 5s. do 12s., przy czym jednostki większe mają zazwyczaj mniejszą tą stałą czasową. Stała czasowa dla stanu zwarcia na zaciskach  $T'_d$  wynosi, więc od 0,6 s do 1s.

Dodatkowy aperiodyczny strumień, jaki pojawił się na wirniku, skojarzony z uzwojeniem wzbudzenia, wirując razem z wirnikiem przecina uzwojenia stojana indukując w nich dodatkowy prąd sinusoidalny o zanikającej amplitudzie:

$$\Delta I_d' = \left( \frac{E'_d}{X'_d} - \frac{E_d}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \quad (2.35)$$

Prąd ten nazywa się składową przejściową prądu zwarciovego. Wartość skuteczna tego prądu w chwili powstania zwarcia wynosi od 3 do 5 prądów znamionowych.

Rozważone zostanie zachowanie się uzwojenia tłumiącego umieszczonego również na wirniku. Zgodnie z zasadą ciągłości strumienia skojarzonego z tym uzwojeniem musi się pojawić w tym uzwojeniu dodatkowy zanikający aperiodycznie prąd zapewniający zachowanie zasady ciągłości strumienia. Obraz drogi strumienia stojana będzie teraz jak na rys. 2.12c. Reaktancja maszyny w tym stanie będzie postaci przedstawionej na rys. 2.15.



Rys. 2.15 Reaktancja podprzejściowa (nadprzejściowa) generatora, gdzie:



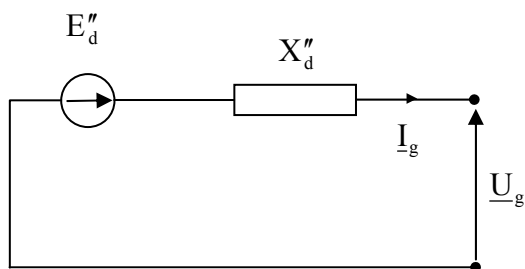
## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

- $X_{rD}$  - reaktancja rozproszenia uzwojenia tłumiącego.

Wypadkowa reaktancja generatora, nazywana reaktancją podprzejsciową (nadprzejsciową) podłużną maszyny  $X_d''$  wynosi:

$$X_d'' = X_r + \frac{1}{\frac{1}{X_{rD}} + \frac{1}{X_{rf}} + \frac{1}{X_{ad}}} \quad (2.36)$$

Reaktancja ta wynosi od 12% do 25%. Schemat generatora dla rozważanego stanu jest na rys. 2.16.



Rys. 2.16 Schemat generatora w stanie podprzejsciowym, gdzie:

- $E_d''$  - SEM podprzejsciowa generatora.

$$\underline{E}_d'' = \underline{U}_q + j X_d'' I_q \quad (2.37)$$

Ten dodatkowy strumień jest tłumiony ze stałą  $T_d''$ , którą obliczamy ze stałej  $T_{d0}''$  wyznaczonej przy rozwartym stojanie uwzględniając rezystancję uzwojenia tłumiącego  $R_D$ :

$$T_{d0}'' = \frac{X_{rD} + \frac{X_{ad} X_{rf}}{X_{ad} + X_{rf}}}{\omega R_D} \quad (2.38)$$

Stała czasowa  $T_d''$  wynosi:

$$T_d'' = \frac{X_{rD} + \frac{1}{\frac{1}{X_{rf}} + \frac{1}{X_r} + \frac{1}{X_{ad}}}}{\omega R_D} = T_{d0}'' \frac{X_d''}{X_d'} \quad (2.39)$$

W przypadku zwarcia nie na zaciskach generatora mamy:

$$T_d'' = T_{d0}'' \frac{X_d'' + X_Z}{X_d' + X_Z} \quad (2.40)$$

Stała  $T_{d0}''$  wynosi od 0,02 s do 0,2s., a  $T_d''$  jest od niej przeciętnie dwa razy mniejsza.

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Dodatkowy aperiodyczny strumień, jaki pojawił się od uzwojenia tłumiącego, wirując razem z wirnikiem przecina uzwojenia stojana indukując w nich dodatkowy prąd sinusoidalny o zanikającej amplitudzie:

$$\Delta I_d'' = \left( \frac{E_d''}{X_d''} - \frac{E_d'}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} \quad (2.41)$$

Prąd ten nazywa się składową nadprzejściową prądu zwarciego. Wartość skuteczna tej składowej wynosi około dwóch prądów znamionowych.

Składowa okresowa prądu zwarciego w osi d generatora jest sumą tych trzech składowych.

