

Ćwiczenie 2

ROZPŁYW I PARAMETRY PRĄDU ZWARCIOWEGO

2.1. WPROWADZENIE

Zwarcie jest zakłóceniem pracy układu elektroenergetycznego polegającym na połączeniu bezpośrednim lub przez małą impedancję punktów układu należących do różnych faz z ziemią lub między sobą. Częstość występowania zwarć w układzie elektroenergetycznym zależy wyraźnie od rodzaju sieci i urządzeń współpracujących z daną siecią, przy czym najczęściej występują zwarcia jednofazowe (około 65% wszystkich zwarć), rzadziej dwufazowe, a najrzadziej trójfazowe (około 5% wszystkich zwarć) [1].

Prądy zwarciovowe są z reguły wielokrotnie większe od prądów znamionowych urządzeń elektroenergetycznych, co powoduje występowanie znacznych sił elektrodynamicznych między częściami urządzeń przewodzących prądy zwarciovowe, występowanie napięć krokowych i dotykowych (przy zwarciach doziemnych) oraz intensywne nagrzewanie urządzeń. W celu doboru urządzeń ze względu na dynamiczne i cieplne działanie prądu zwarciovowego analizuje się:

- zwarcia trójfazowe i jednofazowe w sieciach ze skutecznie uziemionym punktem neutralnym,
- zwarcia trójfazowe w sieciach z izolowanym punktem neutralnym.

W celu doboru zabezpieczeń i nastaw automatyki nadprądowej potrzebne są największe i najmniejsze wartości prądów zwarciovowych przy:

- zwarciach trójfazowych symetrycznych,
- zwarciach niesymetrycznych – zwłaszcza jednofazowych doziemnych.

Wyznaczenie maksymalnej wartości prądu zwarcia trójfazowego symetrycznego, pomimo niewielkiej liczby takich zwarć, ma podstawowe znaczenie w doborze urządzeń i zabezpieczeń.

Analiza układów trójfazowych symetrycznych sprowadza się do analizy schematu dla jednej fazy, zapewniającej wystarczającą dokładność obliczeń. W obliczeniach zwarć trójfazowych symetrycznych przyjmuje się wiele uproszczeń, na przykład nie uwzględnia się wpływu obciążeń, zakłada się równość modułów i faz źródeł energii w obwodzie zwarciovym, pomija się pojemności wszystkich elementów układu oraz impedancje magnesowania transformatorów oraz rezystancje elementów jeżeli są znacznie mniejsze od reaktancji. We współczesnych analizach prowadzonych przy pomocy komputerów z wymienionych założeń upraszczających można z łatwością zrezygnować, jednak w wielu przypadkach wprowadzają one do wyników obliczeń tak niewielkie błędy, że są powszechnie przyjmowane.

2.1.1. Charakterystyczne parametry prądu zwarcowego

Wielkości charakteryzujące zwarcie jako stan nieustalony można wyznaczyć na podstawie zależności pomiędzy rezystancjami i reaktancjami elementów sieci oraz wartością prądu zwarcowego początkowego I_k'' obliczanego z zależności:

$$I_k'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot |Z_k|} \quad (2.1)$$

gdzie: $c \cdot U_n / \sqrt{3}$ - napięcie źródła zastępczego.

Współczynnik c przyjmuje się z tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Współczynnik napięciowy c [2]

Napięcie U_n	Współczynnik napięciowy c do obliczania prądu zwarcowego	
	c_{\max}	c_{\min}
Niskie napięcia do 1000 V a) 230/400 V b) inne napięcia	1,00 1,05	0,95 1,00
Średnie napięcia 1kV ÷ 35 kV	1,10	1,00
Średnie i wysokie napięcia 35kV ÷ 230kV	1,10	1,00

W celu doboru urządzeń elektroenergetycznych wyznacza się także inne parametry charakteryzujące prąd zwarcowy:

- prąd wyłączeniowy symetryczny I_b – wartość skuteczna jednego pełnego okresu składowej okresowej, obliczeniowego prądu zwarcowego w chwili rozdzielenia styków pierwszego bieguna łącznika:

$$I_b = k_\mu \cdot I_k' \quad (2.2)$$

przy czym: k_μ jest współczynnikiem uwzględniającym zmniejszenie się składowej zgodnej okresowego prądu zwarcowego do chwili rozdzielenia się styków łącznika i może być wyznaczony z wykresu lub zależności aproksymujących; współczynnik k_μ zależy od czasu t_r rozdzielenia styków łącznika oraz stosunku I_k''/I_n , w którym I_n jest sumą prądów znamionowych wszystkich źródeł obwodu zwarcowego (przeliczonych na napięcie sieci, w której jest wyznaczany prąd I_k''),

