

XIX Seminarium

ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICE' 2009

Oddział Gdański PTETiS

Referat nr 9

BADANIE WPŁYWU WARUNKÓW ZWARCIOWYCH NA DOBÓR ELEMENTÓW SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Artur GANCARZ¹, Wojciech WALAT²

1. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,
tel:012 617 37 60 fax: 012 634 57 21 e-mail: einstein@agh.edu.pl
2. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki,
tel: 012 617 37 60 fax: 012 634 57 21 e-mail: wwalat@agh.edu.pl

Streszczenie: W publikacji przedstawiono wpływ warunków zwarciovych na pracę sieci przemysłowych. W szczególności uwzględniono sytuację, w której dochodzi do zmiany mocy zwarciovowej lub struktury sieci odbiorczej. W badaniach podjęto próbę wykazania, że szczegółowe uwzględnienie stopnia obciążenia elementów sieci może wpłynąć na ograniczenie nakładów finansowych na jej modernizację.

Słowa kluczowe: sieci rozdzielcze, warunki zwarciovowe, wytrzymałość zwarciovowa

1. WPROWADZENIE

Pracujące obecnie sieci przemysłowe optymalizowane były pod kątem kosztów eksploatacji. Przyrost mocy zwarciovych powoduje konieczność modernizacji sieci, gdyż kryterium obciążalności prądem zwarciovym może stać się dominującym. Ujemny wpływ na warunki pracy mają również napędy dużych mocy.

2. GENEZA PROBLEMU

Celem analizy było sprawdzenie wpływu wyżej wymienionych czynników na konieczność modernizacji przemysłowej sieci rozdzielczej. Przy pomocy aplikacji komputerowej obliczono prądy zwarciovowe w wybranych punktach sieci. Następnie badano wpływ wielkości dopuszczalnego natężenia prądu cieplnego na dobór elementów sieci ze szczególnym uwzględnieniem warunków początkowych (stopnia obciążenia).

3. TEORETYCZNE PODSTAWY OBLICZEŃ

3.1. Dobór przekroju przewodów

W obiektach przemysłowych przekroje przewodów dobierane są z uwzględnieniem warunków obciążalności prądami roboczymi oraz zwarciovymi, przy czym zwykle decydującym jest kryterium obciążalności zwarciovowej. Przekrój ustalany jest dla największych dopuszczalnych temperatur wg zależności (1), tj. dla temperatury dopuszczalnej długotrwałe dla danego typu izolacji, nie

prowadzącej do uszkodzenia cieplnego. Zakłada się, że obciążenie maksymalne utrzymuje się przez wystarczająco długi czas dla osiągnięcia temperatury granicznej.

$$s_{\min} = \frac{I_{th} \cdot \sqrt{T_k}}{j_{1-sek}} \quad (1)$$

$$j_{1-sek} = \frac{K}{\sqrt{I_s}} \quad (2)$$

gdzie: s_{\min} – obliczony przekrój minimalny, I_{th} – cieplny prąd zwarcia, T_k – czas trwania zwarcia, j_{1-sek} – dopuszczalna jednosekundowa gęstość prądu zwarciovego zależna od materiału żył i izolacji, K – współczynnik dobierany z tablicy 1.

Tablica 1. Współczynnik K dla różnych typów kabli [1]

K	Typ przewodu
135	przewody Cu z izolacją z polietylenu usieciowanego
115	przewody Cu z izolacją z PVC
87	przewody Al z izolacją z polietylenu usieciowanego
74	przewody Al z izolacją z PVC

Do wyznaczenia podanej w zależności (1) wielkości prądu cieplnego konieczne jest obliczenie wartości prądu zwarciovego początkowego I_k'' . Wielkość tego prądu powinno wyznaczać się dla wszystkich możliwych rodzajów zwarc, tj.: trójfazowego, dwufazowego z udziałem i bez udziału ziemi, jednofazowego (doziemnego). W praktyce stwierdzono, że największe wielkości prądów zwarcia w sieciach rozdzielczych występują dla zwarc trójfazowych, co pozwala na ograniczenie zakresu analizy.