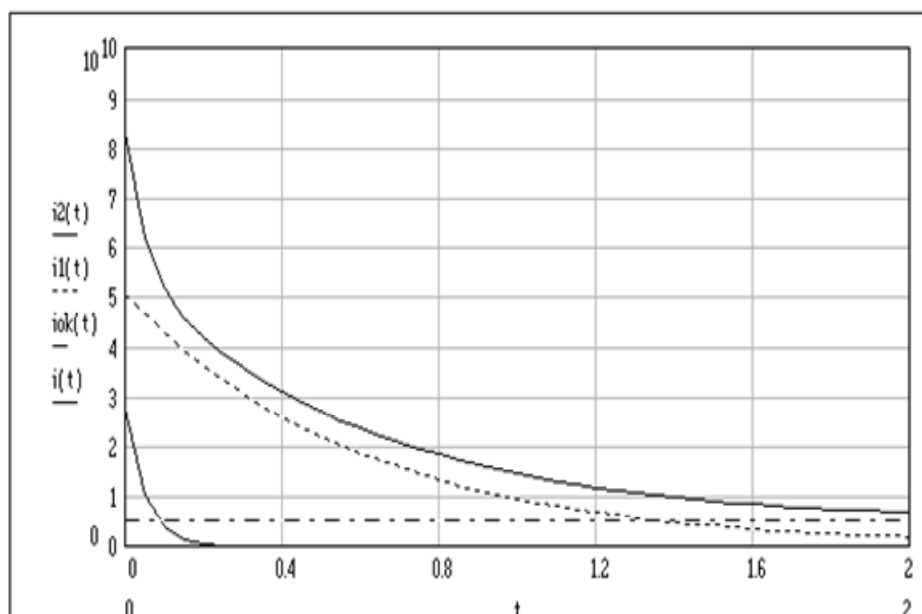
$$I_{okd} = \Delta I_d'' + \Delta I_d' + I_{ud} \quad (2.42)$$

$$I_{okd} = \left( \frac{E_d''}{X_d''} - \frac{E_d'}{X_d'} \right) e^{-\frac{t}{T_d''}} + \left( \frac{E_d'}{X_d'} - \frac{E_d}{X_d} \right) e^{-\frac{t}{T_d'}} + \frac{E_d}{X_d} \quad (2.43)$$

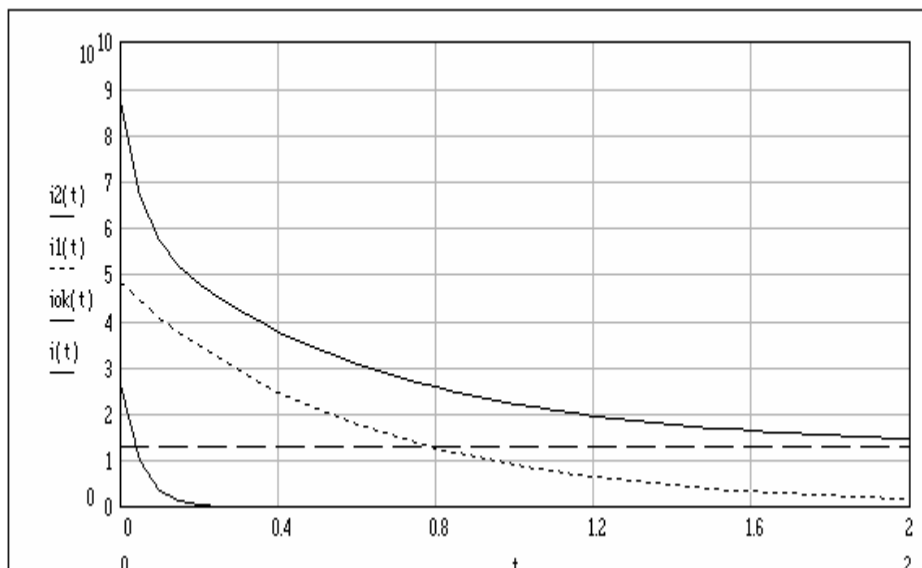
Na rys. 2.17 i rys. 2.18 zaprezentowano przebiegi wartości skutecznych składowych prądu zwarciego w osi d podczas zwarcia na zaciskach nieobciążonego i obciążonego generatora. Uwidoczniono: składową nadprzejściową; przejściową; ustaloną oraz składową okresową.

Oprócz zjawisk występujących w osi d maszyny a opisanych powyżej, podobne zjawiska występują w osi q generatora. Analizując je musimy jedynie pamiętać jedynie, że w osi q nie uzwojenia wzbudzenia. Składowa okresowa prądu zwarciego w osi q generatora wyraża się zależnością:

$$I_{okq} = \left( \frac{E_q''}{X_q''} - \frac{E_q}{X_q} \right) e^{-\frac{t}{T_q''}} + \frac{E_q}{X_q} \quad (2.44)$$



Rys. 2.17 Przebieg wartości skutecznych składowych prądu zwarciego podczas zwarcia na zaciskach nieobciążonego generatora:  $i_2$  - składowa nadprzejściowa;  $i_1$  - składowa przejściowa;  $i_{ok}$  - składowa ustalona;  $i$  - składowa okresowa.

