

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny

SYMULACJA ZWARĆ TRANSFORMATORA PRZY DZIAŁANIU SPZ

SIMULATION OF TRANSFORMER SHORT CIRCUITS WITH AUTO-RECLOSING OPERATION

Streszczenie: Transformatory pracujące w sieciach dystrybucyjnych najczęściej mają zabezpieczenie działające w cyklu SPZ. Rozpatrzono zwarcie bezpośrednie na uzwojeniu transformatora i zwarcie na kablu wyprowadzającym moc z transformatora. Przepięcia występujące przy wyłączeniu prądu zwarcia są kilka razy większe od napięcia znamionowego. Przy wyłączeniu zwarcia na kablu, oprócz przepięcia indukuje się składowa oscylacyjna napięcia o częstotliwości kilku kHz. Przepięcia rozkładają się nierównomiernie na poszczególnych zwojach. Największe przepięcia występują w zwojach leżących w strefie środkowej okna rdzenia. W czasie wyłączenia prądu zwarcia zwoje środkowe są najbardziej narażone na zwarcie zwojowe. Kolejne załączenie transformatora przy zwarcu zwojowym powoduje awarię.

Abstract: Transformers operating in distribution networks most often have protection operating in the AR cycle. A direct short-circuit on the transformer winding and a short-circuit on the cable leading the power out of the transformer were considered. The overvoltages occurring when the short-circuit current is switched off are several times higher than the rated voltage. When the short-circuit on the cable is cleared, in addition to the overvoltage, an oscillatory component of the voltage with a frequency of several kHz is induced. Overvoltages are distributed unevenly on individual turns. The highest overvoltages occur in the turns lying in the middle zone of the core window. During fault current interruption, the middle turns are most exposed to a turn-to-turn fault. Subsequent switching on of the transformer at a turn short circuit causes a failure.

Słowa kluczowe: transformator, SPZ, zwarcie, przepięcia

Keywords: transformer, auto-reclosing, short-circuit, overvoltage

1. Wstęp

Transformatory energetyczne zasilające różne odbiory energii mają często zabezpieczenie przed zwarciami działające w cyklu samoczynnego powtórnego załączenia SPZ. Jeśli zwarcie jest przemijające to SPZ działa w cyklu „wyłącz-załącz”, gdy po załączeniu zwarcie nie ustąpiło to cykl jest powtarzany „w-z”. Jeśli zwarcie jest trwałe to SPZ powoduje trzy wyłączenia „w-zw-zw”. Przedstawimy symulacje zwarć przy działaniu SPZ transformatora rozdzielczego typ TORb nr fabryczny 1101875. Transformator został wyprodukowany w 1985 roku. Parametry znamionowe transformatora $U_{1N}/U_{2N} = 115 / 20$ kV, $S_N = 16$ MVA, napięcie zwarcia $u_z\% = 10,335\%$, straty mocy w uzwojeniach $\Delta P_{CuN} = 92,2$ kW, układ połączenia uzwojenia Y/d11. Transformator był zainstalowany w 1987 roku w jednej ze stacji rozdzielczych. Po 11 latach eksploatacji transformator uległ awarii. Awaria była spowodowana: przerwaniem kabla na odpływie mocy, zwarcie dwufazowym i wyłączeniem zwarcia w cyklu:

- **wyłączenie** bezzwłoczne (czas własny zabezpieczenia wynosi około 0,07 s, plus czas własny wyłącznika W2 około 0,12 s;
- przerwa beznapięciowa 1 s;

- **załączenie i wyłączenie** bezzwłoczne (czas własny zabezpieczenia wynosi około 0,07 s, plus czas własny wyłącznika W2 około 0,12 s;
- przerwa beznapięciowa 10 s;
- **załączenie i po 0,3 s wyłączenie** (plus czas własny wyłącznika W1 około 0,19 s).

