

Jakub Bernatt, Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Artur Polak
Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ZWARCIE AWARYJNE TRANSFORMATORA

EMERGENCY SHORT-CIRCUIT OF THE TRANSFORMER

Streszczenie: Jedną z prób przewidzianą w programie badań pełnych transformatorów nowych jest próba zwarcia. Sposób przeprowadzenia tej próby jest opisany w normie PN-EN 60076-5. W eksploatacji transformatorów, które pracują w sieci elektroenergetycznej, zdarzają się także zwarcia przypadkowe. Przykładem jest transformator 16 MVA, 110/20kV z wyjściem kablowym. Kabel został uszkodzony. Powstało zwarcie dwufazowe. Transformator uległ awarii. Bazując na tym przykładzie i wykorzystując schematy zastępcze, obliczono prąd udarowy przy zwarciu symetrycznym i prąd udarowy przy zwarciu dwufazowym. Oceniono przebiegi indukowane przy wyłączeniu prądu zwarcia. Wskazano przyczynę awarii transformatora.

Abstract: One of the tests included in the test program for complete new transformers is the short-circuit test. The method of carrying out this test is described in the PN-EN 60076-5 standard. In the operation of transformers that operate in the power grid, accidental short-circuits also occur. An example is a 16 MVA, 110 / 20kV transformer with cable outlet. The cable has been damaged. A two-phase short circuit has arisen. The transformer has failed. Based on this example and using equivalent diagrams, the impulse current for symmetrical short-circuit and the impulse current for two-phase short-circuit were calculated. The induced overvoltage when switching off the short-circuit current was assessed. The cause of the transformer failure is indicated.

Słowa kluczowe: transformator, zwarcie symetryczne, zwarcie awaryjne, prąd udarowy

Keywords: transformer, symmetrical short-circuit, emergency short-circuit, surge current

1. Próba zwarcia wykonanego według normy

Transformatory trójfazowe rozdzielcze zainstalowane i eksploatowane w polskim systemie elektroenergetycznym są w różnym wieku, najstarsze mają ponad 50 lat. Transformatory te były budowane według wówczas obowiązujących norm [3, 4, 5, 6]. Norma PN-83/E-06040 określa: wartość szczytową udarowego prądu zwarcia, ustalony prąd zwarcia symetrycznego, dopuszczalny czas trwania zwarcia, wytrzymałość cieplną i dopuszczalne wartości średniej temperatury uzwojeń po zwarcium. Próbę zwarcia pomiarowego przeprowadza wytwórca jako próbę typu. Na życzenie klienta wytwórca może przeprowadzić także próbę wyrobu.

Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów [7] wyróżnia cztery Grupy transformatorów trójfazowych:

- grupa I transformatory olejowe o górnym napięciu znamionowym 220 kV i wyższym lub o mocy znamionowej 100 MVA i wyższej bez względu na napięcie,
- grupa II transformatory olejowe o mocy większej niż 2,5 MVA, nie zaliczone do grupy I,
- grupa III transformatory olejowe o mocy znamionowej do 2,5 MVA.

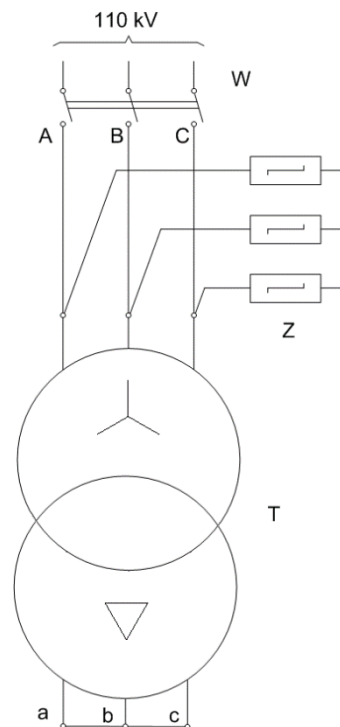
- grupa IV transformatory w izolacji suchej i kompozytowej.

Norma PN-EN 60076-5 z 2009 roku. *Transformatory. Wytrzymałość zwarcia* [6], określa warunki przeprowadzenia próby zwarcia transformatorów trójfazowych. Norma nie ma mocy prawnej lecz, jeśli jest wpisana do umowy między wytwórcą a zamawiającym, to obowiązuje. Należy pamiętać, że norma dotyczy transformatorów nowych, a celem próby zwarcia jest sprawdzenie wytrzymałości mocowania uzwojenia na siły dynamiczne generowane przez udarowy prąd zwarcia. Norma [6] i Instrukcja [7] uściślają warunki przeprowadzenia próby zwarcia:

- sposób wykonania próby zwarcia i liczbę zwarć probierczych najlepiej uzgodnić między wytwórcą a zamawiającym,
- w przypadku transformatorów grupy I liczba prób zwarcia zawsze jest uzgadniana między wytwórcą a zamawiającym,
- dla transformatorów grupy II, III i IV, jeśli nie ma innych uzgodnień między wytwórcą, a zamawiającym, to całkowita liczba zwarć probierczych powinna wynosić po trzy na każdej fazie,

