Seria: ELEKTRYKA 176

Nr kol. 1500

Kazimierz ZAKRZEWSKI¹⁾, Bronisław TOMCZUK²⁾, Dariusz KOTERAS³⁾

WPŁYW POŁOŻENIA OBSZARU USZKODZENIA NA POLE MAGNETYCZNE I SIŁY PODCZAS SZCZEGÓLNEGO ZWARCIA AUTOTRANSFORMATORA

Streszczenie. W artykule opisano szczególny przypadek zwarcia łukowego w autotransformatorze dużej mocy, które spowodowało przeniesienie prądu łuku na ograniczonym odcinku przez jeden z przewodów (tzw. bliźniak) dolnej cewki uzwojenia wysokiego napięcia. Określono domniemane gęstości prądu, które mogą wystąpić w przekrojach uzwojeń wysokiego napięcia HV (szeregowego) i średniego napięcia MV (wspólnego) oraz w zaatakowanym przewodzie i odwzorowano reprezentatywny fragment autotransformatora metodą elementów skończonych za pomocą pakielu obliczeniowego OPERA 3D. Obliczono rozkład pola magnetycznego i siły działające na zaatakowany przewód. Określono naprężenia, które wywołują pochylenie przewodów pod wpływem sił osiowych oraz naprężenia zginające spowdowane siłami osiowymi i promieniowymi. Obliczenia wskazują jednoznacznie na pewność uszkodzenia uzwojenia autotransformatora, niezależnie czy miejsce awarii znajduje się w płaszczyźnie tzw. przekroju bocznego czy też głównego.

INFLUENCE OF DAMAGED AREA POSITION ON MAGNETIC FIELD AND FORCES DURING AUTOTRANSFORMER SPECIAL SHORT - CIRCUIT

Summary: The special case of an arc short-circuit in a power autotransformer is described. The arc conducted the current through a limited segment of the double wire (so-called twin) of the lower coil in the HV winding. The expected current densities, which may occur in HV (series) and MV (common) windings and in attacked wire, are specified. The representative autotransformer part is modelled using the finite element method with the help of the Opera3D package. The magnetic field distribution and the forces acting on the conductor attacked by arc are calculated. The stresses acting under pressure of the axial forces which cause the slope of the wires are determined. The bending stresses produced by the axial and radial forces are calculated as well. Irrespective of the fault place it is known for sure that the transformer will be damaged. Calculation of electrodynamic forces is very important because it is nearly impossible to examine them experimentally. The simulation results confirm the deformations of some wires, which were observed after the real fault of the winding part in an autotransformer. The wires can be bent under the influence of the electrodynamic forces.

1. WSTĘP

Obliczenia zwarciowe, w celu sprawdzenia wytrzymałości uzwojeń transformatorów i autotransformatorów największych mocy mają bardzo duże znaczenie praktyczne, gdyż zastępują próby zwarciowe, niemożliwe do wykonania w praktyce w przypadku jednostek o bardzo dużych mocach. Obliczenia sił i naprężeń osiągnęły wysoki poziom udokładnienia spowodowany techniką obliczeń numerycznych. Uwzględnia się złożoną i wielowarstwową budowę uzwojeń, trójwymiarowy charakter objektu, wprowadza się zbliżone do rzeczywistych parametry materiałowe itp. [5].

Daleko została posunięta symulacja drgań uzwojeń z możliwością odtworzenia charakteru odkształceń. Powstały wyspecjalizowane programy do analizy przebiegów dynamicznych z możliwością wyeksponowania trwałych odkształceń, którym mogą podlegać uzwojenia. W tej pracy dokonano próby odwzorowania specyficznego stanu zwarcia powstałego podczas eksploatacji w obiekcie rzeczywistym, które doprowadziło do zniszczenia jedynie ograniczonego obszaru uzwojenia szeregowego HV na jednej kolumnie. Zniszczenie to było na tyle skuteczne, że spowodowało konieczność naprawy autotransformatora.