Drugie **wyłączenie** zwarcia spowodowało zwarcie zwojowe w fazie A uzwojenia DN. Kolejne załączenie kabla spowodowało wytopienie miedzi w miejscu zwarcia i awarię transformatora. W badaniach symulacyjnych założymy zwarcie trójfazowe symetryczne.

2. Schemat zastępczy transformatora

Założenia:

- straty mocy w obwodzie magnetycznym $\Delta P_{FeN} = 0$;
- prąd stanu jałowego $I_0 = 0$;
- układu połączenia uzwojeń Yy0;
- schemat zastępczy przedstawimy dla jednej fazy;
- schemat zastępczy sprowadzony jest na napięcie strony wtórnej $U_{2N} = 20$ kV.

Zgodnie z tymi założeniami w schemacie zastępczym, z gałęzią poprzeczną równoległą, $R_{Fe} = \infty$, $X_{\mu} = \infty$. Schemat zastępczy upraszcza się do dwóch parametrów połączonych szeregowo: indukcyjności L_T i rezystancji R_T .

Prąd znamionowy

$$I_{2N} = \frac{S_N}{\sqrt{3}U_{2N}} = \frac{16 \cdot 10^6}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 462 \text{ A} \quad (1)$$

Rezystancja

$$R_T = \frac{\Delta P_{CuN}}{3I_{2N}^2} = \frac{92,2 \cdot 10^3}{3 \cdot 462^2} = 0,144 \text{ } \Omega \quad (2)$$

Impedancja

$$Z_T = \frac{u_{z\%}}{100} \cdot \frac{U_{2N}}{\sqrt{3}I_{2N}} = \frac{10,335}{100} \cdot \frac{20 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 462} = 2,58 \text{ } \Omega \quad (3)$$

Reaktancja

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{2,58^2 - 0,144^2} \approx 2,58 \text{ } \Omega \quad (4)$$

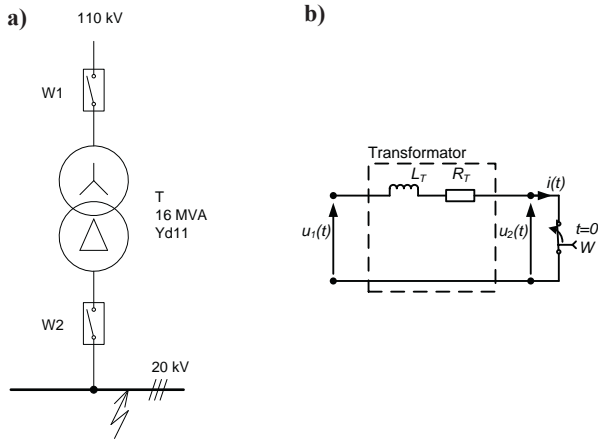
Indukcyjność uzwojeń w stanie zwarcia

$$L_T = \frac{X_T}{\omega} = \frac{2,58}{314} = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ H} \quad (5)$$

Rezystancja R_T nie ma wpływu na ustaloną wartość prądu zwarcia, lecz ma wpływ na stałą czasową τ_z zanikania składowej aperiodycznej prądu zwarcia

$$\tau_z = \frac{L_T}{R_T} = \frac{2,58}{0,144} = 0,057 \text{ s} \quad (6)$$

Na rysunku 1 pokazano schemat układu transformatora zwieranego bezpośrednio na szynach rozdzielni i schemat zastępczy transformatora.