- średnia temperatura uzwojeń przed rozpoczęciem próby zwarcia powinna zawierać się najlepiej pomiędzy 10°C i 40°C ,
- próbę zwarcia można przeprowadzać jako próbę trójfazową bądź próby jednofazowe przeprowadzone na każdej z faz,
- próba zwarcia może być wykonana dwoma sposobami: zwarcie ze stanu jałowego transformatora lub załączenie do sieci elektroenergetycznej transformatora zwanego,
- moment zwarcia należy wybrać za pomocą wyłącznika synchronicznego, zwarcie powinno być dokonane w chwili gdy napięcie w jednej z faz przechodzi przez zero, przy następnych zwarciach probierczych należy zmienić fazę odniesienia,
- kolejne zvarcia należy wykonać na różnych pozycjach przełącznika zaczepów, na pozycji odpowiadającej najniższej przekładni napięciowej i na zaczepe znamionowym,
- czas próby zwarcia dla transformatorów grupy I i II wynosi $0,25\text{ s}$, a dla transformatorów pozostałych czas zwarcia wynosi $0,5\text{ s}$,
- ze względów cieplnych czas odstępu między kolejnymi zvarciami probierczymi należy tak dobrać aby nie przegrzać uzwojenia i należy je uzgodnić między wytwórcą a zamawiającym.

Norma [6] nie precyzuje wymagań dotyczących sposobu wyłączania zwarcia i wymagań dotyczących wyłącznika. Wyłączenie prądu w obwodzie R-L zawsze generuje przepięcie. Maksymalna wartość napięcia zależy od wartości wyłączanego prądu i od szybkości znikania prądu, przy wyłącznikach szybkich (próżniowych) pik napięcia może być o rząd większy od napięcia znamionowego. Przed takim napięciem izolacja uzwojenia powinna być chroniona. Wytwórcy transformatorów instalują ochronę napięciową, mogą to być warystory Z lub iskierniki - rys. 1.



Rys. 1. Schemat układu w którym przeprowadzana jest próba zwarcia transformator

2. Maksymalna wartość prądu udarowego przy załączeniu zwarcia symetrycznego

Norma dotyczy transformatora nowego, a próbę zwarcia wykonuje producent transformatora. Zwarcie jest wykonane bezpośrednio na zaciskach jednego z uzwojeń przy zasilaniu drugiego uzwojenia. Udarowy prąd zwarcia generuje w uzwojeniach siły dynamiczne, które mogą spowodować naruszenie konstrukcji transformatora, a wyłączenie prądu zwarcia generuje w uzwojeniach przepięcia, które mogą uszkodzić izolację uzwojeń. Ponadto trzy zvarcia po kolei mogą nagrzać uzwojenie ponad wartość dopuszczalną dla zastosowanej cieplnej klasy izolacji. Celem próby zwarcia jest sprawdzenie konstrukcji mechanicznej transformatora, czy w czasie próby transformator nie ulegnie uszkodzeniu. Natomiast od przepięć generowanych przy wyłączeniu prądu zwarcia uzwojenia są chronione. Aby uzwojeń nie przegrzać to czas między kolejnymi zvarciami uzależnia się od temperatury uzwojenia w próbie poprzedzającej. Obliczymy udarowe prądy zwarcia płynące w uzwojeniu wtórnym i pierwotnym transformatora z grupy II o parametrach znamionowych 16 MVA , $110/20\text{ kV}$, $u_{z\%} = 10,35\%$, $\Delta P_{CuN} = 92,2\text{ kW}$. układ połączenia Yd11, przy założeniach:

- uzwojenie wtórne 20 kV jest zwarte symetrycznie,
- zasilane jest uzwojenie pierwotne napięciem 3-fazowym 110 kV o wartości stałej, to znaczy, że impedancja zwarcia sieci jest równa zero,
- schemat zastępczy transformatora jest sprowadzony na napięcie 20 kV w układzie Yy, pomija się gałąź poprzeczną i pojemności uzwojeń – rys. 2.

Prąd udarowy zwarcia zależy od chwilowej wartości napięcia na fazie w momencie zwarcia. Wartość maksymalna prądu udarowego wystąpi gdy sinusoida napięcia przechodzi przez zero. Norma PN-83/E-06040 podaje metodykę obliczenia wartości maksymalnej udarowego prądu zwarcia. Udarowy prąd zwarcia

$$I_{z\ ud} = \sqrt{2} k_{ud} I_z$$

k_{ud} - współczynnik udaru

I_z – ustalony prąd zwarcia

$$I_z = \frac{100}{u_{z\%}} I_N$$

Prąd znamionowy I_{2N} po stronie DN

$$I_{2N} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_N} = \frac{16\ 000}{\sqrt{3} \cdot 20} = 462\ \text{A}$$

Prąd znamionowy I_{1N} po stronie GN

$$I_{1N} = \frac{S_n}{\sqrt{3} U_N} = \frac{16\ 000}{\sqrt{3} \cdot 110} = 84\ \text{A}$$

Ustalony prąd zwarcia w uzwojeniu DN połączonym w trójkąt

$$I_{\Delta z} = \frac{I_{2N} \cdot 100}{\sqrt{3} u_{z\%}} = \frac{462 \cdot 100}{\sqrt{3} \cdot 10,35} = 2\ 577\ \text{A}$$