¹⁾ Profesor, Instytut Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej, ul. Stefanowskiego 18/22 Łódź, tel (042) 6312581, fax (042) 6362309, e –mail: <u>zakrzew@ck-sg.p.lodz.pl</u>

²⁾ Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Politechnika Opolska, ul. Luboszycka 7, 45-036 Opole, tel .(077)4538447 w, 334, fax (077) 4538447, dr hab. inż. prof. Pol., Opol. e-mail: tomczuk@po.opole.pl

³⁾ Mgr inz., e-mail: dk@po.opole.pl

Do odwzorowania pola elektromagnetycznego podczas awarii postanowiono wykorzystać pakiet TOSCA komercyjnego oprogramowania OPERA 3D produkcji firmy Vector Fields [7]. Rozpowszechnienie tego oprogramowania w Polsce jest na tyle duże, że zbadanie możliwości jego wykorzystania do symulacji skutków awarii jest zdaniem autorów w pełni uzasadnione.

Model obwodowy zwarcia autotransformatora, przy założeniu że strona średniego napięcia MV jest otwarta.



- Rys. 1. Schemat połączeń uzwojeń wysokiego napięcia HV i średniego napięcia MV ze wskazaniem miejsca zwarcia łukowego do ziemi.
- Fig. 1. Diagram of connecticons of the HV and MV windings with depicting short-circuit place

2. DANE DO ZAMODELOWANIA SKUTKÓW AWARII

2.1. Topografia przewodów dolnych cewek uzwojenia szeregowego

Schemat połączeń strony wysokiego napięcia HV (uzwojenia szeregowego) oraz uzwojenia średniego napięcia MV (uzwojenia wspólnego) autotransformatora (z pominięciem uzwojeń regulacyjnego i niskiego napięcia) przedstawiono na rys. 1. Nie wnikając w powód powstania zwarcia łukowego do ziemi stwierdzono, że łuk ten przedostał się na dolną cewkę uzwojenia wywrotkowego o łącznej liczbie 26 zwojów szeregowych nawijanych dwoma przewodami (tzw. bliźniakami) równolegle. Na rys. 2 przedstawiono schemat rozmieszczenia przewodów w dwucewce wraz z połączeniami elektrycznymi do ekranu potencjalnego i przepustu średniego napięcia MV.



Rys. 2. Schemat połączeń elektrycznych w obszarze dolnej połowy uzwojenia szeregowego Fig. 2. Diagram of electrical connections in lower half of the series winding

Można przypuścić, że łuk od uziemionej konstrukcji rdzenia transformatora przeniósł się na boczną powierzchnię dolnej cewki poprzez izolację przewodu (bliźniaka) znajdującego się na zewnątrz uzwojenia.





Z topografii przewodów i miejsca domniemanego wejścia łuku do uzwojenia szeregowego HV wynika, że zaatakowanym przewodem (bliźniakiem) jest przewód oznaczony numerem 12', który uległ przerwaniu wskutek awarii obnażając bliźniak oznaczony numerem 12.

Bliskie sąsiedztwo bliźniaka 12' i 26 spowodowało najprawdopodobniej przejście łuku wzdłuż przewodu 12' do 26 i zamknięcie prądu łukowego (zgodnie z rys. 1 przez punkt A) modelu obwodowego zwarcia.



Rys.4. Deformacja dolnej części uzwojenia szeregowego HV autotransformatora

Fig. 4. Deformation of the lower part of the HV winding

2.2. Obliczenia gęstości prądów w obszarach uzwojeń podczas zwarcia

Obliczenie reaktancji i napięcia zwarcia uzwojeń: szeregowego i wspólnego przeprowadzono zakładając równoważność przepływów uzwojenia szeregowego o liczbie zwojów 579 i prądzie I_{IN}

oraz dwóch uzwojeń połówkowych o liczbie zwojów 579 i prądzie l_{1N_2} (rys. 5).