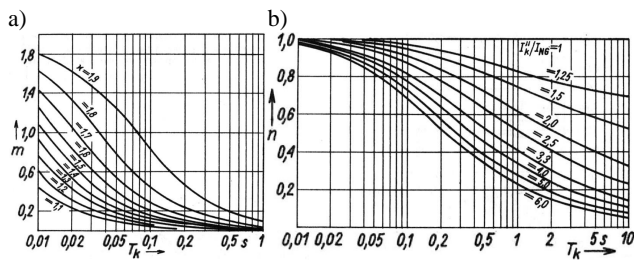
$$I_k'' = \frac{c \cdot U_N}{\sqrt{3} \cdot Z_{Z1}} \quad (3)$$

gdzie: U_N – napięcie nominalne sieci, Z_{Z1} – moduł zastępczej impedancji pętli zwarcia dla składowej kolejności zgodnej, c – współczynnik napięciowy (przyjęto $c=1,1$).

W dalszej kolejności wyznacza się prąd cieplny:

$$I_{th} = \sqrt{m+n} \cdot I_k'' \quad (4)$$

gdzie: m, n – współczynniki uwzględniające udział składowych okresowej i nieokresowej prądu zwarciovego, odczytywane z wykresów (rysunek 1a i 1b) lub, dla potrzeb obliczeń numerycznych, obliczone z zależności 5 [2] (przyjęto współczynnik $n = 1$ dla zwarć w sieciach rozdzielczych).



Rys. 1. Wartości współczynników [3]: a) m – związanego ze składową okresową prądu zwarciovego, b) n – związanego ze składową nieokresową prądu zwarciovego

$$m = \frac{e^{4 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\chi - 1)} - 1}{2 \cdot f \cdot T_k \cdot \ln(\chi - 1)} \quad (5)$$

gdzie: f – częstotliwość napięcia sieci, χ – współczynnik udaru, podany w normie [2] zależnością:

$$\chi = 1,02 + 0,98 \cdot e^{\frac{3 \cdot R_{Z1}}{X_{Z1}}} \quad (6)$$

gdzie: R_{Z1}, X_{Z1} – odpowiednio rezystancja i reaktancja pętli zwarcia dla składowej symetrycznej kolejności zgodnej.

3.2. Wpływ pracy napędów na parametry zwarciovowe

W sieciach przemysłowych, oprócz prądu zwarciovego płynącego od strony sieci zasilającej, należy uwzględnić prąd pochodzący od napędów elektrycznych „ I_{KM} ”. Jego wielkość oblicza się przy znajomości szeregowo połączonych impedancji pomiędzy silnikiem (grupą silników) a miejscem zwarcia oraz impedancji wewnętrznej maszyny Z_{ZM} :

$$Z_{ZM} = \frac{U_N^2}{I_{LR}/I_{NM} \cdot S_{NM}} \quad (7)$$

gdzie: I_{LR}/I_{NM} – krotność prądu rozruchowego silnika zastępczego, S_{NM} – suma mocy znamionowych silników z danej grupy (silnik zastępczy tworzy się łącząc grupę silników o zbliżonych parametrach w obrębie jednego budynku).

Dalsze obliczenia wykonuje się identycznie jak przy zwarciu w sieciach pozbawionych napędów, korzystając z zależności (1)-(6). Opracowana aplikacja komputerowa obliczała współczynnik udaru χ uwzględniając zastępczą wypadkową impedancję obwodu zwarciovego.

3.3. Wpływ temperatury przewodu w chwili zwarcia

Prąd elektryczny przepływając przez przewód wydziela ciepło. Każdy przewód ma pewną wytrzymałość cieplną. Producenci, w zależności od typu izolacji, podają graniczne temperatury dopuszczalne podczas zwarcia, które nie powodują degradacji izolacji. Do osiągnięcia temperatury granicznej konieczne jest dostarczenie pewnej ilości energii. Zwykle obliczeń dokonuje się przy

założeniu, że przewód przed zwarciem osiągnął temperaturę równą dopuszczalnej długotrwałe.