Współczynnik udaru k_{ud} jest funkcją $\frac{u_{x\%}}{u_{r\%}}$ transformatora

$$u_{x\%} = \sqrt{u_{z\%}^2 - u_{r\%}^2}$$

$$u_{r\%} = \frac{\Delta P_{CuN}}{S_N} \cdot 100 = \frac{92,2}{16\ 000} \cdot 100 = 0,576\%$$

$$u_{x\%} = \sqrt{10,35^2 - 0,576^2} = 10,33\%$$

$$\frac{u_{x\%}}{u_{r\%}} = \frac{10,33}{0,576} = 17,9$$

Z normy PN-83/E-06040 odczytujemy wartość współczynnika udaru

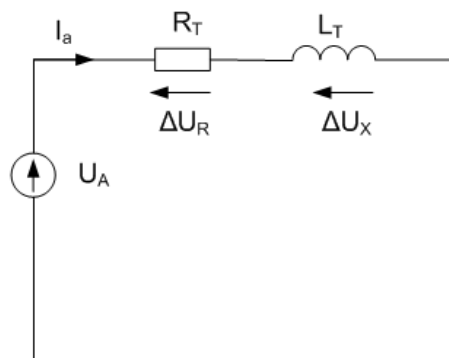
$$(k_{ud\ max} = 1,8).$$

Parametry schematu zastępczego transformatora dla układu połączenia uzwojeń Yy0

$$R_T = \frac{u_{r\%} U'_A}{100 I'_A} = \frac{u_{r\%} U_{2N}}{100 \sqrt{3} I_{rN}} = \frac{0,576 \cdot 20\ 000}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 462} = 0,14\ \Omega$$

$$X_T = \frac{u_{x\%} U'_A}{100 I'_A} = \frac{u_{x\%} U_{2N}}{100 \sqrt{3} I_{rN}} = \frac{10,33 \cdot 20\ 000}{100 \cdot \sqrt{3} \cdot 462} = 2,58\ \Omega$$

Schemat zastępczy transformatora jest przedstawiony na rys. 2.



Rys. 2. Schemat zastępczy transformatora w układzie Yy0, sprowadzony na napięcie 20 kV

Minimalna wartość prądu udarowego w uzwojeniu DN będzie gdy, w chwili załączenia napięcia ($t = 0$), sinusoida napięcia w jednej z faz „A”, „B” lub „C” jest w amplitudzie. Wówczas współczynnik udaru dla tej fazy ($k_{ud\ min} = 1$). Prąd udarowy wystąpi po czasie ($\Delta t = 5\ \text{ms}$), a jego wartość będzie równa amplitudzie ustalonego prądu zwarcia

$$I_{\Delta z\ ud\ min} = \sqrt{2} k_{ud\ min} I_{z\Delta} = \sqrt{2} \cdot 1 \cdot 2\ 577 = 3\ 645\ \text{A}$$

Wartość minimalna udarowego prądu zwarcia w uzwojeniu GN połączonym w gwiazdę wynosi

$$I_{Yz\ ud\ min} = k_{ud\ min} \sqrt{2} \frac{100}{u_{z\%}} I_{1N} = 1 \cdot \sqrt{2} \cdot \frac{100}{10,35} \cdot 84 = 1147\ \text{A}$$

Maksymalna wartość prądu udarowego w uzwojeniu DN będzie wtedy gdy, w chwili załączania napięcia ($t = 0$), przebieg napięcia w jednej z faz „A”, „B” lub „C” przechodzi przez zero. Prąd udarowy wystąpi po czasie ($\Delta t = 10\ \text{ms}$), a jego wartość

$$I_{\Delta z\ ud\ max} = k_{ud\ max} I_{z\Delta\ min} = 1,8 \cdot 3645 = 6\ 561\ \text{A}$$

Wartość maksymalna udarowego prądu zwarcia w uzwojeniu GN połączonym w gwiazdę wynosi

$$I_{Yz\ ud\ max} = k_{ud\ max} I_{zA\ max} = 1,8 \cdot 1147 = 2065\ \text{A}$$

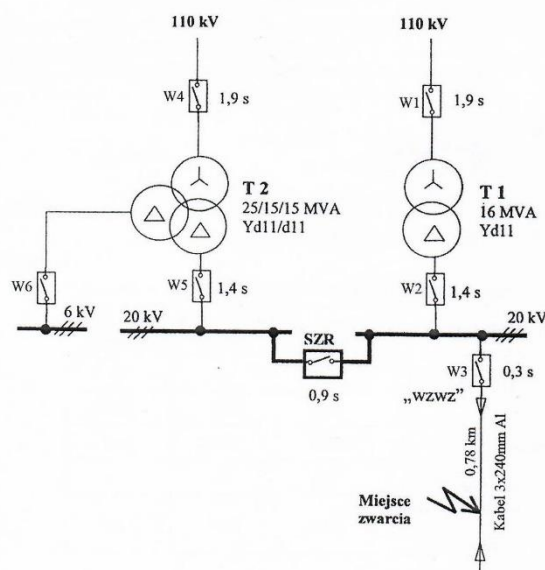
Wartość rzeczywista udarowego prądu zwarcia w uzwojeniu DN mieści się w przedziale między 3645 A a 6561 A i jest wartością przypadkową zależną od chwilowej wartości napięcia w momencie zwarcia. Prąd udarowy w uzwojeniu GN zawiera się w przedziale 1147 A ÷ 2065 A. Udarowy prąd zwarcia płynący w uzwojeniach GN i DN determinuje generowane siły elektrodynamiczne. Siły elektrodynamiczne działające na uzwojenie, na układ izolacyjny transformatora i na konstrukcję mocującą uzwojenie, są funkcją kwadratu prądu w uzwojeniach. Siła ta ma składową stałą i składową zmienną o częstotliwości 100 Hz. Wartość udarowa tej siły zawiera się w przedziale od 1 do 3,24 wartości siły działającej w stanie zwarcia ustalonego. Elektromagnetyczna stała czasowa obwodu zwartego transformatora wynosi

