

Przebiegi wewnętrzne w uzwojeniach transformatorów blokowych

Streszczenie. Omówiono zagadnienie uszkodzeń izolacji uzwojeń transformatorów blokowych wynikających z oddziaływania przebiegów wewnętrznych. Przedstawiono wyniki symulacji komputerowych w zakresie analiz rozkładów napięcia wzdłuż uzwojeń transformatora przy rozmaitych operacjach łączeniowych oraz zakłóceniach w linii zasilającej. Do obliczeń zastosowano model matematyczny uzwojeń typowego transformatora blokowego uwzględniający jego rzeczywiste parametry. Podano wyniki obliczeń oraz wnioski.

Abstract. The problem of winding insulation damage in unit transformers due to internal overvoltages have been described. The results of computer analyses on voltage distribution along transformer windings at different switching operations and faults in supply line are presented. For the calculations of voltage distribution mathematical model of typical transformer windings based on its real parameters have been used. Conclusions and recommendations are specified. (**Internal overvoltages in unit transformer windings**).

Słowa kluczowe: transformatory blokowe, uzwojenia transformatorów, przebiegi wewnętrzne, symulacje komputerowe.

Keywords: unit transformers, transformer windings, internal overvoltages, computer simulation.

doi:10.12915/pe.2014.01.51

Wstęp

Zagadnienia dotyczące groźnych przebiegów wewnętrznych w uzwojeniach transformatorów skutkujących poważnymi awariami dużych transformatorów sieciowych lub blokowych znane są od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku. Wówczas też rozpoczęto poważne prace mające na celu wyjaśnienie przyczyn uszkodzania się transformatorów. W ostatnich latach tematyka ta jest ponownie aktualna ze względu na nasilenie awarii transformatorów, głównie blokowych występujących zarówno w energetykach zagranicznych jak i krajowej. Badania związane z powstawaniem wewnętrznych przebiegów rezonansowych w uzwojeniach transformatora oraz w zakresie środków ograniczających lub eliminujących ich skutki są prowadzone intensywnie przez wiele ośrodków naukowych oraz fabrycznych zespołów konstruktorskich [1÷5,7,9,10]. Również w kraju prace w tym zakresie są podejmowane [6,8,11].

Narażenia napięciowe transformatorów blokowych

Podczas eksploatacji uzwojenia transformatora podlegają rozmaitemu rodzajowi oddziaływaniom napięciowym w postaci przebiegów łączeniowych, przebiegów piorunowych oraz przebiegów ziemnozwarciowych, które mogą mieć charakter oscylacyjny lub aperiodyczny. Ponadto na uzwojenia transformatora oddziałuje napięcie robocze o częstotliwości sieciowej. Uzwojenie transformatora stanowi skomplikowany układ połączonych szeregowo-równolegle pojemności i indukcyjności cząstkowych wzdłużnych (w ramach tego samego uzwojenia) oraz poprzecznych (w odniesieniu do innego uzwojenia lub do ziemi). Taki złożony układ uzwojenia transformatora posiada wiele częstotliwości rezonansowych odpowiadających obwodom cząstkowym. Jeżeli wymuszenie napięciowe w postaci przebiegów oscylacyjnych lub aperiodycznych przyłożone do zacisków transformatora charakteryzuje się częstotliwością bliską lub równą jednej z częstotliwości rezonansowych uzwojenia to wówczas mogą wystąpić drgania rezonansowe w tej części uzwojenia, w której własna częstotliwość rezonansowa jest bliska częstotliwości wymuszenia. Częstotliwości drgań przebiegów łączeniowych zawierają się w granicach od kilkuset herców do kilkudziesięciu kiloherców i stwarzają możliwość wzbudzenia drgań rezonansowych wewnątrz uzwojeń transformatora. Dodatkowym czynnikiem sprzyjającym wywołaniu drgań rezonansowych w uzwojeniu transformatora, poza zbliżoną częstotliwością drgań

zewnętrznych do jednej z częstotliwości rezonansowych transformatora, są właściwa amplituda przebiegu zewnętrznego, słabe tłumienie przebiegu przebiegu i odpowiednio długi czas jego trwania.