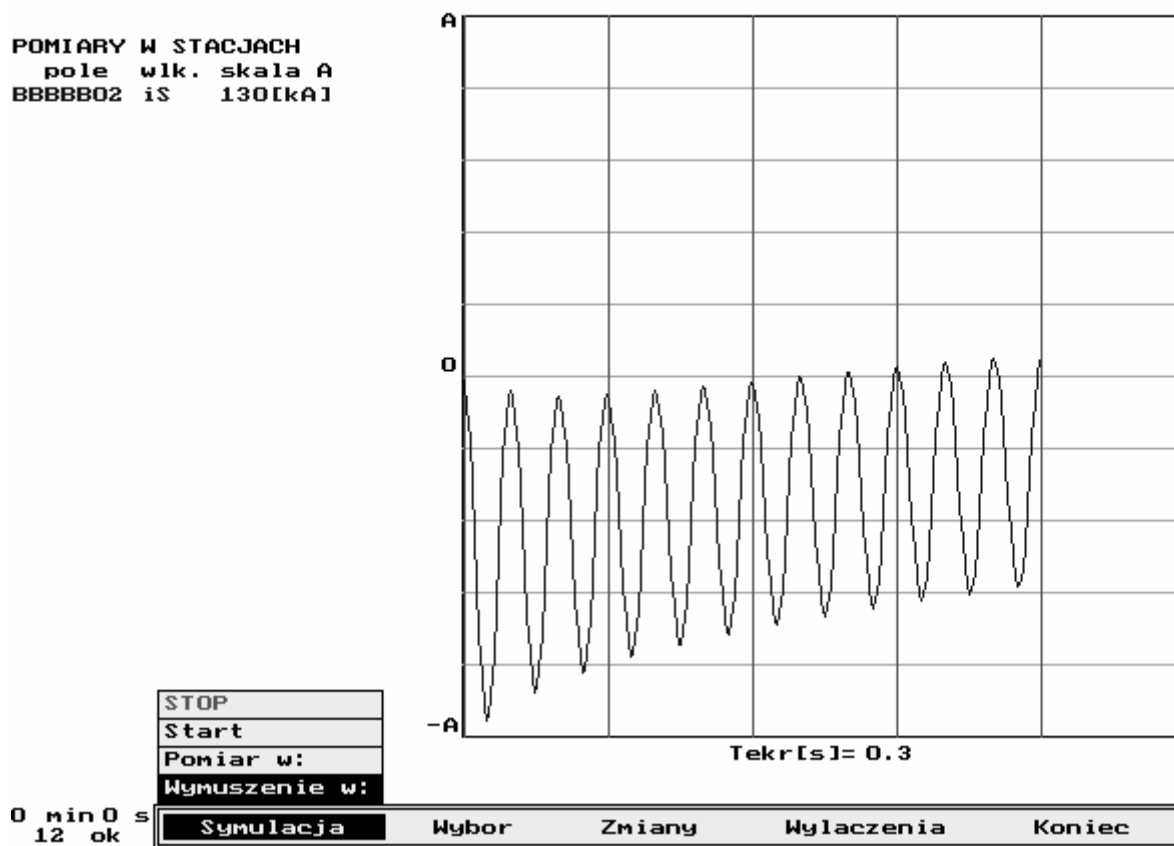


Rys. 2.18 Przebieg wartości skutecznych składowych prądu zwarciovego podczas zwarcia na zaciskach obciążonego znamionowo generatora:  $i_2$  - składowa nadprzejsiowa;  $i_1$  - składowa przejściowa;  $i_{ok}$  - składowa ustalona;  $i$  - składowa okresowa.

Dla chwili zerowej prąd okresowy nazywa się prądem zwarciovym początkowym  $I_p$ , wyraża się zależnością:

$$I_p = I_{ok}(t = 0s) = \sqrt{[I_{okd}(t = 0s)]^2 + [I_{okq}(t = 0s)]^2} = \sqrt{\left(\frac{E''_d}{X''_d}\right)^2 + \left(\frac{E''_q}{X''_q}\right)^2} \quad (2.45)$$

W uzwojeniu stojana oprócz opisanej powyżej składowej okresowej, może pojawić się składowa nieokresowa zapewniająca zachowanie zasady ciągłości prądu w uzwojeniu stojana. W przypadku generatora synchronicznego trójfazowego, w co najmniej dwóch fazach pojawi się składowa nieokresowa. Składowa ta zanika ze stałą czasową  $T_a$ , która wynosi od 0,3s do 5s. Warto zauważyć, że jeśli  $T_a > T'_d$  to prąd zwarciovym przez pewien czas jest prądem pulsującym, sinusoidalnie drgającym wokół składowej aperiodycznej, a więc nie przechodzi przez zero. Jest to typowe zjawisko dla dużych generatorów. Powinno się pamiętać, że dopóki nie będzie pierwszego przejścia prądu przez zero nie możemy wyłączyć takiego prądu (rys. 2.19). Prądy nieokresowe wytwarzają aperiodyczny strumień nieruchomy względem stojana. Dla uzwojeń wirującego wirnika strumień ten daje skojarzenie magnetyczne sinusoidalnie zmienne w czasie, przy czym w chwili zwarcia strumień ten ma kierunek zgodny ze strumieniem wzbudzenia, czyli działa domagnesowująco. W uzwojeniach wirnika popłyną dodatkowe prądy sinusoidalne o zanikającej amplitudzie.