Rys. 1. Zwarcie transformatora: a) bezpośrednio na szynach rozdzielni, b) schemat zastępczy

3. Zwarcia transformatorach na szynach wyjściowych

Ustalony prąd zwarcia (wartość skuteczna)

$$I_{zz} = \frac{I_{2N}}{u_{z\%}} = \frac{462}{10,335} = 4470 \text{ A} \quad (7)$$

Indeks (2) dotyczy prądu w uzwojeniu wtórnym. W obwodach elektrycznych zawierających indukcyjności przebieg prądu nie zmienia się skokowo lecz płynnie z elektromagnetyczną stałą czasową. W sta-

nie zwarcia przebieg prądu zawsze zaczyna się od zera. W obwodzie na rysunku 1a przebieg prądu determinuje reaktancja X_T , to znaczy, że w stanie ustalonym przebieg prądu spóźnia się w stosunku do napięcia o ćwierć okresu, czyli o 0,05 s. W chwili zwarcia, gdy sinusoida napięcia przechodzi przez zero, składowa periodyczna prądu $i_{2zp}(t=0)$ jest w amplitudzie, lecz prąd zwarcia zaczyna narastać od zera, dlatego pojawia się składowa aperiodyczna prądu i_{2za}

$$u_{2(t=0)} = U_{2m} \sin \omega t = 0 \quad (8)$$

$$i_{2z(t=0)} = i_{2zp(t=0)} + i_{2za(t=0)} = 0 \quad (9)$$

$$i_{2zp} = \sqrt{2}I_{2z} \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \quad (10)$$

$$i_{2za} = \sqrt{2}I_{2z} e^{-t/\tau_z} \quad (11)$$

Po czasie $t = 0,010$ s (pół okresu $\omega t = \pi$), składowa ustalona prądu i_{2zp} będzie w amplitudzie i prąd osiągnie wartość maksymalną, tzw. wartość udarową

$$i_{2z(t=0,01)} = I_{(t_{ud})} = \sqrt{2}I_{2z} + \sqrt{2}I_{2z} e^{-t_{ud}/\tau_z} = \sqrt{2} \cdot 4470(1 + e^{-0,01/0,057}) \approx 11380 \text{ A} \quad (12)$$

Wyłączenie prądu zwarcia

Przebieg wykładniczy składowej aperiodycznej prądu po 3 stałych czasowych

$$3\tau_z = 3 \cdot 0,057 = 0,171 \quad (13)$$

czyli po 8,5 okresach, zmniejszy się do 0,05 wartości początkowej. Jest to właściwość funkcji wykładniczej. Tak więc wyłączenie prądu zwarcia zawsze dotyczy prądu zwarcia ustalonego i_{2zp} . W niekorzystnej chwili wyłączenia będzie to wyłączenie prądu w amplitudzie $\sqrt{2} \cdot I_{2z} = \sqrt{2} \cdot 4470 = 6320 \text{ A}$.

Przebieg napięcia które powstanie na uzwojeniu

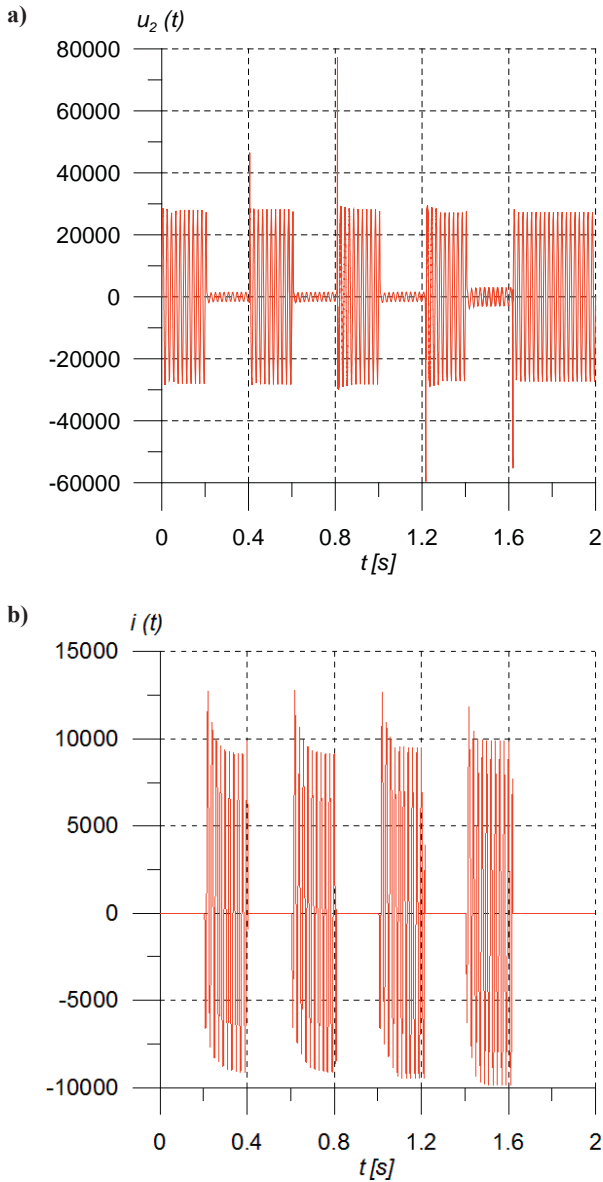
$$U_{2max} = L_T \frac{di_{2zp}}{dt} \quad (14)$$