- prąd zwarcowy udarowy i_p – maksymalna wartość chwilowa obliczeniowego prądu zwarcowego:

$$i_p = \sqrt{2} \cdot \chi \cdot I_k'' \quad (2.3)$$

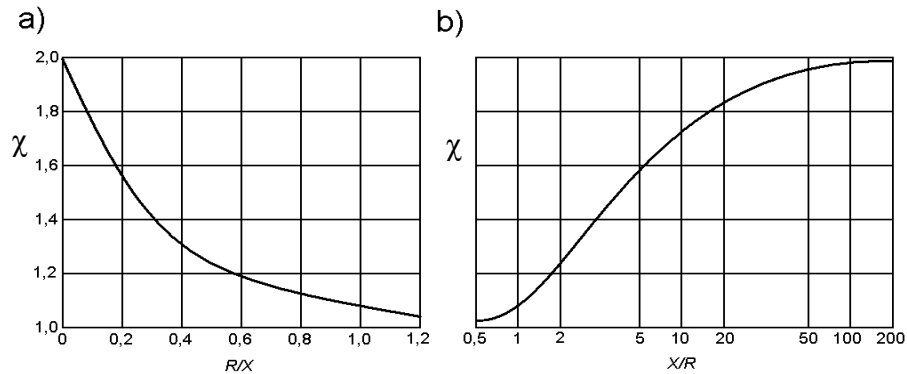
χ – współczynnik udaru odczytany z wykresu rys. 2.1 lub wyznaczony z zależności:

$$\chi = 1 + \exp\left(-\pi \frac{R}{X}\right) \quad (2.4)$$

w której R i X są rezystancją i reaktancją obwodu zwarcowego,

- prąd zwarciový ciepłny I_{th} (prąd zastępczy zwarciový t_z – sekundowy) – ustalona wartość skuteczna prądu zastępczego, który wydziela w torze prądowym, w czasie trwania zwarcia T_k , taką samą ilość ciepła co prąd $i(t)$ – zgodnie z zależnością:

$$I_{th}^2 \cdot T_k = \int_0^{T_k} i(t)^2 dt \quad (2.5)$$



Rys 2.1. Zależność współczynnika χ od wartości: a) R/X , b) X/R , wg [2]

Jeżeli czas t_r rozdzielenia styków łącznika jest mniejszy od 0,1 s to wyznacza się również prąd wyłączeniowy niesymetryczny $I_{b\ asym}$ – jest to prąd I_b uzupełniony o składową nieokresową.

Jeżeli prąd zwarciový dopływa z kilku źródeł, to wyznaczenie współczynnika k_μ w zależności (2.2) na podstawie stosunku I_k''/I_n prowadzi niekiedy do nadmiernych wartości zastępczego prądu zwarciového. W takich przypadkach należy na podstawie rozplywu prądu zwarciového w układzie, uwzględnić zanikanie prądów udziału źródeł w prądzie I_k .

Jeżeli w układzie stosuje się samoczynne ponowne załączenie lub, jeżeli kilka wyłączników wyłącza niejednocześnie częściowe prądy zwarciové, to w obliczeniach zastępczego prądu zwarciového T_k – sekundowego należy uwzględnić zmiany w przebiegu prądu zwarciového wywołane czynnościami łączeniowymi.

2.1.2. Parametry elementów obwodu zwarciového

System elektroenergetyczny

W schemacie zastępczym systemu zasilającego pomija się zazwyczaj rezystancję a reaktancję fazy (reaktancję składowej symetrycznej zgodnej) oblicza się ze wzoru:

$$X_1 = k \frac{U_n^2}{S_z} \quad (2.6)$$

gdzie: U_n [kV] – napięcie znamionowe sieci w miejscu zwarcia,

S_z [MVA] – moc zwarciovą przy zwarciu trójfazowym na szynach układu zasilającego,

k – współczynnik równy stosunkowi napięcia w miejscu zwarcia przed powstaniem zwarcia do napięcia znamionowego sieci w miejscu zwarcia.

Prądnicą synchroniczną (generator)

Dla generatora podaje się:

- napięcie znamionowe U_n [kV],
- moc znamionową S_n [MVA],

- reaktancję przejściową, wstępną, podłużną x_d'' [%],
- straty mocy czynnej ΔP [%/fazę] (straty te często pomijamy)

Na podstawie przedstawionych parametrów generatora oblicza się:

- reaktancję składowej zgodnej

$$X_1 = \frac{x_d'' U_n^2}{100 S_n} \quad (2.7)$$

- rezystancję składowej zgodnej

$$R_1 = \frac{\Delta P U_n^2}{100 S_n} \quad (2.8)$$

Obliczone parametry są odniesione do napięcia znamionowego generatora, jeżeli podstawia się U_n generatora, lub do napięcia znamionowego sieci w miejscu zwarcia, jeżeli podstawia się to napięcie.