Obliczenia wykonano wykorzystując wzory podane w pracy [2]

$$X_{r} = 7.9 \cdot f \cdot z^{2} \frac{2\pi r}{L_{U}} \left(\frac{a_{1} + a_{2}}{3} + \delta \right) k \cdot 10^{-8}$$
(1)

gdzie:

$$a_1 = 11,2cm$$
, $a_2 = 16,3cm$, $\delta = 10cm$,

$$r = 86,4$$
 cm , $L_u = 180$ cm , $f = 50$ Hz

$$k = 1 - \frac{a_1 + a_2 + \delta}{\pi \cdot L_{11}} = 1 - \frac{11, 2 + 16, 3 + 10}{\pi \cdot 180} = 0.93$$
(2)

$$X_{r} = 7,9 \cdot 50 \cdot (579)^{2} \frac{2\pi \cdot 86,4}{180} \cdot \bar{19} \cdot 0,93 \cdot \bar{10}^{-8} = 70,48\overline{\Omega}$$



- Rys. 5. Dane do obliczeń reaktancji i napięcia zwarcia układu uzwojenie szeregowe – wspólne
- Fig. 5. Data for calculations of the reactance and short-circuit voltage in configuration HV-MV windings

Napięcia znamionowe fazowe uzwojenia szeregowego i wspólnego wynoszą kolejno $U_{1N} = 160,12kV$, $U_{3N} = 71,1kV$. Odpowiadające tym napięciom wartości znamionowe prądów fazowych wynoszą: $I_{1N} = 464,7A$, $I_{3N} = 1084,92A$. Napięcia zwarcia transformatorowe i autotransformatorowe (wyznaczone z wartości reaktancji) wynoszą kolejno: $U_{t\%} = 20,4\%$, $U_{a\%} = 14,3\%$. Prądy zwarcia ustalonego wynoszą: $I_{1Z} = 3,25kA$; $I_{3Z} = 7,587kA$; $I_{2Z} = 10,837kA$

$$|I_{1Z}=3,25kA (I_{1N}=464,7A)$$

$$|I_{1Z}=10,837kA (I_{2N}=1549,62A)$$

$$|I_{3Z}=7,587kA (I_{3N}=1084,92A)$$

- Rys. 6. Wartości prądów znamionowych i zwarcia ustalonego w uzwojeniach szeregowym i wspólnym oraz prądów wtórnych
- Fig. 6. The values of the nominal and steady state short-circuit currents in the HV and MV windings and second side currents
- W tabeli 1 podano zestawienie gęstości prądów przestrzennych i rzeczywistych dla potrzeb obliczeń polowych.

Tabela 1

	Uzwojenie szeregowe	Uzwojenie wspólne			
Obciążenie znamionowe	rzeczywista j _{Ibl_N} = 5,33	rzeczywista j _{3_N} = 2,484			
	przestrzenna j _l = 0,917	przestrzenna $j_3 = 1,335$			
Zwarcie ustalone	rzeczywista j _{Iblzw} = 36,5	rzeczywista j ₃ = 17,37			
	przestrzenna j ₁ = 6,4	przestrzenna j ₃ = 9,34			
	w zaatakowanym bliźniaku j z = 439,67				
Zwarcie ustalone wattości maksymalne	rzeczywista j _{1blzw nwx} = 51,46	rzeczywista j _{3ZWmax} = 24,49			
Waltosel maksymakie	przestrzenna j _{1_{max} = 9,024}	przestrzenna j _{3max} =13,17			
	w zaatakowanym bliźniaku j [*] _{12max} = 619,93				
Zwarcie udarowe wartości	rzeczywista j _{l_{ud} = 102,92}	rzeczywista j _{3_{ud} = 48,98}			
Inaksymane	przestrzenna j _{lud} =18,048	przestrzenna j _{3ud} = 26,34			
	W zaatakowanym bliźniaku $j_{1Z_{ud}}^{*} = 1239,86$				

Wartości skuteczne i maksymalne gęstości prądu w uzwojeniach w A/mm²

3. MODEL MATEMATYCZNY DO OBLICZEŃ POLOWYCH

Na rysunku 7a podano szkic aksonometryczny układu uzwojeń szeregowego i wspólnego (zewnętrznego i wewnętrznego) umieszczonych na jednej z trzech kolumn rdzenia, natomiast na rysunku 7b prostokątny rzut z góry środkowej części badanego obiektu. Zaznaczono przyjęty układ współrzędnych oraz wskazano możliwe położenie przewodu bliźniaka zaatakowanego łukiem.