$$\tau = \frac{u_{x\%}}{u_{R\%}\omega} = \frac{10,33}{314 \cdot 0,576} = 0,057 \text{ s}$$

Po czasie $5\tau \approx 0,285 \text{ s}$ składowa aperiodyczna prądu zwarcia ma wartość zero. Przy zwarciach wykonywanych wg normy [6] czas zwarcia jest dłuższy od 5τ , zatem wyłączany jest prąd ustalony. Także czas przerwy między kolejnymi załączeniami zwarcia jest dłuższy od 5τ , drgania uzwojeń i rdzenia zanikną. Każde kolejne załączenie zwarcia jest przy zerowych warunkach początkowych elektromagnetycznych i mechanicznych. W czasie wyłączania prądu zwarcia w uzwojeniach generują się przepięcia, które narażają izolację na przebicie, w szczególności izolację zwojową. Przepięcia te powstają w każdym zwoju. Na Stacji prób Instrukcja stanowiskowa wykonania próby zwarcia nakazuje zabezpieczyć uzwojenia transformatora przed przepięciami - rys. 1.

3. Awaria transformatora spowodowana przerwaniem kabla

W stacji energetycznej były zainstalowane dwa transformatory T1 i T2 – rys. 3. Transformator T1 miał wyprowadzenie mocy kablem: 20 kV; 240 mm² Al. Transformator T2 dla linii kablowej stanowił zasilanie rezerwowe. Transformator 3-fazowy T1 miał parametry znamionowe podane w punkcie 2. Transformator do czasu awarii pracował 13 lat.



Rys. 3. Uproszczony schemat układu z zapisanymi czasami nastaw zabezpieczeń przeciążeniowych

Transformator wyposażony był w zabezpieczenia:

- gazowo – przepływowe kadzi (stopień I – sygnalizacja, stopień II – wyłączenie odbioru 20kV i zasilania 110kV),
- gazowo – przepływowe przełącznika zacepów (tylko sygnalizacja),
- różnicowo-prądowe (wyłączenie 20kV i 110kV),
- autonomiczne (wyłączenie 20kV i 110kV),
- przeciążeniowe uzwojeń 110kV i 20kV (tylko sygnalizacja),
- przeciw przepięciową ochronę (odgromniki GZSb po stronie 110kV i po stronie 20kV).

W rozdzielni na linii odpywowej 20kV były zabezpieczenia; nadprądowe przetężeniowe i ziemnozwarciowe kierunkowe. Zabezpieczenie nadprądowe linii odpywowych działały w cyklu automatyki samoczynnego powtórnego załączenia SPZ uaktywniając działanie wyłącznika W₃. Na rysunku 3 przedstawiono uproszczony schemat stacji energetycznej i linii kablowej z naniesioną informacją dotyczącą czasów stopniowania nastaw zabezpieczeń przetężeniowych. W czasie wykonywanych prac ziemnych koparka zerwała dwie żyły kabla, spowodowało to zwarcia dwufazowego na kablu i awarię transformatora. Na rysunku 3 zaznaczono miejsce zwarcia. Automatyka zabezpieczenia transformatora spowodowała najpierw działanie wyłącznika W₃. Wyłączenia i załączenia przebiegały w cyklu wzwwz:

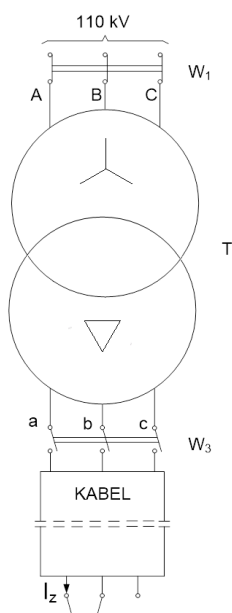
1. wyłączenie bezzwłoczne (czas własny zabezpieczenia wynosi około 0,07s., plus czas własny wyłącznika około 0,12s.,
2. przerwa beznapięciowa 1 s.,
3. załączenie i wyłączenie bezzwłoczne (czas własny zabezpieczenia wynosi około 0,07s., plus czas własny wyłącznika 0,12s.,
4. przerwa beznapięciowa 10 s.,
5. załączenie i po 0,3 s wyłączenie (plus czas własny 0,19s.).

Transformator był poddany serii trzech zwarć dwufazowych, rys. 4:

- zwarcie awaryjne na kablu i wyłączenie zwarcia wyłącznikiem W_3 po 0,19s.,
- po 1 sekundzie załączenie zwartego kabla wyłącznikiem W_3 i wyłączenie po 0,19s.,
- po 10 sekundach ponowne załączenie zwartego kabla wyłącznikiem W_3 i wyłączenie po 0,49s wyłącznikiem W_3 .