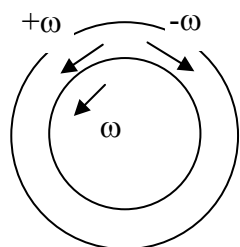
Rys. 2.19 Wyniki symulacji zwarcia pomiędzy generatorem a transformatorem blokowym, przed zwarciem generator był nieobciążony, kąt początkowy zwarcia wynosił zero.

#### 2.5.4. Wyższe harmoniczne prądu zwarciovego

Omawiając składową nieokresową prądu stojana stwierdziliśmy, że:

- wytwarza aperiodycznie strumień nieruchomy względem stojana,
- strumień ten indukuje w uzwojeniach wirnika sinusoidalnie zmienne prądy.

Prądy te wytwarzają sinusoidalnie zmienny strumień pulsujący wobec wirnika. Strumień pulsujący można rozłożyć na dwa strumienie wirujące w przeciwnych kierunkach względem wirnika.



Rys. 2.20 Strumień pulsujący i dwa strumienie wirujące w przeciwnych kierunkach względem wirnika.

Strumień wirujący w kierunku przeciwnym do ruchu wirnika jest nieruchomy względem stojana, nie indukuje żadnego prądu w uzwojeniach stojana. Strumień wirujący w kierunku zgodnym z ruchem wirnika wiruje względem stojana z prędkością  $2\omega$  indukując w uzwojeniach stojana

zanikający prąd drugiej harmonicznej. Amplituda tej składowej prądu zwarciovego jest bardzo mała i wynosi do  $(5 - 10)\% I_N$ . Analizy tego typu można by prowadzić dalej tzn. prądy drugiej harmonicznej oddziałują na uzwojenia wirnika, które z kolei indukują prądy czwartej harmonicznej prądu stojana itd.. Ze względu na niski udział wyższych harmonicznych w prądzie zwarciovym w dalszych rozważaniach nie uwzględniono ich występowanie.

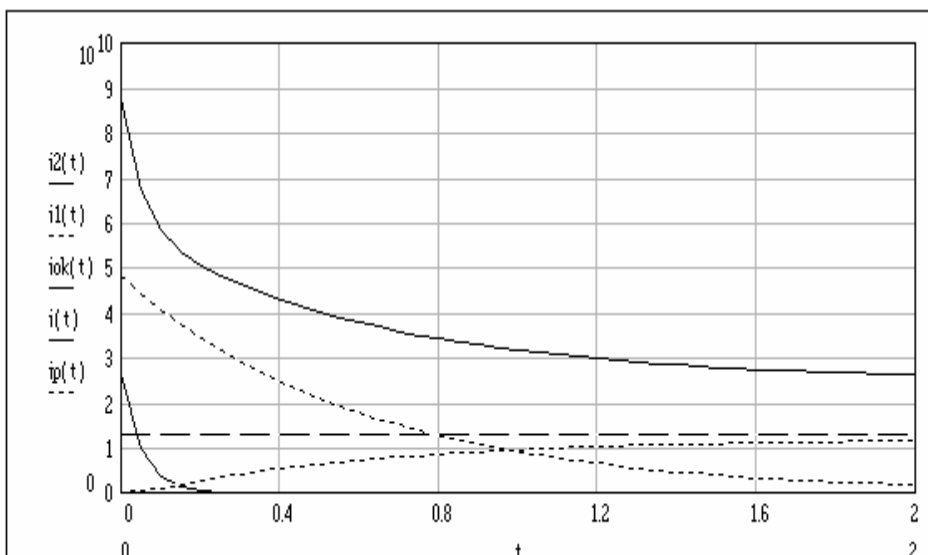
### 2.5.5. Wpływ regulacji napięcia

Napięcie wzbudzenia jest wytwarzane poprzez specjalne urządzenie zwane układami wzbudzenia generatora synchronicznego. Układy wzbudzenia są sterowane poprzez regulator napięcia (wzbudzenia) generatora. Regulator porównuje mierzone napięcie na zaciskach generatora z napięciem zadaniem. Gdy różnica między tymi wielkościami jest większa o strefy nieczułości regulatora, regulator zmienia napięcie wzbudzenia a w efekcie napięcie generatora. Algorytm działania regulatora jest następujący:

- a) gdy napięcie generatora jest mniejsze od zadanego to regulator zwiększa prąd wzbudzenia,
  - b) gdy napięcie generatora jest większe od zadanego to regulator zmniejsza prąd wzbudzenia.
- Analizując wpływ konstrukcji układu wzbudzenia generatora na prąd zwarciovym, konstrukcje te można podzielić na trzy grupy:
- a) grupa pierwsza – wzbudnice maszynowe,
  - b) grupa druga – wzbudnice statyczne zasilane napięciem generatora tzn. układ tyrystorowy wytwarzający prąd wzbudzenia jest zasilany napięciem generatora,
  - c) grupa trzecia - wzbudnice statyczne zasilane napięciem i prądem generatora tzn. układ tyrystorowy wytwarzający prąd wzbudzenia jest zasilany sumą napięć: napięciem generatora i napięciem będącym stratą napięcia na specjalnym dławiku a wywołaną prądem generatora.