Rys. 7a. Główne wymiary środkowej części rozważanego obiektu

Fig. 7a. Main dimensions of the middle part of the considered object

 Rys. 7b. Prostokątny rzut z góry badanego obiektu Fig. 7b. Upper view of the Investigated object

Dokładne odtworzenie geometryczne tak dużego obiektu za pomocą trójwymiarowej struktury elementów skończonych jest niemal niemożliwe. Dlatego też wybrano jedynie segment przestrzenny o wysokości h=285 cm i wierzchołkowym kącie φ =3⁰ z jednoczesną aplikacją kilku siatek w wybranych podobszarach, co zapewnia zmienną dyskretyzację poszczególnych podobszarów. Dotyczy to szczególnie dyskretyzacji małego obszaru przekroju bliźniaka wobec pozostałych obszarów obliczeniowych.

Aczkolwiek konkretna awaria zdarzyła się i w przekroju bocznym uzwojenia (rys.8a), to dla porównania postanowiono dokonać obliczeń także dla wariantu hipotetycznej awarii w przekroju głównym autotransformatora (rys.8b). Do obliczeń przyjęto następujące przestrzenne gęstości prądów udarowych (tab. 1) z uwzględnieniem ich zwrotów: $j_{3_{ud}} = 26,34$ A/mm², $j_{1_{ud}} = 18,048$ A/mm². Gęstość prądu w zaatakowanym zwoju wynosi $j_{1_{ud}} = -1239,86$ A/mm².

4. WYNIKI OBLICZEN

Na rysunkach 8a i 8b przedstawiono w postaci zakreskowanej podobszary, w których zostały podane wartości gęstości liniowej sił elektrodynamicznych zamieszczone w tab. 2a i 2b.



Rys. 8a. Podobszary przekroju bocznego X-Z uzwojeń Fig. 8a. The subdomains in the lateral cross-section of the windings



Rys. 8b. Podobszary przekroju głównego uzwojeń Fig. 8b. The subdomains in the main cross-section of the windings

Tabela 2a

Wartości sił	działających	na w	vcinki	uzwoień	w	przekroju	bocznym XZ

Numer Numer cewki wycinka		FX/1 [N/m]			$F_{Z/I}^{II}[N_m]$		
		i	С	е	i	С	е
	1	-30,81	-556,4	-1154	782,4	840,0	495,2
cewka	2	-62,64	-1026	-2090	63,82	39,72	13,24
wew.	3	-120,3	-1100	-2175	16,46	0,220	0,220
1	F _S /	-963,4			119,4		
	1	771,6	357,3	+10556	218,8	437,6	-21968
cewka [2	1430	704,8	59,94	24,75	48,37	65,25
zew.	3	1493	763,3	36,03	1,850	2,170	2,370
11	F _S II	654,9			74,40		

Tabela 2b

Wartości sił działających na wycinki uzwojeń w przekroju głównym YZ

Numer cewki	Numer wycinka	$F_{X_{1}}^{\prime\prime}[N_{m}]$			FZ/[N/m]		
	,	i	С	е	i	С	е
	1	-190,8	-773,3	-1402	505,9	626,5	384,4
cewka	2	-101,6	-1076	-2150	4,330	17,84	33,17
wew.	3	-141,1	-1126	-2207	2,770	2,850	2,920
	FSI	-1033				46,46	
	1	931,9	476,2	+1722	228,4	420,2	-20551
cewka zew. II	2	1479	756,8	4,590	43,05	56,53	65,27
	3	1519	791,8	19,31	2,200	2,320	2,370
	F _S //	715,8			79,07		

Pozycje zacienione w tabelach 2a i 2b dotyczą gęstości siły działającej w obszarze bliźniaka o wymiarach (1,9x12) mm². Rozkłady pola magnetycznego w otoczeniu bliźniaka przedstawione zostały jedynie dla przekroju bocznego autotransformatora (rysunki 9a i 9b).