Wartość maksymalną napięcia determinuje szybkość zanikania prądu.

Obliczenia symulacyjne napięcia na uzwojeniu transformatora w czasie wyłączenia prądu zwarcia przeprowadzono w programie PSpice, przy założeniach:

- napięcie zasilające 110 kV ma wartość stałą, to znaczy, że impedancja zwarcia sieci jest równa zero,
- rezystancja styków wyłącznika 10 m Ω , czas zanikania prądu na stykach wyłącznika 1 ms,
- parametry schematu zastępczego (Rys. 1b) przyjęte do symulacji: $R_T = 0,144 \text{ } \Omega$, $L_T = 8,2 \cdot 10^{-3} \text{ H}$;

Obliczane są napięcia indukowane w uzwojeniu w czasie przerywania prądu. Na rysunku 2 pokazano



Rys. 2. Przebiegi symulacyjne, przy cyklicznie wyłączanym i załączanym zwarcia: a) napięcia, b) prądu

przebiegi napięcia i prądu przy cyklicznym wyłączaniu i załączaniu zwarcia. Na rysunku 2a widoczne są przepięcia, które przy drugim wyłączeniu osiąga wartość koło 80 kV. Na rysunku 2b widoczna jest składowa aperiodyczna prądu i wartość prądu udarowego.

Na rysunku 3 pokazano przebiegi symulacyjne napięcia przy wyłączeniu zwarcia przy dwóch różnych wartościach chwilowych prądu. Przy wyłączeniu prądu o wartości chwilowej