Poszczególne grupy wpływają na wartość skuteczną składowej okresowej prądu zwarciovego przy zwarciu na zaciskach generatora w następujący, przybliżony sposób:

- a) wzbudnice maszynowe: Prąd wzbudzenia narasta od wartości, jaka była przed zwarcieniem do wartości granicznej równej ok. 1.6 wartości prądu wzbudzenia podczas obciążenia znamionowego, stała czasowa narastania prądu wzbudzenia wynosi od 0.1s do 0.5s.
- b) wzbudnica statyczna zasilana napięciem generatora: Układ regulacji napięcia wzbudzenia wysterowuje tyrystory na ich maksymalne przewodzenia jednak ze względu na obniżenie napięcia na zaciskach generatora będącego napięciem zasilającym układu prąd wzbudzenia maleje do zera a wraz z nim prąd zwarciovym.
- c) wzbudnica statyczna zasilana napięciem i prądem generatora: Układ regulacji napięcia wzbudzenia wysterowuje tyrystory na ich maksymalne przewodzenia. Napięcie zasilające układ tyrystorowy jest sumą napięcia na zaciskach generatora i napięcia wywołanego przez prąd zwarciovym nie maleje ono do zera, co w efekcie prowadzi do wzrostu prądu wzbudzenia oraz do wolniejszego zanikania prądu zwarciovego.



Rys. 2.21 Przebieg wartości skutecznych składowych prądu zwarciovego podczas zwarcia na zaciskach obciążonego znamionowo generatora wyposażonego w maszynowy układ regulacji napięcia (napięcia wzbudzenia):  $i_2$  - składowa nadprzejściowa;  $i_1$  - składowa przejściowa;  $i_{ok}$  - składowa ustalona;  $i_p$  - składowa generowana przez dodatkowe napięcie wzbudzenia;  $i$  - składowa okresowa.

## 2.6. Metoda jednostek względnych

Prowadzenie obliczeń w jednostkach mianowanych jest uciążliwe ze względu na konieczność przeliczania impedancji elementów przez przekładnie transformatorów. Można te obliczenia uprościć stosując jednostki względne. Idea prowadzenia obliczeń w jednostkach względnych polega na zastąpieniu wielkości mianowanych (mocy, prądu, impedancji czy napięcia) przez wielkości niemianowane równe stosunkowi danej wielkości do odpowiedniej wielkości podstawowej. Wielkościami występującymi jako podstawowe są:  $I_{pod}$ ,  $U_{pod}$ ,  $Z_{pod}$ ,  $S_{pod}$ . Wielkości te są powiązane zależnościami:

$$I_{pod} = \frac{S_{pod}}{\sqrt{3} U_{pod}} \quad (2.46)$$

$$Z_{pod} = \frac{U_{pod}^2}{S_{pod}} = \frac{U_{pod}}{\sqrt{3} I_{pod}} \quad (2.47)$$

$$S_{pod} = \sqrt{3} U_{pod} I_{pod} = \sqrt{3} \sqrt{3} I_{pod} I_{pod} Z_{pod} = 3 I_{pod}^2 Z_{pod} = \frac{U_{pod}^2}{Z_{pod}} \quad (2.48)$$

gdzie:

- $U_{pod}$  – napięcie podstawowe, międzyprzewodowe.

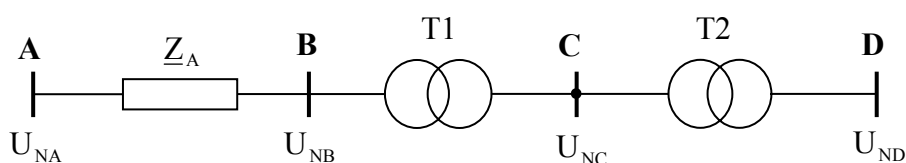
Oznacza to, że przyjmując za wielkości podstawowe moc  $S_{pod}$  i napięcie międzyprzewodowe  $U_{pod}$  pozostałe dwie wielkości podstawowe są określone z wzorów (2.46) i (2.48).

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

Jeżeli prowadzi się obliczenia w jednostkach względnych i założy się, że:

1. napięcie znamionowe elementów systemu są równe 1,05 napięcia znamionowego sieci, do której są przyłączone,
2. napięcie podstawowe równa się 1,05 napięcia znamionowego sieci,
3. przekładnie transformatorów równe są stosunkowi napięć znamionowym sieci, do której są przyłączone,

to obliczenia w jednostkach względnych znacznie się upraszczają co zostanie udowodnione rozpatrując przykład pokazany na rys. 2.22.



Rys. 2.22 Schemat rozpatrywanej sieci, gdzie:

- $Z_A$  - impedancja np. impedancja linii.