W wyniku powstawania wewnętrznych przebiegów rezonansowych w uzwojeniach transformatorów bardzo często następuje uszkodzenie ich izolacji prowadzące do zwarć wewnętrznych, co w konsekwencji może skutkować poważną awarią transformatora powodując wyłączenie go z eksploatacji. Przypadki takie były odnotowane zarówno w energetyce krajowej jak i w wielu energetykach zagranicznych. Stanowi to poważny problem eksploatacyjny dla energetyki ze względu na koszty remontu transformatorów, oraz koszty wynikające z przerw w dostawie energii elektrycznej.

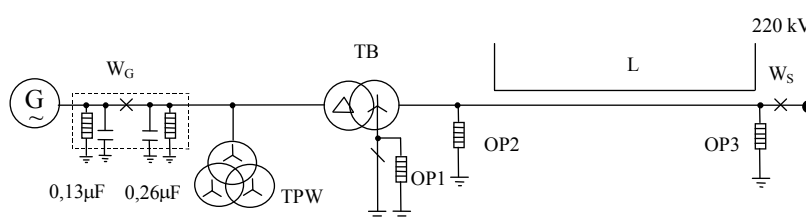
Niektóre z układów wyprowadzenia mocy z elektrowni mają dość specyficzną konfigurację polegającą na obecności pomiędzy transformatorem blokowym a najbliższą stacją elektroenergetyczną odcinka linii napowietrznej lub kablowej oraz na lokalizacji wyłącznika synchronizującego blok z siecią elektroenergetyczną w stacji elektroenergetycznej. Taka konfiguracja toru wyprowadzenia mocy sprzyja powstawaniu przebiegów wskutek inicjowania zjawisk falowych w liniach podczas łączeń oraz zakłóceń i może być przyczyną awarii transformatorów.

Symulacje komputerowe procesów łączeniowych i zakłóceń oraz towarzyszących im przebiegów w uzwojeniach transformatora blokowego

W ostatnich latach, w Polsce zdarzyło się kilka poważnych awarii transformatorów powodujących znaczące przerwy w dostawie energii elektrycznej oraz koszty wynikające z remontu jednostek transformatorowych. W jednej z krajowych elektrowni, w transformatorze blokowym pracującym w układzie linia - transformator wystąpiła w krótkim czasie seria uszkodzeń wewnętrznych.

Dla zbadania przyczyn tych awarii przeprowadzono obliczenia symulacyjne mające na celu oszacowanie poziomu przebiegów w cewkach uzwojeń powstających podczas rozmaitych operacji łączeniowych oraz podczas zwarć doziemnych w linii blokowej. Obliczenia symulacyjne wykonano za pomocą programu EMTP (Electro - Magnetic Transients Program) w wersji ATP. Przedmiotem artykułu są wyniki tych badań.

Schemat modelowanego układu wyprowadzenia mocy z elektrowni przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat zamodelowanego toru wyprowadzenia mocy z elektrowni (G - generator 282 MVA, 15,75 kV; TB - transformator blokowy 270 MVA, 250 kV/15,75 kV; TWP - transformator potrzeb własnych 32 MVA, 15,75 kV/6 kV/6 kV; L - linia dwutorowa 220 kV, długość linii $l_L = 22$ km; W_G - wyłącznik generatorowy łącznie z kondensatorami i ogranicznikami przepięć; W_S - wyłącznik sieciowy; OP1, OP2, OP3 - ograniczniki przepięć)

Dla właściwego odwzorowania modelu transformatora blokowego wykonano pomiary jego charakterystyk częstotliwościowych w stanie nieobciążonym i w stanie zwarcia. W obliczeniach przepięć w uzwojeniach transformatora uwzględniono budowę jego uzwojeń oraz zastosowano odwzorowanie uzwojeń górnego i dolnego napięcia za pomocą schematu drabinkowego – przyjmując podział uzwojeń GN na 45 cewek. Indukcyjności modelu drabinkowego wyznaczono na podstawie parametrów technicznych transformatora, a pojemności modelu obliczono wykorzystując dane pomiarowe pojemności transformatora blokowego wykonane po ostatnim jego remoncie. Tak obliczone dane modelu zweryfikowano wyznaczając analitycznie jego charakterystyki częstotliwościowe i porównując je ze zmierzonymi charakterystykami transformatora.