Następnie awaryjne dwustronne wyłączenie transformatora wyłącznikami W_1 i W_2 przez zabezpieczenie gazowo – przepływowe kadzi.

Na rysunku 4 przedstawiono schemat transformatora z wyłącznikiem sieciowym W_1 i wyłącznikiem W_3 kabla zwartego 2-fazowo.



Rys. 4. Schemat transformatora z przyłączonym kablem zwartym 2-fazowo

Komisja wyjaśniająca awarię, bazując na Dokumentacji eksploatacyjnej transformatora, w protokole poawaryjnym napisała, że transformator przed awarią był sprawny, a w czasie zwarcia na kablu zabezpieczenia działały poprawnie.

Po wyjęciu transformatora z kadzi i demontażu wszystkich uzwojeń zrobiono listę uszkodzeń:

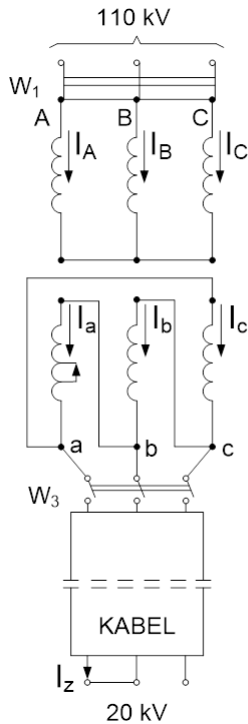
- pęknięte i zdeformowane elkonowe pierścienie prasujące uzwojenia fazy A i fazy B,
- zwarcie zwojowe i wypalenia na uzwojeniach DN 20 kV, fazy A,
- uzwojenia wszystkich faz są odkształcone i poluzowane,
- izolacja główna jest luźna i przesunięta,
- uzwojenia DN i GN faz A i B jest zanieczyszczony perelkami miedzi,
- olej nie spełnia wymagań do ponownego wykorzystania,
- rdzeń i przełącznik zaczepów nie są uszkodzone.

Uzwojenie DN było połączone w trójkąt. Zwarcie na kablu spowodowało zwarcie między fazami „a” i „b”. Zwarcie było łukowe, niesymetryczne, dwufazowe i doziemne. Działanie automatyki zabezpieczeniowej SPZ powodowało wyłączenie transformatora i ponowne załączenie, zatem były to zwarcia przerywane. Zakres uszkodzeń uzwojeń faz nie jest identyczny. Wyraźnie najbardziej uszkodzonym uzwojeniem jest faza „a” DN. W uzwojeniu fazy „a” płynął największy prąd. Rodzaj i zakres wewnętrznych uszkodzeń mechanicznych transformatora jest dowodem, że powstały one pod wpływem sił elektrodynamicznych generowanych przez udarowy prąd zwarcia. Zawarcie generowało ferorezonans, a wyłączenie zwarcia przebiegało, które spowodowały zwarcie zwojowe. Powtarzane zwarcia 2-fazowe transformatora powodowały silne dynamiczne narażenie uzwojeń przez prądy udarowe. Wyłączenie prądu zwarcia powodowały przebiegi indukowane w uzwojeniach. Skutki oddziaływania przebiegów na układ izolacyjny sumowały się z oddziaływaniem cieplnym i dynamicznym prądu zwarcia (naprężeniami mechanicznymi i drganiami uzwojeń), które spowodowało zwarcie zwojowe i zniszczenie izolacji głównej. Zwarcie zwojowe zainicjowało gazowanie oleju, które dało sygnał do wyłączenia awaryjnego transformatora.

4. Prąd udarowy zwarcia dwufazowego na kablu

Zwarcie na kablu wystąpiło gdy transformator był sprawny. Schemat uzwojenia w stanie zwarcia dwufazowego na kablu ilustruje rysunek 4. Ze schematu tego widać, że zwarcie dwufazowe, w uzwojeniu DN połączonym w trójkąt, tworzy

dwie gałęzie równoległe zwarte na kablu: jedną gałąź stanowi uzwojenie fazy „a”, a drugą gałąź uzwojenia faz „b” i „c” połączonych w szereg – rys. 5. Zatem w uzwojeniu fazy „a” płynie znacznie większy prąd zwarcia niż w uzwojeniach faz „b” i „c”.



Rys. 5. Zwarcie 2-fazowe na kablu

Prąd zwarcia (w kwadracie) generuje w uzwojeniach siły elektrodynamiczne zawierające składowe stałe i składowe zmienne o pulsacji 100 Hz, które wzbudzą drgania uzwojenia. Drgania są największe w uzwojeniu fazy „a”. Wyłączenie zwarcia wyłącznikiem W_3 i gaszenie prądu powoduje, że pochodna prądu ($\frac{di_z}{dt}$) generuje przepięcie ($L_T \frac{di_z}{dt}$), a w czasie wyłączenia zwarcia uzwojenie drga. Drgania uzwojenia plus przepięcia sprzyjają powstawaniu zwarć zwojowych. Zwarcie zwojowe w uzwojeniu fazy „a” DN wystąpiło przy wyłączeniu pierwszego lub drugiego zwarcia, gdyż trzecie załączenie zwarcia wyłącznikiem W_3 było już przy zwarcu zwojowym, gdyż zwój zwarty częściowo wytopił się. Obliczenie udarowego prądu zwarcia dwufazowego w transformatorze jest złożone. Technika obliczeń bazuje na składowych symetrycznych. Składowe symetryczne dotyczą stanów ustalonych. Prąd udarowy w uzwojeniu fazy „a” uwzględnimy mnożąc amplitudę prądu przez współczynnik udaru k_{ud} .