Rys. 9a. Przestrzenny rozkład składowej B_x w przekroju bocznym XZ zaatakowanego wycinka uzwojenia Fig. 9a. B_x distribution in the lateral cross-section of the wire with the arc current



Rys. 9b. Przestrzenny rozkład składowej Bz w przekroju bocznym XZ zaatakowanego wycinka uzwojenia Fig. 9b. Bz distribution in the lateral cross-section of the wire with the arc current

5. OBLICZENIE NAPRĘŻEŃ MECHANICZNYCH

5.1. Naprężenia pochylające przewód

Najbardziej spotykanym objawem przekroczenia mechanicznej wytrzymałości uzwojenia wskutek działania sił osiowych są pochylenia przewodów cewek. Siła osiowa osiąga wartość krytyczną, jeżeli moment pochylający przewód i moment przeciwreakcji przewodu stają się sobie równe. Na podstawie wzoru zamieszczonego w [3] obliczono wartość naprężenia krytycznego pochylającego przewód

$$\sigma_{Kr} = \frac{E}{12} \left(\frac{h}{R} \right)^2 = 1,015 \frac{MN}{m^2},$$
(3)

gdzie: E – moduł Younga (dla miedzi $E = 9,81 \cdot 10^{10} N_m^2$), h – wysokość przewodu gołego

(h = 12·10⁻³ m), R – promień zwoju (R = 1,077m). Naprężenie wywołane siłą osiową działającą na powierzchnię dolną zwoju podtrzymywaną przekładkami wynosi

$$\sigma = \frac{F_Z}{d}, \qquad (4)$$

gdzie: Fz - gęstość liniowa siły osiowej, d - szerokość przewodu gołego.

5.2. Naprężenia zginające osiowe

Na obwodzie cewki wysokiego napięcia (HV) znajduje się 40 klinów z przekładkami przenoszącymi siły osiowe. Odległość pomiędzy klinami jest równa $1_{\rm K}=0,17~{\rm m}$.

Naprężenia zginające osiowe zgodnie z [4] wyznacza się ze wzorów:

$$\sigma_{ob} = \frac{F_Z I_K^2}{8W_X} \text{ dla przekroju bocznego, } \sigma_{og} = \frac{F_Z I_K^2}{8W_y} \text{ dla przekroju głównego, gdzie } W_x \text{ i } W_Y \text{ są tzw.}$$

wskaźnikami wytrzymałości na zginanie. W rozpatrywanym obiekcie $W_x = W_y = 45,6 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$.

5.3. Naprężenia zginające promieniowe

Siły promieniowe są ograniczane na zewnętrznej powierzchni bocznej 40 klinami bandażowanymi (bez przekładek).

Naprężenia zginające promieniowe wyznacza się ze wzorów:

w przekroju bocznym
$$\sigma_{pb} = \frac{F_x l_K^2}{8W_z}$$
, w przekroju głównym $\sigma_{pg} = \frac{F_y l_K^2}{8W_z}$, gdzie: $W_z = 7,22 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3$.

Wyniki obliczeń poszczególnych rodzajów naprężeń zawiera tabela 3.

Tabela 3

	Przek	rój boczny	Przekrój główny			
Naprężenie pochylające przewód	Siła [ʰ/̯́m]	Naprężenie MN/m2	Siła [Ŋm]	Naprężenie MN/m2		
	$F_{Z} = -21968$	σ = 11,56 >> 1,015	$F_{Z} = -20551$	σ = 10,8· >> 1,015		
Naprężenie zginające osiowe	$F_{Z} = -21968$	$\sigma_{ob} = 1736 >> 105$	$F_{Z} = -20551$	σ _{og} =1624 >>105		
Naprężenie zginające promieniowe	$F_{x} = +10556$	σ _{pb} = 5281,6 >> 105	$F_y = +1722$	σ _{pg} = 861,6 >> 105		

Wartości sił i napreżeń działających na zaatakowany przewód

6. WNIOSKI

Opisany przypadek awarii, która doprowadziła do zniszczenia dolnej części uzwojenia wysokiego napięcia (HV) uzyskał potwierdzenie obliczeniowe poprzez obliczone gęstości liniowe sił działających na fragment zewnętrznego przewodu bliźniaka. Wyznaczone na podstawie tych gęstości naprężenia działające na zwój z tendencją pochylenia przewodu znacznie przewyższają wartość naprężenia krytycznego przewidzianego dla miedzi. To samo dotyczy, naprężeń zginających, pochodzących od sił osiowych i od sił promieniowych.