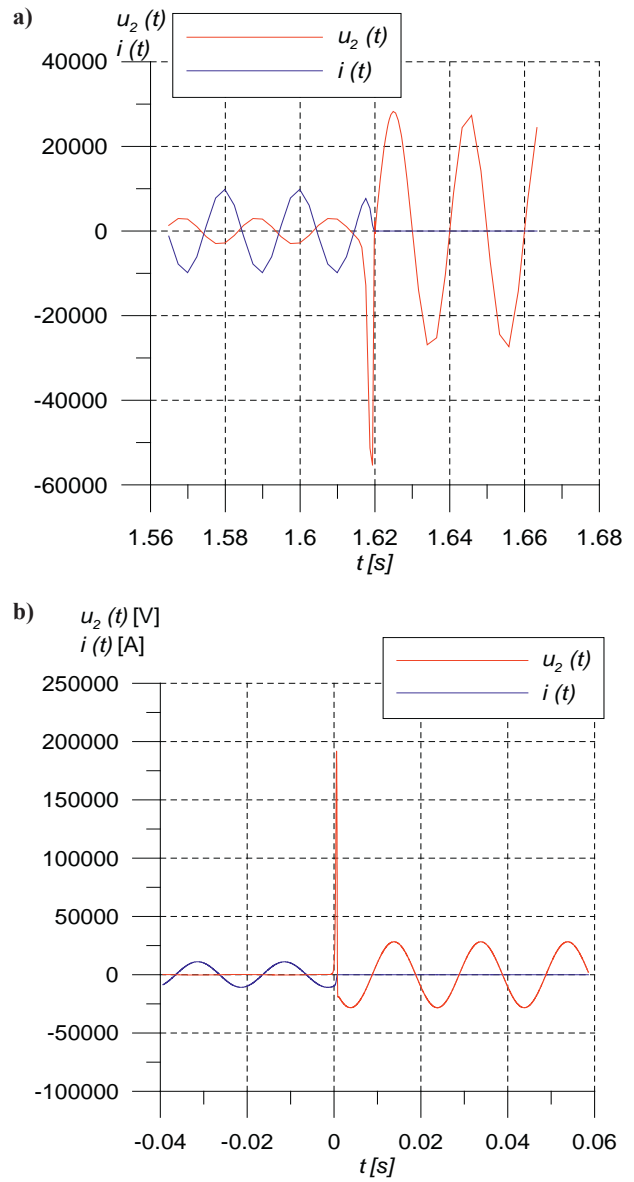
$$0,25\sqrt{2} I_{2z} = 0,25\sqrt{2} \cdot 4470 = 1580 \text{ A} \quad (15)$$

pik napięcia wynosi 55 kV, czyli $2,75U_{2N}$.

Przy wyłączeniu prądu w amplitudzie

$$\sqrt{2} I_{2z} = \sqrt{2} \cdot 4470 = 6321 \text{ A} \quad (16)$$

pik napięcia wynosi 180 kV, czyli $9U_{2N}$.

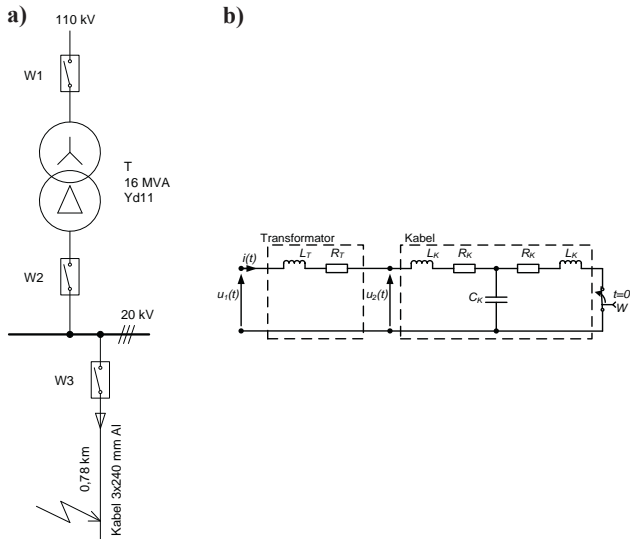


Rys. 3. Przebiegi symulacyjne napięcia i prądu przy wyłączeniu prądu zwarcia o wartości: a) $0,25\sqrt{2}I_{2z}$, b) $\sqrt{2}I_{2z}$