Obliczenia ustalonego prądu zwarcia przeprowadzimy przy założeniach:

- trójfazowe napięcie zasilające jest symetryczne i wynosi $U_1 = 110$ kV, a impedancja sieci zasilającej jest równa zero,
- wartość napięcia sprowadzonego na stronę wtórną $U'_1 = U_2 = 20$ kV,
- zwarcie jest 2-fazowe,
- schemat zastępczy transformatora i kabla jest sprowadzony na napięcie 20 kV,
- w schemacie zastępczym transformatora pomijamy indukcyjność magnesującą ($L_\mu = \infty$) i rezystancję R_{Fe} czyli gałąź poprzeczną,
- w schemacie zastępczym kabla pomijamy pojemność ($C_k = 0$) czyli gałąź poprzeczną,
- parametry kabla są rozłożone, uwzględniamy je jako skupione i są połączone szeregowo z parametrami transformatora,
- parametry schematu zastępczego dla składowej zgodnej i składowej przeciwnej są takie same.

Uzwojenia transformatora są połączone w układ Yd. Prąd zwarcia będziemy liczyć w schemacie zastępczym uzwojeń połączonych w układ Yy0. Parametry kabla aluminiowego dla układu Y. Z danych katalogowych kabli [1] o napięciu 18÷30 kV odczytano:

- rezystancję w temperaturze 60°C – 0,19 Ω/km ,
- pojemność - 0,22 $\mu\text{F}/\text{km}$,
- indukcyjność - 0,37 mH/km.

Zwarcie wystąpiło na długości 0,78 km za transformatorem (rys. 3)

Rezystancja kabla do punktu zwarcia $R_k = 0,78 \cdot 0,19 = 0,15 \Omega$,

Pojemność kabla do punktu zwarcia $C_k = 0,78 \cdot 0,22 = 0,17 \mu\text{F}$.

Indukcyjność kabla do punktu zwarcia $L_k = 0,78 \cdot 0,37 = 0,29$ mH

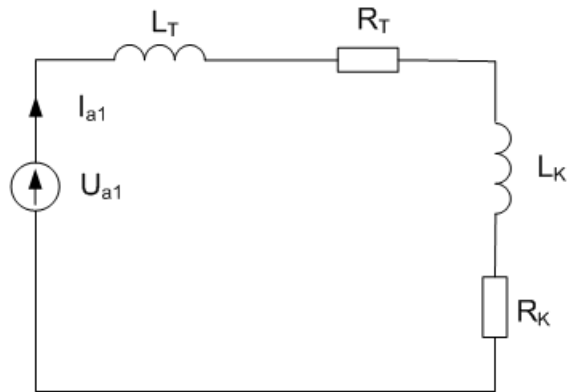
Impedancja pojemnościowa kabla

$$X_C = \frac{1}{\omega C_k} = \frac{10^6}{314 \cdot 0,17} = 18,7 \cdot 10^3 \Omega$$

Wartość impedancji X_C jest tak duża, że uzasadnia złożenie w gałęzi poprzecznej schematu zastępczego ($C_k = 0$).

Prądy zwarcia ustalonego obliczamy metodą składowych symetrycznych (zapis symboliczny). Schemat składowej symetrycznej zgodnej przedstawiony jest na rys. 6. Schemat zastępczy dla składowej przeciwnej ma te same para-

metry L_T, R_T, L_k, R_k i zamiast napięcia U_{a1} ma siłę prądomotoryczną I_{a2} . Składowej zerowej w układzie 3-fazowym (bez punktu zerowego) nie ma.



Rys. 6. Schemat zastępczy transformatora i kabla dla składowych symetrycznych zgodnej w układzie $Yy0$

Impedancja pętli zwarcia

$$Z_{zk} = \sqrt{(R_k + R_T)^2 + (\omega L_k + X_T)^2} = \sqrt{(0,15 + 0,14)^2 + (314 \cdot 0,29 + 2,58)^2} = 2,99 \Omega$$

Prądy składowych symetrycznych

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3}(I_a + \alpha I_b + \alpha^2 I_c) \\ I_{a2} &= \frac{1}{3}(I_a + \alpha^2 I_b + I_{yc}) \\ I_{a0} &= \frac{1}{3}(I_a + I_{yb} + I_c) \end{aligned}$$

Zwarcie jest 2-fazowe, a I_z jest prądem zwarcia

$$\begin{aligned} I_a &= I_z e^{j0^\circ} \\ I_b &= I_z e^{j180^\circ} \\ I_c &= 0 \end{aligned}$$

Prądy fazowe

$$\begin{aligned} I_{a1} &= \frac{1}{3} I_z (e^{j0^\circ} + e^{j300^\circ}) = \frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{-j30^\circ} \\ I_{a2} &= \frac{1}{3} I_z (e^{j0^\circ} + e^{j60^\circ}) = \frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{j30^\circ} \\ I_{a0} &= \frac{1}{3} I_z (e^{j0^\circ} + e^{j180^\circ}) = 0 \end{aligned}$$