Wyprowadzenie mocy z rozpatrywanej elektrowni jest wykonane w postaci linii napowietrznej 220 kV przyłączonej do jednego z systemów 220 kV sąsiadującej stacji elektroenergetycznej. Linia jest zbudowana jako dwutorowa, głównie na słupach kratowych dwutorowych typu Mc2 oraz częściowo na słupach serii M52, o dwutrójkątowym układzie przewodów roboczych z dwoma przewodami odgromowymi. Linię 220 kV zamodelowano wg schematu Bergerona (parametry rozłożone) uwzględniając, na podstawie paszportu linii, rodzaje przewodów roboczych i odgromowych, liczbę i rodzaje słupów, geometrię zawieszenia przewodów itp.

Zakres obliczeń symulacyjnych

Obliczenia symulacyjne przepięć występujących w rozpatrywanym ciągu sieciowym (stacja elektroenergetyczna - wyłącznik sieciowy 220 kV – linia 220 kV – transformator blokowy - wyłącznik generatorowy – generator, łącznie z transformatorem potrzeb własnych, ogranicznikami przepięć oraz kondensatorami zainstalowanymi po obu stronach wyłącznika generatorowego) przeprowadzono w odniesieniu do wybranych operacji łączeniowych wyłącznika sieciowego 220 kV i generatorowego oraz zakłóceń w linii 220 kV stwarzających największe zagrożenia przepięciowe.

Zakres obliczeń obejmował:

- Załączanie nieobciążonego transformatora blokowego wyłącznikiem w stacji elektroenergetycznej.
- Wyłączanie bezzapłonowe obciążonego transformatora blokowego wyłącznikiem w stacji elektroenergetycznej
- Załączanie generatora wyłącznikiem generatorowym do sieci - synchronizacja.
- Wyłączanie obciążonego generatora wyłącznikiem generatorowym.
- Wyłączanie zwarć 1-fazowych w linii 220 kV, w odległościach: 0,1; 0,25; 0,5; 0,75 długości linii, licząc od transformatora blokowego oraz na końcu linii.

- Jednobiegunowy zapłon na otwartych stykach wyłącznika w stacji elektroenergetycznej podczas synchronizacji.

Wyniki obliczeń symulacyjnych

W tabeli 1 zamieszczono wyniki obliczeń największych przepięć występujących na uzwojeniach GN i DN transformatora blokowego oraz na cewkach uzwojenia GN. Wyniki przedstawiono w postaci współczynników przepięć obliczonych:

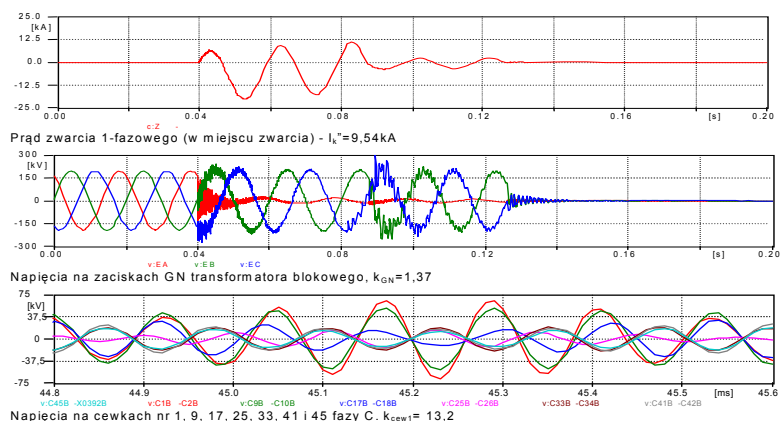
- przez odniesienie do wartości szczytowej fazowego napięcia znamionowego uzwojenia GN i DN transformatora i oznaczono odpowiednio k_{GN} oraz k_{DN} ,
- przez odniesienie do napięcia znamionowego cewki uzwojenia pierwotnego transformatora w stanie ustalonym, które przyjęto jako $\frac{\sqrt{2} \times 250}{\sqrt{3} \times 45}$ kV i oznaczono k_{cew} .