W rzeczywistości przewody nie osiągają tak wysokich temperatur, co wynika ze stopnia ich obciążenia (prąd roboczy jest zwykle mniejszy od dopuszczalnego długotrwałe). Pozwala to na dopuszczenie przepływu większych prądów zwarciovych bez zwiększenia narażeń dla izolacji. Bilans cieplny przewodu elektrycznego opisano równaniem (8), a przy założeniu jednorodności materiałów i warunków chłodzenia na całej długości przewodu można go zapisać w postaci różniczkowej uwzględniając współczynniki materiałowe (równanie (9)).

$$Q_w = Q_c + Q_k \quad (8)$$

gdzie: Q_w – ciepło wydzielone przy przepływie prądu elektrycznego, Q_c – ciepło zakumulowane w przewodzie (od niego pochodzi wzrost temperatury), Q_k – ciepło oddane do otoczenia (konwekcja).

$$k_d \cdot \frac{I^2 \cdot \rho \cdot l}{A} dt = A \cdot l \cdot c \cdot d\vartheta + \alpha \cdot S \cdot l \cdot (\vartheta - \vartheta_a) dt \quad (9)$$

gdzie: I – wartość skuteczna prądu, ρ – rezystywność żyły, l – długość żyły, A – przekrój żyły, S – powierzchnia zewnętrzna jednego metra żyły, c – ciepło właściwe żyły (AL), α – współczynnik przyjmowania ciepła, ϑ, ϑ_a – odpowiednio temperatura przewodu i otoczenia, k_d – współczynnik strat dodatkowych (naskórkowość).

Dzieląc przez $A \cdot l \cdot c$ oraz przyjmując $T = \frac{c \cdot a}{\alpha \cdot s}$ otrzymano:

$$\frac{d\vartheta}{dt} + \frac{1}{T}(\vartheta - \vartheta_a) = \frac{1}{T} \cdot \frac{k_d \cdot \rho}{\alpha \cdot S \cdot A} I^2 \quad (10)$$

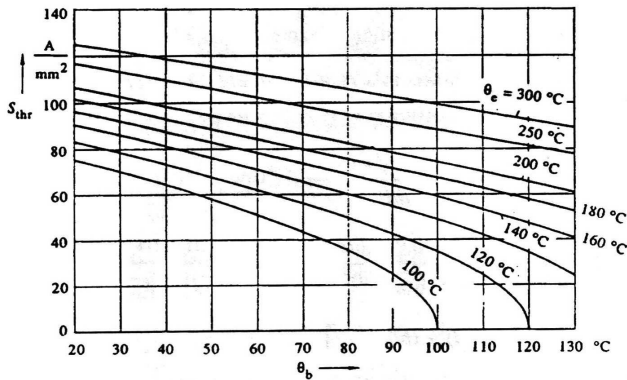
Przy ustalonej temperaturze wzór (10) przyjmuje postać:

$$\vartheta = \frac{k_d \cdot \rho}{\alpha \cdot S \cdot A} I^2 + \vartheta_a \quad (11)$$

Podstawiając do równania (11) znane temperatury, przy wartości prądu dopuszczalnego długotrwałe i normalnych warunkach ułożenia (20°C), uzyskuje się wartość współczynnika $(k_d \cdot \rho) / (\alpha \cdot s \cdot A)$. Następnie możliwe jest wyznaczenie temperatury przewodu dla dowolnego prądu obciążenia $I_{r \max}$, co umożliwi wyznaczenie dopuszczalnej gęstości prądu zwarciovego $j_{l \cdot sek}$ (w angielskiej literaturze s_{thr}) z rysunku 2, tabel [3] lub zależności (2) i (12) [2]:

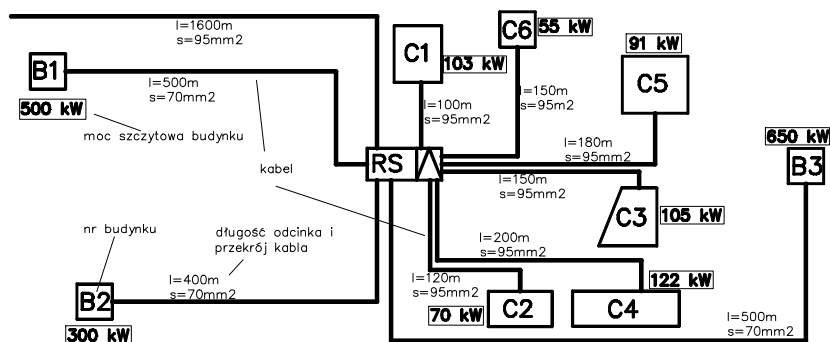
$$K = \sqrt{\frac{\rho_{20} \cdot c \cdot g_{Al}}{\alpha_{20}} \cdot \ln \left(\frac{1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta_e - 20^\circ\text{C})}{1 + \alpha_{20} \cdot (\Theta_b - 20^\circ\text{C})} \right)} \quad (12)$$

gdzie: α_{20} – współczynnik temperaturowej zmiany wartości rezystywności, ρ_{20} – rezystywność dla temperatury 20°C , g_{Al} – ciężar właściwy aluminiowego przewodu, Θ_e – dopuszczalna temperatura przewodu przy zwarciu, Θ_b – temperatura przewodu w chwili zwarcia (podgrzanego prądem roboczym).



Rys. 2. Dopuszczalne gęstości prądu zwarciovego dla różnych warunków temperaturowych [2]

Z zależności (12) wynika, że przy wzroście mocy zwarciovych lub montażu dodatkowych napędów



Rys. 3. Schemat połączeń przykładowej sieci przemysłowej oraz podstawowe dane o sieci i odbiorach

Tablica 2. Zestawienie odbiorów w przykładowej sieci

Budynek	U_N	l	$P_s^{*)}$	$I_{r\ max}$
	kV			
RS	6	1600	1996	206,9
B1	6	500	500	51,8
B2	6	400	300	31,1
B3	6	500	650	67,4
C1	0,4	100	103	160,1
C2	0,4	120	70	108,8
C3	0,4	150	105	163,2
C4	0,4	200	122	189,7
C5	0,4	180	91	141,5
C6	0,4	150	55	85,5

*) P_s - moc zapotrzebowana w szczycie obciążenia

4.2. Obliczenia zwarciovie dla istniejącej sieci

Korzystając z zależności (1), (3) oraz (4) i danych z tablicy 2 obliczono minimalne wymagane przekroje żył kabli s_{min} ze względu na prąd dopuszczalny długotrwale I_{dd} i zwarciovą ciepłą I_{th} oraz zestawiono z rzeczywistymi przekrojami $s_{rzecz.}$ w istniejącej sieci. Wyniki zamieszczono w tablicy 3.

4.3. Uwzględnienie nowoinstalowanych napędów

Wskutek montażu nowych napędów moc szczytowa grupy silników P_{SM} w budynku C2 wzrosła o 30 kW przy zachowaniu wartości współczynnika mocy $\cos \phi_M$. Obliczenia wykonano ponownie, a ich wyniki zestawiono w tablicy 4 (wyfłuszczone wielkości nie spełniające warunków technicznych).

przeprowadzenie bardziej szczegółowych analiz, umożliwia ograniczenie kosztów modernizacji sieci.

4. PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

4.1. Opis obiektu

Obliczenia wykonano dla fragmentu przykładowej sieci zakładu przemysłowego. Zasilana jest ona z GPZ kablem SN 6 kV do Rozdzielni Sieciowej (RS) średniego napięcia. W RS usytuowany jest również transformator SN/nn o mocy 630 kVA. Do obliczeń przyjęto moc zwarciovą na szynach GPZ równą 100 MVA. Zakład składa się z 3 oddziałów produkcyjnych zasilanych na napięciu 6 kV oraz 6 oddziałów zasilanych niskim napięciem. Zestawienie danych opisujących sieć zamieszczono w tablicy 2 i na rysunku 3.