Gdyby chcieli impedancję  $Z_A$  „sprowadzić” na napięcie szyny D, w jednostkach mianowanych byłoby to:

$$\underline{Z}_A^D = \underline{Z}_A \vartheta_{T1}^2 \vartheta_{T2}^2 \quad (2.49)$$

gdzie:

$$\vartheta_{T1} = \frac{U_{NT1C}}{U_{NT1B}} \quad (2.50)$$

$$\vartheta_{T2} = \frac{U_{NT2D}}{U_{NT2C}} \quad (2.51)$$

$$\underline{Z}_A^D = \underline{Z}_A \left( \frac{U_{NT1C}}{U_{NT1B}} \right)^2 \left( \frac{U_{NT2D}}{U_{NT2C}} \right)^2 \quad (2.52)$$

Równania powyższe napisano przy założeniu, że:

$$U_{ND} > U_{NC} > U_{NB} \quad (2.53)$$

Wykorzystując założenie, że napięcie znamionowe transformatorów równe jest napięciu znamionowemu sieci otrzymano:

$$\underline{Z}_A^D = \underline{Z}_A \left( \frac{U_{NC}}{U_{NB}} \right)^2 \left( \frac{U_{ND}}{U_{NC}} \right)^2 = \underline{Z}_A \left( \frac{U_{ND}}{U_{NB}} \right)^2 \quad (2.54)$$

W jednostkach względnych obliczenia te wyglądają następująco:

$$U_{podA} = 1,05 U_{NA} \quad (2.55)$$

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

$$\underline{Z}_{Aw} = \frac{\underline{Z}_A}{Z_{podA}} = \frac{\underline{Z}_A S_{pod}}{U_{podA}^2} = \frac{\underline{Z}_A S_{pod}}{(1,05 U_{NA})^2} \quad (2.56)$$

Gdy obliczyć na napięciu  $U_{ND}$  w jednostkach względnych to:

$$\underline{Z}_{Aw}^D = \frac{\underline{Z}_A}{Z_{podD}} \left( \frac{U_{ND}}{U_{NB}} \right)^2 = \frac{\underline{Z}_A S_{pod}}{U_{podD}^2} \left( \frac{U_{ND}}{U_{NB}} \right)^2 = \frac{\underline{Z}_A S_{pod}}{(1,05 U_{ND})^2} \left( \frac{U_{ND}}{U_{NB}} \right)^2 = \frac{\underline{Z}_A S_{pod}}{(1,05 U_{NA})^2} \quad (2.57)$$

**Wobec powyższego można stwierdzić, że impedancja elementu w jednostkach względnych jest jednakowa, niezależnie, na którym napięciu są prowadzone obliczenia.**

Gdyby zamiast impedancji  $Z_A$  znajdował się generator, to w jednostkach mianowanych jest:

$$X_g = \frac{X_d''}{100} \frac{U_{Ng}^2}{S_{Ng}} \quad (2.58)$$

a na napięciu  $U_{ND}$

$$X_g^D = \frac{X_d''}{100} \frac{U_{Ng}^2}{S_{Ng}} \left( \frac{U_{ND}}{U_{NB}} \right)^2 \quad (2.59)$$

$$X_{gw} = \frac{X_d''}{100} \frac{U_{Ng}^2}{S_{Ng}} \left( \frac{U_{N3}}{U_{N1}} \right)^2 \frac{S_{pod}}{(1,05 U_{N3})^2} \quad (2.60)$$

Zgodnie z drugim założeniem

$$U_{Ng} = 1,05 U_{NB} \quad (2.61)$$

$$X_{gw} = \frac{X_d''}{100} \frac{S_{pod}}{S_{Ng}} \frac{(1,05 U_{N1})^2}{(1,05)^2 U_{N1}^2} = \frac{X_d''}{100} \frac{S_{pod}}{S_{Ng}} \quad (2.62)$$

Przykłady zastosowania jednostek względnych:

a) Prąd początkowy zwarcia  $I_p$

$$I_p = \frac{1,1 U_N}{\sqrt{3} X_z} \quad (2.63)$$

$$I_{pw} = \frac{I_p}{I_{pod}} = \frac{1,1 U_N}{\sqrt{3} X_z} \frac{\sqrt{3} Z_p}{U_p} = \frac{1,1 U_N}{1,05 U_N} \frac{1}{X_{zw}} = \frac{1,05}{X_{zw}} \quad (2.64)$$



## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

b) Moc zwarciowa

$$S_z = \sqrt{3} U_N I_p = \frac{1,1 U_N^2}{X_z} \quad (2.65)$$

$$S_{zw} = \frac{S_z}{S_p} = \frac{1,1 U_N^2}{X_z} \frac{Z_{pod}}{U_{pod}^2} = \frac{1,1 U_N^2}{(1,05 U_N)^2} \frac{1}{X_{zw}} = \frac{1}{X_{zw}} \quad (2.66)$$

c) Napięcie międzyprzewodowe

$$U = \sqrt{3} I_p X_z \quad (2.67)$$

$$U_w = \frac{U}{U_{pod}} = \frac{\sqrt{3} I_p X_z}{\sqrt{3} I_{pod} Z_{pod}} = I_{pw} X_{zw} \quad (2.68)$$

d) Napięcie fazowe

$$U_f = I_p X_z \quad (2.69)$$

$$U_{fpod} = \frac{U_{pod}}{\sqrt{3}} \quad (2.70)$$

$$U_{fw} = \frac{U_f}{U_{fpod}} = \frac{I_p X_z}{\frac{U_{pod}}{\sqrt{3}}} = \frac{I_p X_z}{\frac{\sqrt{3} I_{pod} Z_{pod}}{\sqrt{3}}} = I_{pw} X_{zw} \quad (2.71)$$

e) Impedancja linii

$$Z_{Lw} = \frac{Z_L}{Z_{pod}} = Z_L \frac{S_{pod}}{U_{pod}^2} = Z_{Lk} \frac{1}{(1,05 U_{NL})^2} \quad (2.72)$$

f) Impedancja transformatora

$$X_{Tw} = \frac{\Delta U_Z}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NT}} \quad (2.73)$$

g) Reaktancja dławika przeciwzwarciowego

$$Z_w = \frac{Z_D}{Z_{pod}} = Z_D \frac{S_{pod}}{U_{pod}^2} = \frac{\Delta U_{\%}}{100} \frac{U_{ND}}{\sqrt{3} I_{ND}} \frac{S_{pod}}{(1,05 U_{ND})^2} \quad (2.74)$$

### 2.7. Pytania kontrolne

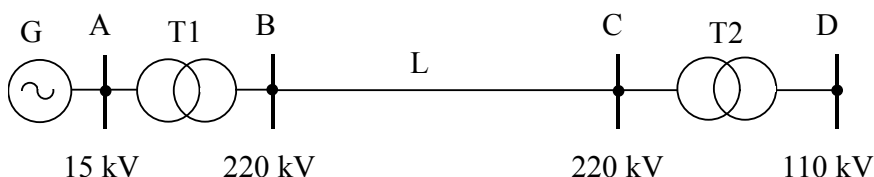
1. Przyczyny powstawania zwarć.
2. Skutki zwarcia.
3. Działanie łuku palącego się w miejscu zwarcia.
4. Częstość występowania zwarć w różnych miejscach systemu elektroenergetycznego.
5. Omówić metodę jednostek względnych.
6. Zalety stosowania metody jednostek względnych.
7. Narysować przebiegi wartości chwilowych prądu zwarciovego, w fazach zwartych, przy zwarciu odległym:
  - a) trójfazowym,
  - b) dwufazowym.
8. Narysować przebiegi wartości chwilowych prądu zwarciovego w fazie R, przy trójfazowym zwarciu odległym, przy:
  - a)  $\varphi_z = 90^\circ$ ;  $\gamma_0 = 0^\circ$ ;
  - b)  $\varphi_z = 90^\circ$ ;  $\gamma_0 = 90^\circ$ ;
  - c)  $\varphi_z = 90^\circ$ ;  $\gamma_0 = 45^\circ$ ;
  - d)  $\varphi_z = 45^\circ$ ;  $\gamma_0 = 0^\circ$ ;w układzie pracującym w stanie jałowym. Jakie będą przebiegi w układzie obciążonym?
9. Narysować przebieg wartości skutecznych składowej okresowej prądu zwarciovego podczas zwarcia trójfazowego i dwufazowego przy pominięciu i uwzględnieniu działania regulatora wzbudzenia generatora wyposażonego w wzbudnicę maszynową.
10. Jak zmienia się składowa nieokresowa prądu zwarciovego jeśli wystąpi prąd obciążenia o charakterze indukcyjnym.
11. Jak zmienia się składowa nieokresowa prądu zwarciovego jeśli wystąpi prąd obciążenia o charakterze pojemnościowym.
12. Czemu jest równa suma wartości chwilowych składowej nieokresowej w dowolnej chwili podczas zwarcia trójfazowego symetrycznego?
13. Na przykładzie omówić zasadę ciągłości prądu w cewce.
14. Jakimi byłyby skutki jeśli w obwodach elektrycznych nie obowiązywała by zasada ciągłości prądu w cewce.
15. Dlaczego składowa ustalona prądu zwarciovego generatora powoduje rozmagnesowanie tego generatora?
16. Narysować przebieg wartości skutecznych składowych prądu zwarciovego podczas zwarcia na zaciskach obciążonego znamionowo generatora wyposażonego w wzbudnicę statyczną zasilaną napięciem generatora.
17. Narysować przebieg wartości skutecznych składowych prądu zwarciovego podczas zwarcia na zaciskach obciążonego znamionowo generatora wyposażonego w wzbudnicę statyczną zasilaną napięciem i prądem generatora.

### 2.8. Zadania

#### 2.8.1. Zadanie 1

Dany jest układ elektroenergetyczny jak na rys. 2.23.

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych



Rys. 2.23 Schemat sieci elektroenergetycznej do obliczeń.