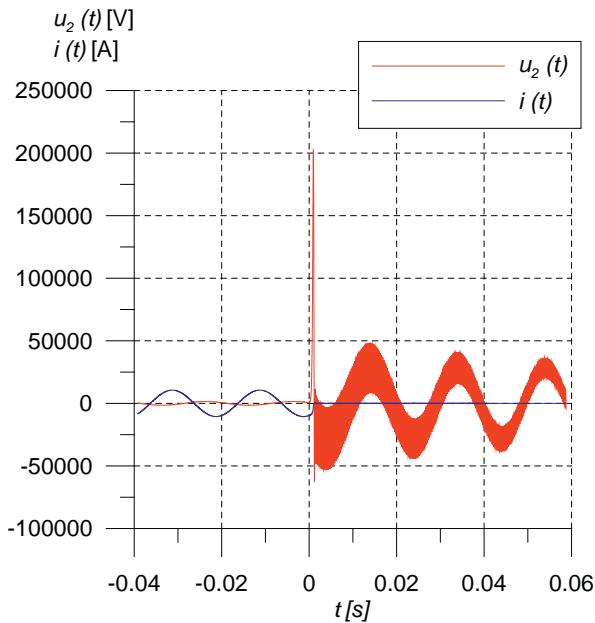
4. Zwarcia transformatorach na kablu

Zwarcie transformatora na kablu przedstawiono na rysunku 4a. Zwarcie na kablu wystąpiło, licząc od rozdzielni do punktu zwarcia, na długości 0,78 km. Kabel był aluminiowy o przekroju żył $3 \times 240 \text{ mm}^2$. Schemat zastępczy kabla jest dwójnikiem symetrycznym w którym: w gałęzi szeregowej są rezystancja i indukcyjność, a w gałęzi równoległej jest pojemność. W schemacie zastępczym kabla uwzględniono rezystancję ($2R_k$), indukcyjność ($2L_k$) oraz pojemność C_k . Parametry schematu zastępczego obliczono z danych katalogowych kabla: $R_k = 0,05 \Omega$, $L_k = 0,15 \text{ H}$, $C_k = 0,2 \mu\text{F}$. Schemat zastępczy transformatora i schemat zastępczy kabla są połączone szeregowo (Rys. 4b).

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi napięcia na transformatorze i prądu zwarcia po wyłączeniu prądu w chwili gdy był w amplitudzie



Rys. 4. Zwarczenie transformatora: a) na kablu, b) schemat zastępczy obwodu zwarzenia



Rys. 5. Przebieg napięcia po wyłączeniu prądu zwarzenia, czas zanikania prądu 1,2 ms

$$\sqrt{2}I_{2z} = \sqrt{2} \cdot 4470 = 6321 \text{ A} \quad (17)$$

Pik napięcia wynosi prawie 200 kV, czyli 10U_{2N}.

Wyłączana wartość chwilowa prądu zwarzenia, będącego w amplitudzie, jest równa 6321 A. Izolacja zwojowa jest narażona na napięcie pikowe około 10 razy większe od napięcia znamionowego. O wartości pikowej napięcia decyduje wartość chwilowa prądu i właściwości gaszące wyłącznika. W symulacji założono czas gaszenia 1,2 ms i liniowe zmniejszanie się prądu do zera. W przypadku zwarzenia na kablu, po wyłączeniu zwarzenia, może powstać składowa oscylacyjna generowana przez pojemność C_k i indukcyjność (L_T + L_k). Warunkiem powstania oscylacji jest nierówność

$$\sqrt{\frac{L_T + L_k}{C_k}} > \frac{2R_T + 2L_k}{2} \quad (18)$$

Łatwo wykazać, że przy wyłączaniu prądu w miejscu zwarzenia warunek ten jest spełniony. Częstotliwość oscylacji

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{(L_T + L_k)C_k} - \frac{(R_T + R_k)^2}{4(L_T + L_k)^2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14} \sqrt{\frac{10^9}{8,35 \cdot 0,2} - \frac{0,244^2}{4 \cdot 8,35^2}} \cdot 10^3 = 3896 \text{ Hz} \quad (19)$$

Z porównania przebiegów napięć na uzwojeniu transformatora, po wyłączeniu zwarzenia (Rys. 3b i Rys. 5b) widać, że narażenie napięciowe układu izolacyjnego, w czasie zwarzenia awaryjnego na kablu, może być większe niż przy zwarciu samego transformatora.