Tablica 3. Zestawienie obliczeń dla maksymalnych obciążeń i maksymalnych temperatur

Bu-dy-nek	Kryt. I_{dd}		Kryterium I_{th} bez udziału napędów						$S_{rzecz.}$
	s_{min}	I_{dd}	I_k	T_k	χ	m	I_{th}	s_{min}	
	mm ²	A	A	s	-	-	A	mm ²	
RS	95	220	9623	0,5	1,746	0,068	9946	80,2	95
B1	10	60	4594	0,3	1,098	0,014	4627	28,9	70
B2	10	60	4594	0,3	1,098	0,014	4627	28,9	70
B3	16	78	4594	0,3	1,098	0,014	4627	28,9	70
C1	50	165	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95
C2	25	110	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95
C3	50	165	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95
C4	70	205	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95
C5	50	165	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95
C6	25	110	13712	0,2	1,435	0,060	14118	84,3	95

Tablica 4. Zestawienie obliczeń dla dodatkowych napędów

Bu-dy-nek	Parametry silników zastępczych				Kryterium I_{th}	
	P_{SM}	$\cos \phi_M$	I_{LR}/I_{NM}	I_{KM}	I_{th}	s_{min}
	kW	mm ²	A	A	A	mm ²
RS	-	-	-	-	9946	80,2
B1	325,0	0,80	5,1	219,3	5024	31,4
B2	183,0	0,75	3,8	98,1	5139	32,1
B3	286,0	0,78	4,7	182,4	5058	31,6
C1	30,9	0,62	3,9	308,6	15851	94,7
C2	44,7	0,67	4,5	476,7	15729	93,9
C3	45,2	0,68	3,1	326,8	15853	94,7
C4	54,9	0,79	4,8	529,6	15760	94,1
C5	20,9	0,72	3,3	152,3	16000	95,5
C6	29,7	0,63	4,9	366,8	15812	94,4

4.4. Uwzględnienie wzrostu mocy zwarciowej

Wskutek modernizacji i zmiany połączeń w sieci nadrzędnej 110 kV zmianie uległa moc zwarciowa S_k na szynach SN w GPZ do 120 MVA. Dla takiego układu wykonano ponownie obliczenia i zestawiono w tablicy 5.

Tablica 5. Zestawienie obliczeń dla zwiększonej mocy zwarciowej

Bud- dy- nek	Impedancja pętli zwarcia [Ω] dla S_k		Parametry silników zastępczych		Kryterium I_{th} z napędami	
	100 MVA	120 MVA	P_{SM} kW	I_{KM} A	I_{th} A	S_{min} mm ²
RS	0,396	0,330	-	-	11 935	96,2
B1	0,829	0,776	325,0	219,3	5 326	33,3
B2	0,829	0,776	183,0	98,1	5 443	34,0
B3	0,829	0,776	286,0	182,4	5 361	33,5
C1	0,019	0,018	30,9	308,6	15 782	94,2
C2	0,019	0,018	14,7	156,8	15 920	95,1
C3	0,019	0,018	45,2	326,8	15 784	94,3
C4	0,019	0,018	54,9	529,6	15 692	93,7
C5	0,019	0,018	20,9	152,3	15 931	95,1
C6	0,019	0,018	29,7	366,8	15 743	94,0

4.5. Uwzględnienie obydwu zmian w układzie

W przypadku, gdy w/w zmiany nastąpią jednocześnie, sytuacja w sieci zakładu przemysłowego znacznie się pogarsza, co przedstawiono w tablicy 6.