Dane znamionowe elementów sieci:

$$G: \quad U_N=15.75 \text{ kV}; \quad S_N=250 \text{ MVA}; \quad X''_{d\%} = 15\%;$$

$$T1: \quad S_N=250 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{231 \text{ kV}}{15 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=14 \%;$$

$$T2: \quad S_N=250 \text{ MVA}; \quad \vartheta = \frac{220 \text{ kV}}{115 \text{ kV}}; \quad \Delta U_{z\%}=11 \%;$$

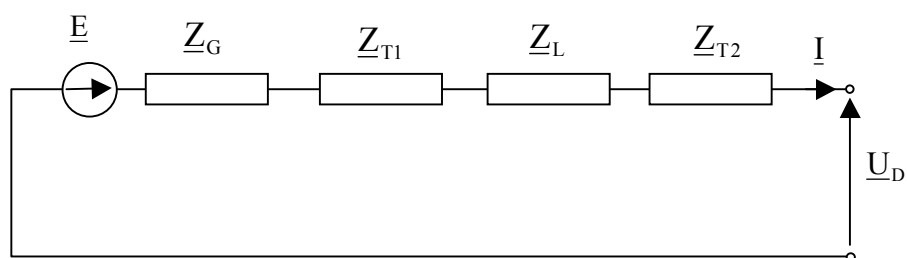
$$L: \quad X_{Lk}=0.4 \ \Omega/\text{km}; \quad l=100 \text{ km};$$

Dla zwarcia trójfazowego na szynach D obliczyć reaktancję obwodu zwarciovego stosując:

1. jednostki mianowane,
2. jednostki względne.

Rozwiązanie

1. Schemat zastępczy obwodu jest na rys. 2.24.



Rys. 2.24 Schemat zastępczy obwodu.

2. Impedancje elementów w jednostkach mianowanych przeliczone na napięcie miejsca zwarcia – szyny D

$$X_G = \frac{X''_{d\%}}{100} \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}} \vartheta_{T1}^2 \frac{1}{\vartheta_{T2}^2} = \frac{15}{100} \frac{15.75^2}{250} \left(\frac{231}{15}\right)^2 \left(\frac{115}{220}\right)^2 = 9.645 \ \Omega$$

$$X_{T1} = \frac{\Delta U_{z\%}}{100} \frac{U_{NT1}^2}{S_{NT1}} \frac{1}{\vartheta_{T2}^2} = \frac{14}{100} \frac{231^2}{250} \left(\frac{115}{220}\right)^2 = 8.165 \ \Omega$$

$$X_L = X_{Lk} l \frac{1}{\vartheta_{T2}^2} = 0.4 \cdot 100 \cdot \left(\frac{115}{220}\right)^2 = 10.93 \ \Omega$$

## A. Kanicki: Zwarcia w sieciach elektroenergetycznych

---

$$X_{T2} = \frac{\Delta U_{z\%}}{100} \frac{U_{NT2}^2}{S_{NT2}} = \frac{11}{100} \frac{115^2}{250} = 5.819 \Omega$$

3. Impedancja obwodu zwarcia w jednostkach mianowanych przeliczona na napięcie miejsca zwarcia – szyny D

$$X_D = X_G + X_{T1} + X_L + X_{T2} = 9.645 + 8.165 + 10.93 + 5.819 = 34.56 \Omega$$

4. Impedancje elementów w jednostkach względnych, przyjmując, że moc podstawowa wynosi:  $S_{pod}=250$  MVA

$$X_{GW} = \frac{X_{d\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NG}} = \frac{15}{100} \frac{250}{250} = 0.15$$

$$X_{T1W} = \frac{\Delta U_{z\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NT1}} = \frac{14}{100} \frac{250}{250} = 0.14$$

$$X_{LW} = X_{Lk} \cdot 1 \cdot \frac{S_{pod}}{(1.05 \cdot U_{NL})^2} = 0.4 \cdot 100 \frac{250}{(1.05 \cdot 220)^2} = 0.1874$$

$$X_{T2W} = \frac{\Delta U_{z\%}}{100} \frac{S_{pod}}{S_{NT2}} = \frac{11}{100} \frac{250}{250} = 0.11$$

5. Impedancja obwodu zwarcia w jednostkach względnych

$$X_{DW} = X_{GW} + X_{T1W} + X_{LW} + X_{T2W} = 0.15 + 0.14 + 0.1874 + 0.11 = 0.5874$$

Po przeliczeniu na jednostki mianowane mamy:

$$X_D = X_{DW} \frac{(1.05 \cdot U_{ND})^2}{S_{pod}} = 0.5874 \frac{(1.05 \cdot 110)^2}{250} = 31.34 \Omega$$

Z powyższego przykładu wynika, że reaktancja obwodu zwarciovego jest różna w zależności od zastosowanej metody. Zazwyczaj stosując metodę jednostek względnych otrzymujemy reaktancje mniejsze niż z metody jednostek mianowanych. Prowadzi do wyznaczania lekko zawyżonych wartości prądu zwarciovego.