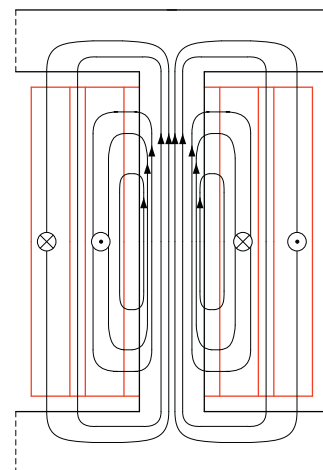
5. Rozkład przepięcia na uzwojeniu

Napięcie (przepięcie) indukujące się w uzwojeniu transformatora w czasie włączania prądu, nie rozkłada się równomiernie na zwojach. Napięcie na każdym zwoju jest proporcjonalne do pochodnej strumienia sprzężonego z danym zwojem

$$e_z = - \frac{d\Phi_z}{dt} \quad (20)$$

W stanie zwarzenia strumień Φ_z sprzężony z danym zwojem zależy od położenia zwoju w oknie rdzenia (Rys. 6).

Okno transformatora ma przenikalność magnetyczną względną μ = 1. Linie indukcji magnetyczne w powietrzu obejmujące zwoje środkowe są wzbudzone przez siłę magnetomotoryczną odpowiednio mniejszą (proporcjonalną do liczby obejmowanych zwojów) lecz mają mniejszą długość od pozostałych linii, to powoduje, że indukcja na wysokości uzwojenia ma



Rys. 6. Linie indukcji magnetycznej sprzężone z uzwojeniami transformatora w stanie zwarzenia

w przybliżeniu wartość stałą. Strumień magnetyczny Φ_{zw} w rdzeniu sprzężony ze zwojami w środku wysokości uzwojenia jest większy od strumienia Φ_{zz} sprzężonego ze zwojami zewnętrznymi, widoczne to jest na rysunku 6

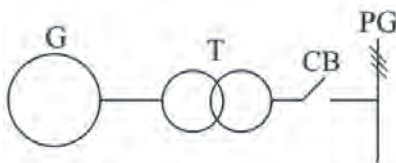
$$\Phi_{zw} > \Phi_{zz} \quad (21)$$

Napięcie indukowane w zwojach środkowych jest także odpowiednio większe

$$e_{zw} > e_{zz} \quad (22)$$

Przy włączaniu prądu zwarcia zwoje leżące w strefie środkowej okna są bardziej narażone na zwarcie zwojowe niż zwoje zewnętrzne. Ilustruje to przykład uzwojeń transformatora blokowego (Rys. 7). Generator jest połączony bezpośrednio z transformatorem. Wyłącznik blokowy CB (circuit breaker) jest między transformatorem, a siecią elektroenergetyczną PG (power grid).

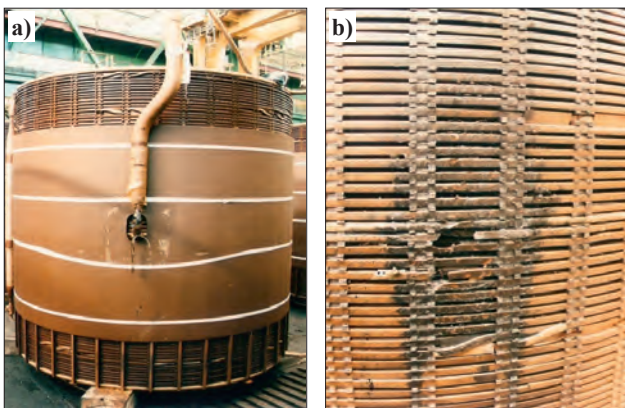
Blok wyłącza wyłącznik CB. Jedno z takich wyłączeń spowodowało przebicie izolacji w zwoju środkowym i zwarcie zwojowe. Po wyłączeniu generator jeszcze wiruje i jest wzbudzony, gdyż wzbudzenie zanika wykładniczo z elektromagnetyczną stałą czasową, skutkuje to wytopieniem uzwojenia w miejscu



Rys. 7. Schemat bloku elektroenergetycznego: G – generator synchroniczny, T – transformator, CB – wyłącznik blokowy, PG – system elektroenergetyczny

zwarcia. Na rysunku 8 przedstawiono uzwojenie górnego napięcia z wytopionymi w środku zwojami.