Transformator dwuuzwojowy

Dla transformatora podaje się:

- napięcie znamionowe – górne i dolne U_{ng}/U_{nd} [kV/kV],
- moc znamionową S_n [MVA],
- napięcie zwarcia ΔU_z [%],
- straty mocy czynnej w uzwojeniach ΔP_{Cu} [kW].

Na podstawie przedstawionych parametrów transformatora oblicza się:

- impedancję składowej zgodnej

$$Z_1 = \frac{\Delta U_z U_n^2}{100 S_n} \quad (2.9)$$

- rezystancję składowej zgodnej

$$R_1 = \frac{\Delta P_{Cu} U_n^2}{1000 S_n^2} \quad (2.10)$$

- reaktancję składowej zgodnej

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} \quad (2.11)$$

Napięcie U_n w podanych zależnościach może być napięciem znamionowym uzwojenia górnego napięcia U_{ng} lub napięciem znamionowym uzwojenia dolnego napięcia U_{nd} , w zależności od której strony chcemy „widzieć” transformator.

Linia elektroenergetyczna

Dla linii podaje się:

- napięcie znamionowe U_{nl} [kV],
- rezystancję jednostkową R' [Ω /km],
- reaktancję jednostkową X' [Ω /km],
- długość linii l [km].

Na podstawie przedstawionych parametrów linii oblicza się impedancję składowej zgodnej na poziomie napięcia znamionowego linii:

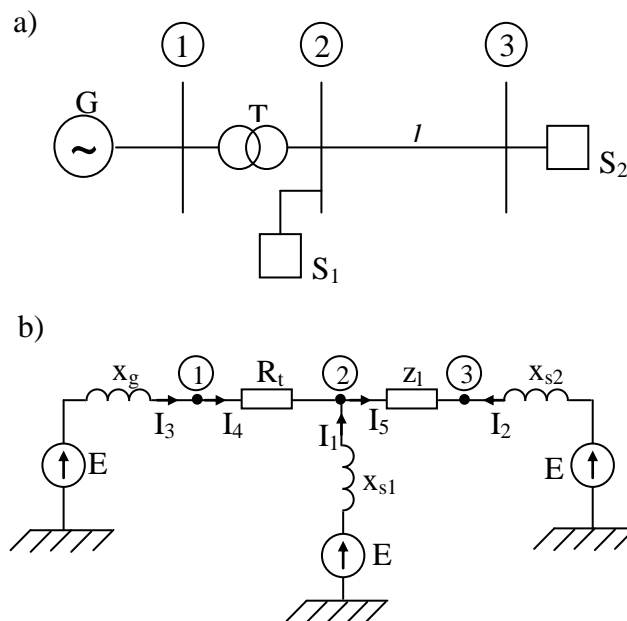
$$Z_1^{(U_{nl})} = (R' + jX') \cdot l \quad (2.12)$$

2.1.3. Wyznaczenie rozplywu prądu zwarciegowego metoda potencjalów węzlowych

W przypadku zwarcia zasilanego z jednego źródła, do obliczeń wartości prądu zwarciegowego wystarcza znajomość zastępczej impedancji zwarciegowej całego układu. Inaczej jest dla zwarć zasilanych z wielu źródeł, kiedy konieczne jest wyznaczenie rozplywu prądu w poszczególnych gałęziach obwodu zwarciegowego. Do obliczeń rozplywu prądu szczególnie przydatna jest metoda potencjalów węzlowych, dostępna w chwili obecnej w postaci gotowych programów.

Dla zadanych parametrów poszczególnych gałęzi układu i danej konfiguracji zapisanej w macierzy strukturalnej gałęziowo-węzłowej, obliczenia rozplywu prądu przy zwiarcach w różnych węzłach układu realizuje się dzięki prostym modyfikacjom macierzy strukturalnej układu.

Obliczenia rozplywu prądu zwarciegowego w przykładowym układzie przedstawionym na rys. 2.2 rozpoczyna się od wykonania schematu zastępczego układu, zgodnie z zasadami przedstawionymi w punkcie 2.1.2, sprowadzając parametry wszystkich elementów do napięcia znamionowego sieci w miejscu zwarcia.



