

OBLICZANIE PRĄDU POCZĄTKOWEGO ZWARCIA W SIECIACH SN WEDŁUG NORMY PN-EN 60909 – REFERAT KONFERENCYJNY

Krzysztof KSIĘŻYK¹, Tomasz ZDUN²

1. PLANS

tel: 609-026-342, fax: 22-665-91-56, e-mail: krzysztof.ksiezyk@plans.com.pl

2. PLANS

tel: 501-296-535, fax: 22-665-91-56, e-mail: tomasz.zdun@plans.com.pl

Streszczenie: Wyznaczanie wielkości zwarciovych należy do najczęściej wykonywanych analiz sieciowych. Przeprowadzanie tych obliczeń powinno być zgodne z obowiązującą normą PN-EN 60909. W referacie zostały opisane modele podstawowych elementów sieci wraz ze sposobem wyznaczania ich parametrów impedancyjnych z uwzględnieniem współczynników korygujących wprowadzonych przez normę. Przedstawiono wyniki obliczeń początkowego prądu zwarcia dla przykładowej sieci SN oraz porównano je z wynikami uzyskanymi bez uwzględniania współczynników poprawkowych.

Słowa kluczowe: obliczenia zwarciove, początkowy prąd zwarciovy, modele elementów.

1. WSTĘP

Inwestycje w infrastrukturę elektroenergetyczną, takie jak budowa nowej linii, instalacja transformatora czy bloku wytórczego w elektrowni, poprzedzone są szeregiem analiz, w tym analizami technicznymi. Jedną z nich jest wyznaczenie spodziewanych wartości prądów zwarciovych. Zwarć w sieci nie można całkowicie wyeliminować, wobec czego system elektroenergetyczny musi być na nie przygotowany. Oznacza to przede wszystkim prawidłowy dobór aparatury łączeniowej oraz prawidłowy dobór przekrojów przewodów i szynoprzewodów. Ponadto wyniki obliczeń zwarciovych mogą zdecydować o wprowadzaniu środków ograniczających wartości prądów zwarciovych, np. sekcjonowanie, instalowanie dławików zwarciovych, stosowanie szybkich wyłączników itp.

Obliczenia zwarciove obejmują szeroki zakres tematywny [1,2,3]. Najważniejszym elementem jest wyznaczenie charakterystycznych wartości dla przebiegu prądu zwarciovego $i(t)$:

- początkowy prąd zwarcia I_k'' – wartość skuteczna składowej okresowej prądu zwarciovego w pierwszej chwili zwarcia,
- ustalony prąd zwarcia I_k ,
- prąd udarowy i_p – największa chwilowa wartość prądu zwarciovego,

Przeprowadzanie obliczeń zwarciovych powinno być zgodne z obowiązującymi normami. W roku 2002 Polski Komitet Normalizacyjny przyjął za obowiązującą w kraju międzynarodową normę IEC 60909:0 [4], dostosowując w ten sposób polskie normy do standardów przyjętych w Unii Europejskiej. W normie zdefiniowane są również podstawowe symbole wielkości zwarciovych, co pozwala na wyeliminowanie niejednoznaczności w dokumentacjach projektowych.

2. WYZNACZANIE I_k'' WG ZALECEŃ NORMY PN-EN 60909

Wyznaczanie wielkości zwarciovych wg zaleceń normy składa się z dwóch etapów. W pierwszym kroku obliczany jest początkowy prąd zwarcia, a następnie jest on przeliczany przy pomocy pomocniczych wskaźników na pozostałe wielkości zwarciove. Do obliczeń norma zaleca stosowanie metody Thevenina. W uproszczeniu polega ona na wstawieniu zastępczego źródła napięciowego pomiędzy miejscem zwarcia a ziemią, oraz na zwarciu wszystkich innych źródeł napięciowych – generatorów [1]. Przy budowanie modelu zwarciovego sieci przyjmuje się następujące założenia:

- pomija się wszystkie gałęzie doziemne,
 - przekładnie transformatorów są równe ich wartościom znamionowym,
 - w czasie trwania zwarcia nie zachodzą żadne zmiany zarówno w sieci, jak i w charakterze zwarcia,
 - przed zwarcie w sieci nie płyną żadne prądy.
- Początkowy prąd zwarcia trójfazowego może być obliczony ze wzoru (1).