Ochrona napięciowa zabezpiecza przed przepięciami całe uzwojenie, lecz nie zabezpiecza dostatecznie izolacji zwojowej.



Rys. 8. Uzwojenie GN transformatora o parametrach znamionowych $S_N = 270 \text{ MVA}$; $U_{1N} = 15.7 \text{ kV}$; $U_{2N} = 250 \text{ kV}$: a) faza A nienaruszona, b) faza B uszkodzona

6. Podsumowanie

Transformatory pracujące w sieciach dystrybucyjnych najczęściej mają zabezpieczenie działające w cyklu SPZ. Zabezpieczenie to sprawdza się gdy po pierwszym wyłączeniu zwarcie ustępuje. Natomiast jeśli zwarcie jest trwałe, to drugie wyłączenie prądu zwarcia stwarza zagrożenie wystąpienia zwarcia zwojowego. Prąd zwarcia generuje ciepło i siły elektrodynamiczne. Ciepło nagrzewa uzwojenia, a siły wzbudzają w uzwojeniu drgania. Drga uzwojenie, drgają poszczególne ceki, a także mikrodrgania występują w każdym zwoju. Drgania działają destrukcyjne na mocowanie uzwojenia i na izolację w szczególności zwojową. Prąd jest wyłączany w uzwojeniu nagrzanym i drgającym. Pochodna prądu generuje przepięcie, które jest kilka razy większe od napięcia znamionowego. Uzwojenia transformatora są zabezpieczone przed przepięciami, lecz jest to zabezpieczenie całego uzwojenia czyli izolacji głównej. Przepięcia nie rozkładają się równomiernie na zwojach. Napięcie na każdym zwoju jest proporcjonalne do pochodnej strumienia sprzężonego z danym zwojem

$$e_z = - \frac{d\Phi_z}{dt} \quad (23)$$

W stanie zwarcia strumień Φ_z danego zwoju zależy od jego położenia w oknie rdzenia, Największy strumień Φ_z będzie obejmował zwoje leżące w strefie środkowej okna i te zwoje są najbardziej narażone na zwarcie zwojowe przy włączaniu prądu zwarcia. Przy zwarcu zwojowym kolejne załączenie transformatora przez SPZ kończy się awarią.

W transformatorach, gdy wyprowadzenie mocy jest kablami, zwarcie na kablu jest zwarcie trwałe, zatem nie zaleca się stosowanie SPZ.

Literatura

- [1] *Transformatory. Dodatkowe wymagania europejskie. Część 3.1. Transformatory dużej mocy. Wymagania ogólne*, PN-EN 50708-3-1:2020.
- [2] T. Glinka, A. Polak: *Transformator trójfazowy rozdzielczy – porównanie próby zwarcia znormalizowanego ze zwarcie eksploatacyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), Nr 4a/2012, s. 30–33, ISSN 0033-2097.
- [3] E. Jezierski: *Transformatory*, WNT, 1975 r.
- [4] M. Kazimierski, W. Olech: *Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów*, Wydawnictwo: Energopomiar – Elektryka Sp. z o.o., Gliwice 2013.
- [5] *Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów*, ZPBE Energopomiar – Elektryka, Gliwice, 2022 r.
- [6] Г. Вайда: *Исследования изоляции*, Энергия. Москва. 1968.
- [7] С.Б. Васютинский: *Вопросы теории и расчета трансформаторов*, Издательство „Энергия” 1970.

Autorzy

Stanisław Gawron, Tadeusz Glinka, Jakub Bernatt
Sieć Badawcza Łukasiewicz – Górnośląski Instytut Technologiczny, Centrum Napędów i Maszyn Elektrycznych, ul. Moniuszki 29, 41-209 Sosnowiec