Wartości skuteczne składowych symetrycznych prądu obliczone ze schematu zastępczego rys. 6

$$\begin{aligned} |I_{a1}| &= \frac{U_1}{Z_{zy}} = \frac{20\,000}{\sqrt{3} \cdot 2,99} = 3\,861 \text{ A} \\ |I_{a2}| &= |I_{a1}| = 3\,861 \text{ A} \\ I_{a0} &= 0 \end{aligned}$$

Prąd zwarcia w kablu

$$I_z = I_{a1} + I_a + I_{a0} = 3\,861(e^{-j30^\circ} + e^{j30^\circ}) = 6\,687 \text{ j A}$$

Prądy w uzwojeniu pierwotnym.

Transformator ma grupę połączenia $Yd11$, to znaczy, że napięcia międzyfazowe strony wtórnej są przesunięte w fazie o kąt 330° względem napięcia międzyfazowego strony pierwotnej. Zatem składowe symetryczne prądów w uzwojeniu pierwotnym będą przesunięte w fazie odwrotnie: składowa zgodna o kąt (-330°) , a składowa przeciwna o kąt (330°) i podzielone przez przekładnię

$$\begin{aligned} I_A &= \frac{U_{2N}}{U_{1N}} (I_{a1} e^{-j330^\circ} + I_{a2} e^{j330^\circ}) \\ &= \frac{20}{110} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{-j30^\circ} e^{-j330^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{j30^\circ} e^{j330^\circ} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_B &= \frac{U_{2N}}{U_{1N}} (I_{a1} e^{j240^\circ} e^{-j330^\circ} + I_{a2} e^{j120^\circ} e^{j330^\circ}) \\ &= \frac{20}{110} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{-j30^\circ} e^{-j90^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{j30^\circ} e^{j90^\circ} \right) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= \frac{U_{2N}}{U_{1N}} (I_{a1} e^{j120^\circ} e^{-j330^\circ} + I_{a2} e^{j240^\circ} e^{j330^\circ}) \\ &= \frac{20}{110} \left(\frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{-j30^\circ} e^{-j210^\circ} + \frac{\sqrt{3}}{3} I_z e^{j30^\circ} e^{j210^\circ} \right) \end{aligned}$$

$$I_A = \frac{3861}{0,105} (e^j + e^j) = 2 \cdot 405j = 810j \text{ A}$$

$$I_B = \frac{3861}{0,105} (e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}) = -1 \cdot 405j = -405j \text{ A}$$

$$I_C = \frac{3861}{0,105} (e^{-j240^\circ} + e^{j240^\circ}) = -1 \cdot 405j = -405j \text{ A}$$

Prądy $|I_A|$, $|I_B|$, $|I_C|$ są wartościami skutecznymi.

Prąd udarowy minimalny jest gdy sinusoida napięcia w fazie „A”, w chwili zwarcia ($t = 0$) jest w amplitudzie, wówczas sinusoida prądu fazy „A” przechodzi przez zero

$$i_A = \sqrt{2} |I_A| \sin \omega t$$

i nie ma składowej aperiodycznej

$$I_{Aud \min} = \sqrt{2} \cdot |I_A| = \sqrt{2} \cdot 810 = 1146 \text{ A.}$$

Prąd udarowy maksymalny jest gdy sinusoida napięcia w fazie „A” w chwili zwarcia ($t = 0$)

przechodzi przez zero, wówczas składowa periodyczna prądu dla ($t = 0$) jest w amplitudzie.

$$i_{A\sim} = \sqrt{2}|I_A| \cos \omega t$$

Ponieważ przebieg prądu w gałęziach indukcyjnych rozpoczyna się od zera

$$i_{A(t=0)} = 0$$

zatem występuje składowa aperiodyczna $i_{A\text{ap}}$

$$i_A = i_{A\sim} + i_{A\text{ap}} = \sqrt{2}|I_A| \cos \omega t - \sqrt{2}|I_A| e^{-\frac{t}{\tau_a}}$$

W czasie ($t = 10$ ms) składowa periodyczna prądu będzie w amplitudzie i wówczas prąd uzyskuje największą wartość, którą nazywamy wartością udarową maksymalną

$$i_{A(t=10\text{ ms})} = I_{A\text{ud max}} = k_{\text{ud max}} I_{A\text{ud min}} = 1,8 \cdot 1146 = 2062 \text{ A}$$

Prądy w uzwojeniu wtórnym połączonym w trójkąt. Na kolumnie rdzenia są uzwojenia pierwotne „A” i wtórne „a”. Siły magnetyczne uzwojeń

$$N_A I_A - N_a I_a = 0$$

N_A , N_a oznaczają liczbę zwojów uzwojenia fazy „A” i fazy „a”

$$\frac{N_A}{N_a} = \frac{U_A}{U_a} = \frac{U_{1N}}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{110}{\sqrt{3} \cdot 20} = 3,18$$

$$I_a = I_A \frac{N_A}{N_a} = 810 \cdot 3,18 = 2572 \text{ A}$$

Minimalny prąd udarowy jest równy amplitudzie

$$I_{a\text{ud min}} = \sqrt{2} \cdot I_a = \sqrt{2} \cdot 2572 = 3637 \text{ A}$$

Prąd udarowy maksymalny wystąpi także w uzwojeniu fazy „a”

$$I_{a\text{ud max}} = k_{\text{ud max}} I_{a\text{ud min}} = 1,8 \cdot 3637 = 6547 \text{ A}$$

5. Przepięcie indukowane przy wyłączeniu prądu zwarcia

W czasie działania SPZtu transformator jest odłączany od kabla wyłącznikiem W_3 . Wyłączany jest prąd zwarcia $I_z = 6687 \text{ A}$.