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \cdot Z_k} \quad (1)$$

gdzie: c – współczynnik napięciowy przyjęty zgodnie z tabelą 1, U_n – napięcie znamionowe sieci w miejscu zwarcia, Z_k – impedancja zwarciova.

Występująca w równaniu (1) impedancja zwarciova Z_k jest to impedancja sieci widziana z zacisków zastępczego źródła

napięcia wstawionego w miejsce zwarcia. Aby ją wyznaczyć należy dokonać szeregu przekształceń w sieci – połączenia równoległe i szeregowo gałęzi oraz przekształcenia gwiazda-trójkąt. Można również zastosować metodę potencjałów węzłowych.

Tablica 1. Wartości współczynnika napięciowego [4]

Napięcie znamionowe sieci U_n	Współczynnik napięciowy dla obliczeń	
	maksymalnego prądu zwarcia c_{max}	Minimalnego prądu zwarcia c_{min}
sieć nn 100 V – 1000V	1,05 ¹⁾	0,95
	1,10 ²⁾	
sieć SN >1 kV do 35 kV	1,10	1,00
Sieć WN i NN >35 kV		
¹⁾ dla sieci nn o tolerancji +6%, np. dla sieci o podniesionym napięciu z 380 V do 400 V		
²⁾ dla sieci nn o tolerancji +10%		

Zasadnicza różnica pomiędzy normą PN-EN 60909 a wcześniej obowiązującymi standardami polega na korygowaniu impedancji generatorów synchronicznych i transformatorów przez odpowiednie współczynniki poprawkowe. Ich zastosowanie ma na celu zrekompensowanie pewnych założeń upraszczających, takich jak praca generatorów na biegu jałowym czy nieuwzględnianie regulacji przekładni transformatorów. Prostota wzoru (1) oraz metody Thevenina są tak dużymi zaletami, że zdecydowano się na ich pozostawienie, natomiast zmniejszenie błędów obliczeń osiągnięto właśnie poprzez korygowanie impedancji [3].

3. MODELE ELEMENTÓW

3.1. Transformatory 2-uzwojeniowe

Transformatory 2-uzwojeniowe (za wyjątkiem transformatorów blokowych) modelowane są jako szeregowe połączenie reaktancji, rezystancji i przekładni transformatora idealnego. Rezystancja i reaktancja transformatora wyznaczana jest na podstawie próby zwarcia. Dodatkowo są one mnożone przez współczynnik poprawkowy K_T wyznaczany ze wzoru (2).

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T} \quad (2)$$

gdzie: c_{max} – współczynnik napięciowy z tabeli 1 odniesiony do napięcia sieci po stronie dolnej transformatora, x_T – reaktancja transformatora wyrażona w jednostkach względnych, $x_T = u_{x_T} / 100\%$.

3.2. Transformatory 3-uzwojeniowe

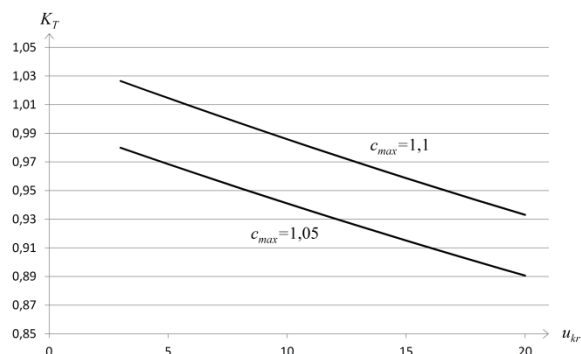
Transformatory trójuzwojeniowe do obliczeń zwarciovych są modelowane w postaci trzech gałęzi połączonych w gwiazdę, a każda z gałęzi odpowiada jednemu z uzwojeń (oznaczonych A, B i C). Wartości impedancji wyznaczane są w podobny sposób jak dla transformatorów dwuuzwojeniowych. Różnica polega na tym, że z wyników próby zwarcia wyznaczane są impedancje par uzwojeń. Następnie, zgodnie z zaleceniami normy, są one korygowane przez współczynniki poprawkowe zdefiniowane wzorami (3a-c).

$$K_{TAB} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAB}} \quad (3a)$$

$$K_{TAC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAC}} \quad (3b)$$

$$K_{TBC} = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TBC}} \quad (3c)$$

gdzie: c_{max} – współczynnik napięciowy z tabeli 1, x_{TAB} , x_{TAC} , x_{TBC} – reaktancje par uzwojeń transformatora wyrażone w jednostkach względnych, $x_{TAB} = u_{x_{TAB}} / 100\%$.