Aczkolwiek siły promieniowe działające na uzwojenie zewnętrzne mają charakter rozciągający, to na odcinku podparcia klinami zewnętrznymi działają one na fragment podpartego zwoju tak samo jak siły gnące. Naprężenia zginające od sił promieniowych w przekroju bocznym są trzykrotnie większe od naprężeń od sił osiowych, co powoduje, że w trakcie narastania łukowego prądu zwarcia zostaje najpierw przekroczona granica plastyczności miedzi w kierunku promieniowym. Wskazuje na to przerwanie przewodu bliźniaka i odkształcenie przerwanych końców na zewnątrz uzwojenia w wyniku awarii, która nastąpiła w przekroju bocznym transformatora.

Gdyby miejsce awarii znajdowało się w przekroju głównym autotransformatora, to jak wynika z obliczeń, przekroczenie granicy plastyczności nastąpiłoby najpierw w kierunku osiowym i mogłoby się objawić przerwaniem bliźniaka pod wpływem sił osiowych.

Ze względu na wysokie wartości naprężeń w kierunku osiowym i promieniowym uzwojenie w części, która uległa awarii, wykazuje deformacje w obydwu kierunkach. Szczególny przypadek awarii opisany powyżej był trudny do przewidzenia podczas konstruowania autotransformatora. W zasadzie skutki takiego zwarcia łukowego poprzez przewód bliżniaka powodujące awarię są niezależne od chwili rozpoczęcia zwarcia. Przyjmując korzystniejszy wariant, kiedy napięcie przechodzi przez maksimum, a prąd ma charakter ustalonego prądu zwarcia, uzyskujemy co prawda czterokrotnie mniejsze naprężenia, ale i tak przed osiągnięciem maksimum prądu wystąpi tendencja do pochylenia przewodów, a uzyskane naprężenia zginające przekroczą granicę plastyczności.

LITERATURA

- 1. Binns KJ, Lawrenson P. J., Trowbridge C.W.: The Analytical and Numerical Solution of Electrical and Magnetic Fields, John Wiley and Sons, Chichester, New York 1992.
- 2. Jezierski E.: Transformatory, WNT, Warszawa 1983.
- Jezierski E. i inni: Uzwojenia transformatorów energetycznych. Budowa i obliczanie , WNT, Warszawa 1982.
- 4. Konorski B. i inni: Kalendarzyk elektrotechniczny, PWN, Warszawa 1959.
- Kozłowski M., Pewca W.: Short-Circuit Performance of a Stretched Transformer Winding with Regards to its Actual Mechanical Characteristic, ETEP Vol. 6. No4, July/August 1996 (pp. 259-265).
- Lenasi K., Berlec M., Makuc D.: Optimizing short circuit forces in transformers, ISEF' 99 (pp 232-235).
- 7. Opera 3D, User guide, Vector Fields, 1999.

Recenzent: Dr hab. inż. Lech Nowak Profesor Politechniki Poznańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 10 marca 2001 r.

Abstract

The special case of an arc short-circuit in a power autotransformer is described. The arc conducted the current through a limited segment of the double wire (so-called twin) of the lower coil in the HV winding. The expected current densities, which may occur in HV (series) and MV (common) windings and in attacked wire, are specified. The representative autotransformer part is modelled using the finite element method with the help of the Opera3D package. The magnetic field distribution and the forces acting on the conductor attacked by arc are calculated. The stresses acting under pressure of the axial forces which cause the slope of the wires are determined. The bending stresses produced by the axial and radial forces are calculated as well. Irrespective of the fault place it is known for sure that the transformer will be damaged. Calculation of electrodynamic forces is very important because it is nearly impossible to examine them experimentally. The simulation results confirm the deformations of some wires, which were observed after the real fault of the winding part in an autotransformer. The wires can be bent under the influence of the electrodynamic forces.