Rys. 2.2. Przykład układu elektroenergetycznego: a) schemat układu , b) schemat zastępczy do obliczeń zwarciegowych

Na podstawie układu z rys.2.2a otrzymujemy jednofazowy schemat zastępczy przedstawiony na rys. 2.2b opisany macierzą admittancji gałęziowych i wektorem prądów źródłowych gałęzi:

$$[Y_g] = \begin{bmatrix} \frac{1}{jX_{s1}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{jX_{s2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{jX_g} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_t} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{Z_l} \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

$$[J_g] = E \begin{bmatrix} 1 \\ jX_{s1} \\ 1 \\ jX_{s2} \\ 1 \\ jX_g \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

przy czym:

$$E = k \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad (2.15)$$

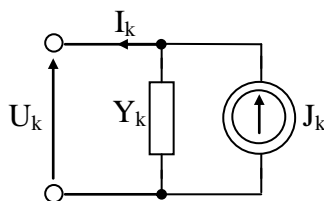
jest napięciem źródłowym (k – współczynnik zgodnie z PN, przyjmowany najczęściej $k = 1,1$)
Następnie wyznaczamy gałęziowo-węzłową macierz strukturalną układu mającego $j = 5$
gałęzi oraz $i = 3$ węzły:

$$[B] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Poszczególne elementy b_{ij} macierzy o wymiarze n gałęzi i m węzłów niezależnych, przyjmują wartość 1, jeżeli j -ta gałąź jest zorientowana do i -tego węzła, natomiast -1 , jeżeli j -ta gałąź jest zorientowana od i -tego węzła oraz wartość 0, jeżeli j -ta gałąź nie jest dołączona do i -tego węzła ($i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$).

Przyjmując dla każdej k -tej gałęzi obwodu złożonego z n gałęzi schemat równoległy (prądowy) przedstawiony na rys.2.3 i określając wektor prądów gałęziowych:

$$[I_g] = [I_1, I_2, \dots, I_n]^T \quad (2.17)$$



Rys. 2.3. Schemat równoległy gałęzi obwodu

można zapisać I prawo Kirchhoffa w postaci:

$$[B] \cdot [I_g] = [0] \quad (2.18)$$

przy czym zgodnie z I prawem Kirchhoffa i prawem Ohma:

$$[I_g] = [J_g] - [Y_g] \cdot [U_g] \quad (2.19)$$

gdzie: $[U_g]$ – wektor napięć gałęziowych.

W metodzie potencjałów węzłowych równania (2.18) i (2.19) przekształca się do postaci:

$$[B] \cdot [Y_g] \cdot [U_g] = [B] \cdot [J_g] \quad (2.20)$$

z której po wprowadzeniu pojęcia macierzy admitancji węzłowych:

$$[Y_w] = [B] \cdot [Y_g] \cdot [B]^T \quad (2.21)$$

macierzy potencjałów węzłowych $[U_w]$ określonej zależnością:

$$[U_w] = [B]^T \cdot [U_g] \quad (2.22)$$

i wektora źródłowych prądów węzłowych:

$$[J_w] = [B] \cdot [J_g] \quad (2.23)$$

otrzymuje się równanie metody potencjałów węzłowych:

$$[Y_w] \cdot [U_w] = [J_w] \quad (2.24)$$

i jego rozwiązanie:

$$[U_w] = [Y_w]^{-1} \cdot [J_w] \quad (2.25)$$

Wartości prądów otrzymuje się, podstawiając rozwiązanie równania (2.25) do zależności (2.22) i (2.19).

Dużą przydatność metody potencjałów węzłowych do obliczeń rozplywu prądów zwarciovych polega na tym, że zwarcia trójfazowe symetryczne w węzłach układu są odwzorowywane na jednofazowym schemacie zastępczym, w postaci połączenia węzła, w którym jest zwarcie, z węzłem odniesienia, a więc do przekształcenia pełnej macierzy strukturalnej układu w macierz bez wiersza odpowiadającego węzłowi, w którym jest zwarcie. I tak na przykład dla rozpatrywanego układu elektroenergetycznego (rys. 2.2) przy zwarciu w węźle 1 otrzymuje się macierz strukturalna

$$[B'] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Układ ze zwarciem w zadanym węźle, a więc z przekształconą macierzą strukturalną poddaje się analizie metodą potencjałów węzłowych identycznie jak układ wyjściowy. Występujący w obwodzie zwarciovym wypadkowy prąd zwarciov I_{zw} można obliczyć, wykorzystując opuszczony wiersz pełnej macierzy strukturalnej. Ponieważ jak wynika z I prawa Kirchhoffa, przy zwarciu w k-tym węźle:

$$I_{zw} = \sum_{j=1}^m b_{kj} \cdot I_j \quad (2.27)$$

Literatura:

- Kujaszczyk Sz.: Elektroenergetyczne układy przesyłowe. WNT, Warszawa 1997 r.
 Kujaszczyk Sz.: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze. WNT, Warszawa 1994 r.