Tablica 6. Zestawienie obliczeń i doboru kabli dla zwiększonej mocy zwarciowej i przy zwiększonej mocy napędów

Bud- dy- nek	Montaż nowych napędów		Wzrost mocy zwarciowej		Superpozycja	
	I_{th} A	S_{min} mm ²	I_{th} A	S_{min} mm ²	I_{th} A	S_{min} mm ²
RS	9946	80,2	11 935	96,2	11 935	96,2
B1	5024	31,4	5 326	33,3	5 343	33,4
B2	5139	32,1	5 443	34,0	5 459	34,1
B3	5058	31,6	5 361	33,5	5 377	33,6
C1	15851	94,7	15 782	94,2	16 041	95,8
C2	15729	93,9	15 920	95,1	15 920	95,1
C3	15853	94,7	15 784	94,3	16 044	95,8
C4	15760	94,1	15 692	93,7	15 950	95,2
C5	16000	95,5	15 931	95,1	16 191	96,7
C6	15812	94,4	15 743	94,0	16 002	95,6

4.6. Uwzględnienie wpływu początkowych warunków zwarciowych

Przy znajomości stopnia obciążenia przewodów (prąd roboczy) można obliczyć temperaturę początkową w chwili zwarcia z zależności (11). Jest to podstawą do

obliczenia współczynnika K ze wzoru (12), do wyznaczenia minimalnego wymaganego przekroju przewodu. W tablicy 7 zestawiono wyniki obliczeń dla rzeczywistych temperatur w chwili wystąpienia zwarcia.

Tablica 7. Zestawienie obliczeń i doboru kabli dla maksymalnej dopuszczalnej temperatury V_{dop} i rzeczywistej temperatury początkowej V_{pocz} w chwili wystąpienia zwarcia

Bud- dy- nek	$S_{rzecz.}$ mm ²	S_{min} z kryte- rium I_{dd} mm ²	S_{min} z kryte- rium I_{th} mm ²	Kryterium I_{th} z uwzględnieniem wstępnej temperatury przewodów			
				$I_{r max}$ %	J_{1-sek} dla V_{dop} A/mm ²	J_{1-sek} dla V_{pocz} A/mm ²	S_{min} mm ²
RS	95	95	96,2	95,4	87	89,5	<u>94,3</u>
B1	70	10	33,4	28,8	87	106,0	<u>27,6</u>
B2	70	10	34,1	17,3	87	107,1	<u>27,9</u>
B3	70	16	33,6	37,4	87	104,9	<u>28,1</u>
C1	95	50	95,8	66,7	74	87,7	<u>81,8</u>
C2	95	25	95,1	64,8	74	88,2	<u>80,7</u>
C3	95	50	95,8	68,0	74	87,3	<u>82,2</u>
C4	95a	70	95,2	79,0	74	83,6	<u>85,3</u>
C5	95	50	96,7	58,9	74	89,8	<u>80,6</u>
C6	95	25	95,6	35,6	74	94,7	<u>75,6</u>

5. Wnioski

Pomijanie prądów zwarciowych pochodzących od napędów elektrycznych przy doborze przekroju przewodów może prowadzić do ich uszkodzeń cieplnych.

Wyznaczenie początkowego obciążenia kabli i ich temperatury w chwili wystąpienia zwarcia wymaga zwiększenia nakładów obliczeniowych.

Uwzględnienie temperatury początkowej w chwili wystąpienia zwarcia ma znaczący wpływ na dopuszczalne wielkości cieplnych prądów zwarciowych, poprzez powiększenie dopuszczalnej gęstości prądu zwarciowego.

Uwzględnienie w/w czynników może prowadzić do znaczących oszczędności przy ewentualnej modernizacji istniejących sieci.

6. BIBLIOGRAFIA

1. Niestępski S., Parol M. i inni: Instalacje elektryczne, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001, s. 266, ISBN 83-7207-251-5
2. Polska Norma PN-EN 60865-1:2002 : Obliczanie skutków prądów zwarciowych – Część 1: Definicje i metody obliczania
3. Praca zbiorowa: Poradnik inżyniera elektryka T.3, s.74, 234, WNT 1997, ISBN 83-204-2131-4

THE INFLUENCE OF SHORT-CIRCUIT CONDITIONS FOR CHOOSING ELEMENTS OF POWER NETWORK

Key-words: distribution networks, short-circuit conditions, short-circuit strength

The paper presents the influence of short-circuit conditions on industrial power networks. It mainly includes the problem of changing short-circuit power or the structure of power network. The attempt was taken to prove that including load range of power network may result in decreasing total costs of modernization.