Rys. 1. Wykres wartości współczynnika poprawkowego K_T dla transformatorów w funkcji napięcia zwarcia ukr.

3.3. Generatory

Na potrzeby wyznaczania prądów zwarciovych generatory modelowane są reaktancją podprzejściową pomnożoną przez współczynnik poprawkowy K_G wyznaczony ze wzoru (4). Dotyczy to tylko maszyn przyłączonych bezpośrednio do sieci, natomiast dla generatorów pracujących w bloku z transformatorem norma definiuje inny wzór na współczynnik poprawkowy.

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (4)$$

gdzie: c_{max} – współczynnik napięciowy z tabeli 1, U_{rG} – napięcie znamionowe generatora, U_n – napięcie znamionowe sieci, x_d'' – reaktancja generatora w jednostkach względnych, φ_{rG} – przesunięcie kątowe pomiędzy prądem i napięciem w warunkach pracy znamionowej generatora.

3.4. Blok transformator-generator

Norma zaleca osobne traktowanie bloku generator-transformator. Ponadto odróżnia blok z transformatorem z podobieżeniowym przełącznikiem zaczepów od bloku z transformatorem bez takiego przełącznika lub z wyłączoną regulacją. W pierwszym przypadku obie impedancje, generatora i transformatora, powinny być przemnożone przez współczynnik korygujący K_S zdefiniowany wzorem (5a), w drugim przez współczynnik definiowany wzorem (5b).

$$K_S = \frac{U_{nQ}^2}{U_{rG}^2} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{U_{rTHV}^2} \cdot \frac{c_{max}}{1 + |x_d'' - x_T''| \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (5a)$$

$$K_{SO} = \frac{U_{nQ}}{U_{rG}(1 + p_G)} \cdot \frac{U_{rTLV}}{U_{rTHV}} \cdot (1 \pm p_T) \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (5b)$$

gdzie: c_{max} – współczynnik napięciowy z tablicy 1, U_{rG} – napięcie znamionowe generatora, U_{nQ} – napięcie znamionowe sieci, x_d'' – reaktancja generatora w jednostkach względnych, φ_{rG} – przesunięcie kątowe pomiędzy prądem i napięciem w warunkach pracy znamionowej generatora, $1+p_G$ – współczynnik zwiększający U_{rG} do napięcia obecnego w sposób ciągły na zaciskach generatora, $1+p_T$ – współczynnik uwzględniający zmianę przekładni transformatora blokowego przez przełącznik zaczepów ustawiony na stałe na jednej pozycji, pozostałe jak we wzorze (4)

3.5. Zwarcie wewnątrz bloku generator-transformator z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepów

Szczególnym przypadkiem jest wyznaczanie prądów podczas zwarcia pomiędzy generatorem a transformatorem blokowym. W przypadku wyznaczania udziałów w prądzie zwarciovym impedancja generatora jest korygowana współczynnikiem określonym wzorem (6a), natomiast impedancja transformatora współczynnikiem z równania (6b).

$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (6a)$$

$$K_{T,S} = 1 \quad (6b)$$

gdzie: $K_{G,S}$ – współczynnik korygujący impedancję generatora, $K_{T,S}$ – współczynnik korygujący impedancję transformatora, pozostałe jak we wzorze (4a-b)

Na potrzeby wyznaczania całkowitego prądu zwarciovego lub sumy udziałów do generatora i transformatora, np. płynącego przez uzwojenie HV transformatora potrzeb własnych, impedancje elementów są korygowane współczynnikami określonymi wzorami (7a) i (7b).