Tabela 1. Prądy udarowe w uzwojeniach

Zwarcie symetryczne wg. [6]				Zwarcie 2-fazowe na kablu			
I_{yzu}	I_{yzu}	$I_{\Delta zu}$	$I_{\Delta zu}$	I_{yzu}	I_{yzu}	$I_{\Delta zu}$	$I_{\Delta zu}$
A	A	A	A	A	A	A	A
11	20	36	65	11	20	36	65
47	65	45	61	46	62	37	47

Chwila wyłączenia jest przypadkowa.

Wartość chwilowa prądu wyłączanego zawiera się w przedziale

$$i_{z\text{wy}} = 0 \div \sqrt{2}I_z = 0 \div 9457 \text{ A}$$

Zakładając czas zanikania (gaszenia) prądu $\Delta t = 1$ ms, wyłączany prąd ma wartość maksymalną, a przebieg prądu jest liniowy, to wartość indukowanego w uzwojeniu napięcia wynosi

$$u_{\text{wy}} = \frac{X_T I_z \max}{\omega \Delta t} = \frac{2,58 \cdot 9457}{314 \cdot 10^{-3}} = 77\,703 \text{ V}$$

Należy zwrócić uwagę, że reaktancja X_T jest jednej fazy, a zatem obliczona wartość napięcia jest fazowa. Dla uzwojenia wtórnego jest to napięcie 4 razy większe od napięcia znamionowego. Oczywiście warunki włączania prądu zwarcia za każdym razem są inne. Wyłączane może być także zwarcie w chwili, gdy napięcie jest w amplitudzie, a sinusoida prądu przechodzi przez zero, wówczas przepięcia nie ma. Przedstawiona ocena indukowanego napięcia w czasie wyłączania prądu zwarcia jest pogładowa, gdyż przebieg zanikania prądu jest stochastyczny i zależy od właściwości wyłącznika.

6. Podsumowanie

Transformator o parametrach znamionowych: 16MVA, 110/20kV, układ Yd, uległ awarii. Transformatory zgodnie z normą [6] przechodzą próbę zwarcia u wytwórcy, są to trzy zwarcia symetryczne przy napięciu znamionowym. Zwarcia awaryjne transformatora nie spełniają warunków zwarcia wg normy [6]. Przedstawiono przykład awarii transformatora spowodowanej zwarcie dwufazowym na kablu po stronie 20 kV. W tabeli 1 zestawiono prądy udarowe przy zwarcie symetrycznym wykonanym według normy [6] i przy zwarcie awaryjnym dwufazowym na kablu. Zwarcie 2-fazowe na kablu wymusza, w uzwojeniach transformatora prądy udarowe identyczne jak przy zwarcie symetrycznym. Porównując zwarcie symetryczne transformatora nowego ze zwarcie awaryjnym niesymetrycznym transformatora pracującego, to drugie zwarcie jest bardziej uciążliwe dla transformatora, gdyż występują czynniki dodatkowe:

- ✓ transformator pracował już wiele lat w systemie SPZ,
- ✓ pracujący transformator jest nagrany,
- ✓ zwarcia awaryjne są seryjne wynikające z algorytmu działania SPZu, są najczęściej niesymetryczne, stochastyczne i powta-

rzane, które generują niesymetryczny rozkład sił zwarciovych działających na uzwojenie i konstrukcje transformatora. składowa zmienna siły o częstotliwości 100 Hz pobudza uzwojenie do drgań, wyłączanie prądu zwarcia generuje przepięcia $(L \frac{di}{dt})$, które łącznie z drganiami narażają izolację, głównie zwojową na przebicie.

Literatura

- [1]. Glinka T., Polak A.: *Transformator trójfazowy rozdzielczy - porównanie próby zwarcia znormalizowanego ze zwarcie eksploatacyjnym*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), PL ISSN 0033-2097, nr 4a/2012, ss. 30 - 33.
- [2]. <https://helukabel.pl/files/Przewody-elektryczne>
- [3]. Jezierski E: Transformatory. WNT 1975r.
- [4]. PN-69/E-06040. Transformatory. Wymagania ogólne.
- [5]. PN-83/E-06040. Transformatory. Wymagania ogólne.
- [6]. PN-EN 60076-5 z 2006 roku. Transformatory. Wytrzymałość zwarciova.
- [7]. PN-EN 60076-5 z 2009 roku. Transformatory. Wytrzymałość zwarciova.
- [8]. Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. ISBN 978-83-916040-4-5. Energopomiar-Elektryka, Gliwice 2012.
- [9]. Васютинский С. Б.: Вопросы теории и расчета трансформаторов. Издательство „Энергия” 1970г.