W tabeli 1 podano również numery cewek na których wystąpiły największe przepięcia.

Tabela 1. Współczynniki przepięć na zaciskach uzwojeń GN i DN transformatora blokowego oraz na najbardziej narażonych cewkach uzwojenia GN podczas rozmaitych operacji łączeniowych

Rodzaj operacji łączeniowej	k_{GN}	k_{DN}	k_{cew}/nr cewki
Załączenie nieobciążonego transformatora blokowego wyłącznikiem W_S	1,69	2,10	11,0/1
Wyłączenie obciążonego transformatora blokowego wyłącznikiem W_S	1,44	1,17	1,3/45
Załączenie generatora do sieci wyłącznikiem generatorowym W_G - synchronizacja	<1,1	<1,1	<1,1
Wyłączenie obciążonego generatora wyłącznikiem generatorowym W_G	<1,1	<1,1	<1,1
Wyłączenie 1-fazowego zwarcia w linii napowietrznej, w odległości $0,1l_L$	1,33	1,10	4,1/1
Wyłączenie 1-fazowego zwarcia w linii napowietrznej, w odległości $0,25l_L$	1,37	1,10	13,2/1
Wyłączenie 1-fazowego zwarcia w linii napowietrznej, w odległości $0,5l_L$	1,49	1,12	3,7/1
Wyłączenie 1-fazowego zwarcia w linii napowietrznej, w odległości $0,75l_L$	1,45	1,21	2,3/1
Wyłączenie 1-fazowego zwarcia na końcu linii napowietrznej	1,60	1,28	1,9/1
Jednobiegunowy zapłon w komorze wyłącznika sieciowego W_S	1,68	1,24	6,0/1

W celu zobrazowania charakteru zjawisk na rysunku 2 zamieszczono przykładowy wydruk przebiegów prądów i napięć występujących podczas wybranej operacji łączeniowej.



Rys. 2. Wyłączenie 1-fazowego zwarcia, w odległości 0,25 długości linii od transformatora blokowego

Podsumowanie

Obliczenia wykazały, że spośród rozpatrywanych przypadków największe przebiecia wewnętrzne w uzwojeniach GN transformatora występują podczas wyłączenia jednofazowych zwarcz z ziemią w linii napowietrznej 220 kV, gdy miejsce zwarcia znajduje się w odległości ok. $\frac{1}{4}$ długości linii od transformatora blokowego. Związane to jest z częstotliwością przebiec zewnętrznych na zaciskach GN transformatora blokowego, która w takim przypadku jest bardzo bliska częstotliwości rezonansowej transformatora (ok. 9,1 kHz). Przy zwarciach w linii w innych odległościach niż $\frac{1}{4} l_L$ od transformatora blokowego poziom przebiec wewnętrznych jest mniejszy wskutek odstrojenia układu od częstotliwości rezonansowej. Wysoki poziom przebiec wewnętrznych na cewkach uzwojenia GN odnotowano również podczas załączania nieobciążonego toru wyprowadzenia mocy wyłącznikiem w stacji elektroenergetycznej 220 kV ($k_{cew} = 11$).

Synchronizacja bloku z siecią przy pomocy wyłącznika 220 kV zainstalowanego na końcu linii blokowej, przy wystąpieniu 1-biegowego zapłonu na jego otwartych stykach wywołuje groźne przebiecia wewnętrzne, których poziom osiąga wartość 6 j.w. Prowadzenie synchronizacji bloku wyłącznikiem generatorowym pozwala uniknąć takich niebezpiecznych narażeń uzwojeń transformatora.

Operacje łączeniowe wyłącznikiem generatorowym takie jak załączanie generatora do sieci oraz jego wyłączenie pod obciążeniem nie powodują niebezpiecznych przebiec wewnętrznych w uzwojeniach transformatora. Współczynniki przebiec wewnętrznych nie przekraczają wówczas poziomu 1,1 j.w. Podobnie, wyłączenie obciążonego toru wyprowadzenia mocy wyłącznikiem w stacji 220 kV stwarza niewielkie zagrożenie przebieciowe uzwojeń, $k_{cew} = 1,3$.