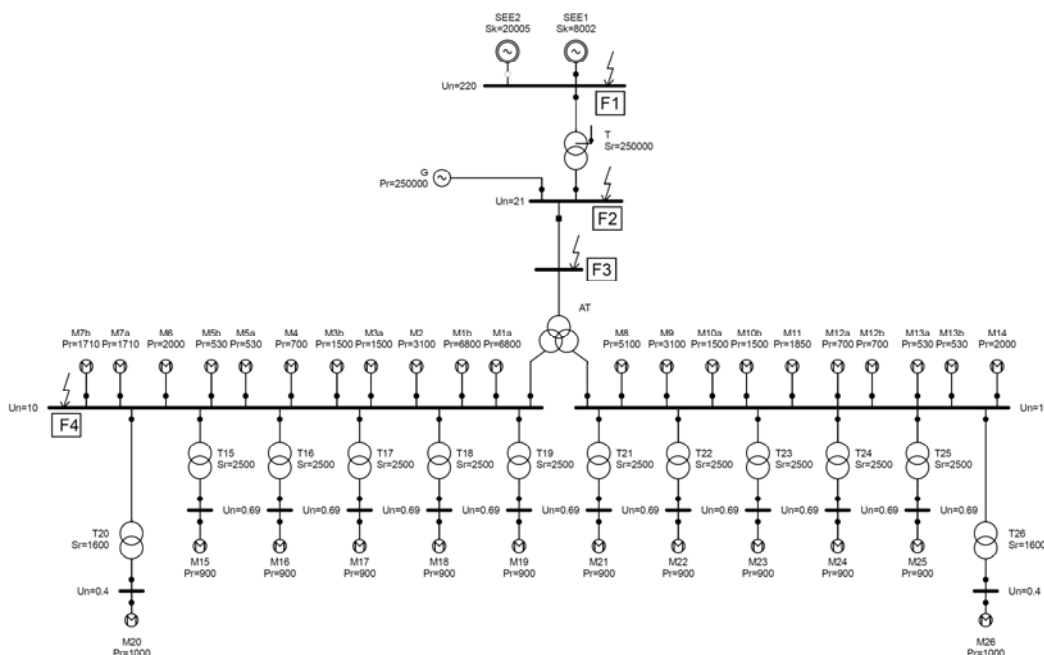
$$K_{G,S} = \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (7a)$$

$$K_{T,S} = \frac{c_{max}}{1 - x_T \cdot \sin \varphi_{rG}} \quad (7b)$$

gdzie: $K_{G,S}$ – współczynnik korygujący impedancję generatora, $K_{T,S}$ – współczynnik korygujący impedancję transformatora, pozostałe jak we wzorze (4a-b)

4. SIEĆ TESTOWA

Raport techniczny IEC/TR 60909-4 [5] wchodzący w skład normy zawiera zbiór przykładów wraz z rozwiązaniami ilustrującymi metodę wyznaczania wielkości zwarciovych. Jedną z opisanych tam sieci testowych została przedstawiona na rysunku 2. Dokładne parametry wszystkich elementów wchodzących w skład tej sieci można odnaleźć we wspomnianym dokumencie. Obliczenia zostały wykonane w programie PlansSN.



Rys. 2. Testowa sieć SN zamodelowana w programie PlansSN

5. WYNIKI OBLICZEŃ

Wyniki obliczeń prądów zwarciovych w poszczególnych węzłach sieci testowej zawiera tablica 2. W przypadku zwarcia w punkcie F1 (bez silników indukcyjnych) uwzględnienie współczynników spowodowało wzrost udziału prądu zwarcia pochodzący od bloku generator-transformator o prawie 10%. Dla zwarcia w sieci potrzeb

własnych udział od generatora i od systemu (poprzez transformator blokowy) jest z kolei mniejszy o około 8% dla punktu F3 i o blisko 2% dla F4.

Tablica 2. Wyniki obliczeń dla testowej sieci SN. Wartości prądu w [A].

Wielkość	PN-EN 60909	Modele bez wsp. koryg.	Różnica
Zwarcie w F1 (bez silników)			
I_k''	23 064	22 884	0,8%
I_{kT}''	2 076	1 895	9,6%
Zwarcie w F1 (z udziałem silników)			
I_k''	23 200	23 021	0,8%
I_{kT}''	2 211	2 030	8,9%
Zwarcie w F2 (udziały)			
I_{kG}''	44 731	44 473	0,6%
I_{kT}''	46 811	46 811	0,0%
Zwarcie w F3			
I_k''	90 100	97 663	-7,7%
I_{kG+T}''	83 781	91 281	-8,2%
I_{kAT}''	6 360	6 423	-1,0%
Zwarcie w F4			
I_k''	28 706	28 853	-0,5%
I_{kAT}''	18 404	18 552	-0,8%
$I_{kAT(HV)}''$	8 647	8 816	-1,9%
$I_{kAT(TV)}''$	1 119	927	20,7%
$I_{kT15}'' \dots, I_{kT19}''$	381	382	-0,3%
I_{kT20}''	383	379	1,1%
I_{kM1}''	1 989	1 989	0,0%

Praca silników podczas analizy zwarcia w węźle F1 powoduje wzrost udziału pochodzącego od bloku generator-transformator o 7%. Ponieważ jednak za wartość prądu zwarcia w punkcie F1 odpowiada przede wszystkim moc zwarcia zastępczego systemu elektroenergetycznego, dlatego wpływ silników na całkowity prąd zwarcia jest znikomy i wynosi 0,6%.

Suma udziałów prądowych pochodzących od generatora I_{kG}'' i transformatora blokowego I_{kT}'' wyznaczona przy analizie zwarcia w węźle F2 wynosi 91 542 A. Obliczony przy rozpatrywaniu zwarcia w punkcie F3 łączny udział od generatora i od systemu jest znacznie mniejszy i wynosi 83 781 A. Różnica wynika z przyjmowania różnych współ-

czynników poprawkowych dla tych dwóch przypadków, co jest zalecane przez normę.

6. WNIOSKI

Wyznaczanie prądów zwarciovych jest istotne przy projektowaniu i eksploatacji systemu elektroenergetycznego. Sposób prowadzenia obliczeń powinien być zgodny z zaleceniami obowiązującej normy PN-EN 60909. O ile wykorzystywana przy tej okazji metoda Thevenina wraz z metodą potencjałów węzłowych jest znana i wykorzystywana od lat, o tyle wprowadzone współczynniki korygujących stanowią istotną zmianę.

Zamieszczone wyniki analizy zwarciovowej dla sieci testowej pokazują, że wprowadzone współczynniki korygujące mają znaczny wpływ na otrzymywane wartości. W największym stopniu dotyczy to udziałów pochodzących od transformatorów i generatorów. Wraz z oddalaniem się od stacji zasilających, w szczególności w sieciach promieniowych, udział transformatorów w impedancji zwarciovowej Z_{kk} maleje, a zwiększa się udział pochodzący od przewodów i kabli. Ponieważ impedancje linii nie są korygowane współczynnikami, to wartości prądów zwarciovych wyznaczonych wg zaleceń nowej jak i poprzednich norm będą w takim przypadku w większym stopniu zbieżne.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Kujaszczyk S. I inni: Elektroenergetyczne układy przesyłowe, Warszawa, WNT 1997, s. 193-217, ISBN 83-204-1857-7.
2. Barnaś K. I inni: Laboratorium podstaw elektroenergetyki, Warszawa, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2003, s. 115-129, ISBN 83-7207-427-5
3. Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, Warszawa, WNT 2002, ISBN 83-204-2750-9.
4. PN-EN 60909-0:2002 Prądy zwarciovowe w sieciach trójfazowych prądu przemiennego - Część 0: Obliczanie prądów.
5. IEC/TR 60909-4: Short-circuit currents in three-phase a.c. systems - Part 4: Examples for the calculation of short-circuit currents, 2000-07.

CALCULATION OF INITIAL SHORT-CIRCUIT CURRENTS IN MEDIUM VOLTAGE NETWORKS ACORDING TO THE STANDARD PN-EN 60909 – CONFERENCE PAPER

Key-words: short-circuit calculations, initial short-circuit current, electrical equipment models

Determining the short-circuit currents is usually conducted network analyzes. An important feature of this calculation is carried out according to the recommendations of the standard PN EN 60909. This paper describes the models of the basic elements of the network with the method of determining the impedance parameters including correction factors introduced by the standard. Thevenin method connected with nodal method are presented and used to determine the initial short-circuit for the example medium voltage network. Results are compared with the ones obtained without taking into account the correction factors.