Wyniki obliczeń wskazują że, największe przebiecia wewnętrzne występują na skrajnych cewkach uzwojenia GN, w większości na cewce pierwszej licząc od zacisku liniowego transformatora.

Należy zaznaczyć, że podczas wszystkich rozpatrywanych przypadków operacji łączeniowych i zakłóceń poziom przebiec zewnętrznych na zaciskach uzwojeń transformatora blokowego był umiarkowany, i nie przekraczał 1,69 j.w. w odniesieniu do uzwojenia GN oraz 2,1 j.w. na uzwojeniu DN. Ograniczniki przebiec zainstalowane na zaciskach wejściowych transformatora, dobrane zgodnie z zasadami, praktycznie nie chronią uzwojeń od przebiec wewnętrznych, ponieważ poziom przebiec zewnętrznych jest zdecydowanie niższy niż poziom ochrony ograniczników przebiec.

W celu ograniczenia wpływu przebiec wewnętrznych na izolację uzwojeń transformatorów dąży się do poprawy rozkładu napięć wzdłuż uzwojenia, dobiera się wyższe poziomy izolacji, stosuje się kondensatory odstrajające lub ograniczniki przebiec z tlenków metali przyłączane do najbardziej zagrożonych części uzwojeń. Rozwiązanie takie jest możliwe do wprowadzenia tylko w czasie produkcji transformatora lub podczas poawaryjnego remontu. Wymaga ono jednak wcześniejszej dokładnej znajomości spodziewanych narażeń napięciowych mogących wystąpić w uzwojeniu transformatora, w konkretnych warunkach układowych i lokalizacyjnych.

LITERATURA

- [1] Degeneff R. C.: A general method for determining resonance in transformer windings. *Transactions PAS*, 1979, vol. 96 – 2
- [2] D'Heure H., Even A.: Contribution to Studies on An Unusual Overvoltage Phenomenon in The Tapchanger on The HV Side of A 400 kV Station Transformer. *CIGRE 1984, Ref. 12 – 11*
- [3] Schei A. At al.: Resonant overvoltages in power station transformer initiated by switching transients in the connected cable network. *CIGRE 1984, Ref. 12 – 07*
- [4] Leohold J.: Berechnung elektromagnetischer swingungen in transformatorwicklungen. *ETZ-Archiv*, 1985, vol. 7 – 10
- [5] Halladay J., Shih C.: Resonant overvoltage phenomena caused by transmission line faults. *Transaction WPM*, 1985 vol. 209-2
- [6] Kozłowski M.: Wewnętrzne przebiecia rezonansowe w transformatorach. Przykład analizy zagrożeń. *Przegląd Elektrotechniczny Nr 9, 1997*
- [7] Popow M., van der Sluis L.: Improved calculation for no-load transformer switching surges. *IEEE TPD*, vol. 16, no.3, 2001
- [8] Maliszewski A., Majtczak M.: Przebiecia przenoszone w transformatorze blokowym. *XIII Konferencja Energoserwis S.A., Kliczków, 10-12. 09.2003*
- [9] Lapworth J., Wilson A.: Transformer internal overvoltages caused by remote energisation. *IEE PES Power Africa 2007 Conference and Exposition, Johannesburg, South Africa, 16-20 July 2007*
- [10] Popow M. at al.: Analysis of very fast transients in layer-type transformer windings. *IEEE TPD*, vol. 22, no.1, 2007
- [11] Florkowski M., Furgał J.: Analysis of transient voltage distributions in transformer windings at different voltage stimuli. *Przegląd Elektrotechniczny Nr 11b, 2010*

Autorzy: prof. dr hab. inż. Edward Anderson, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: edward.anderson@ien.com.pl; dr inż. Janusz Karolak, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: janusz.karolak@ien.com.pl; dr inż. Józef Wiśniewski, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: jwisniew@p.lodz.pl.