



Adam JAROS, Adam KETNER*, Krzysztof KRUPSKI

ABB Sp. z o.o., Oddział w Łodzi –Zakład Transformatorów Mocy (*emerytowany pracownik ABB Elta)

Poziom ochrony i poziom izolacji transformatora

Streszczenie. *Koncepcja koordynacji izolacji jest taka sama dla całego zakresu napięć stosowanych w transformatorach energetycznych. Inne są natomiast jej rozwiązania. Prowadzi to - w zależności od napięcia transformatora – do określania w różny sposób poziomów izolacji transformatora. Sposoby te opisano w referacie.*

Abstract. (Protection level and insulation level for transformer). *Conception of insulation co-ordination is the same for full range of transformer voltages but has other solutions. In dependence on voltage of transformer insulation level can be determined by different methods. These methods are described in the paper.*

Słowa kluczowe: koordynacja izolacji, poziom ochrony, poziom izolacji.

Keywords: insulation co-ordination, protection level, insulation level.

Wstęp

W eksploatacji, izolacja transformatora jest - przede wszystkim - poddana narażeniom udarowym piorunowym oraz łączeniowym. Ich pułap wyznaczają właściwości ochronne zastosowanych urządzeń przeciwprzepięciowych - **poziom ochrony** (U_{pl}). Izolacja transformatora ma sprostać tym narażeniom, a więc ma mieć odpowiednią wytrzymałość elektryczną - **poziom izolacji** (U_{wt}); ten mają - w myśl przepisów normalizacyjnych [1] - sprawdzić (zweryfikować) próby wytrzymałości elektrycznej. Trafne dostosowanie (koordynacja) izolacji urządzenia (transformatora) do właściwości zastosowanych do jego ochrony środków ma ogromne znaczenie. W praktyce kwestia ta sprowadza się najczęściej do określenia stosownego współczynnika zapasu (bezpieczeństwa) między poziomami: ochrony i udarowym poziomem izolacji danego transformatora. Im większy jest ten współczynnik, tym mniejsze prawdopodobieństwo uszkodzenia transformatora, lecz tym większy koszt ogólny urządzeń; koordynacja izolacji jest typowym zagadnieniem techniczno-ekonomicznym optymalizacji współczynnika bezpieczeństwa. Chociaż koncepcja koordynacji izolacji jest taka sama dla całego zakresu napięć budowanych obecnie transformatorów ($U_m = \langle 3,6...800 \rangle$ kV), to jej realizacja dla średnich, wysokich i bardzo wysokich napięć prowadzi do różnych rozwiązań. Rozwiązania te są przedstawione w niniejszym referacie.

Poziomy ochrony

Obecnie ochronę przeciwprzepięciową transformatora zapewniają zainstalowane w ich pobliżu beziskiernikowe i iskiernikowe ograniczniki przepięć. Można przyjąć, że pułapy przepięć na zaciskach transformatora nie przekraczają na ogół poziomu ochrony tych ograniczników [2, 3]. Podwyższenie poziomu ochrony może mieć miejsce tylko w przypadku pojawienia się bardzo stromych fal wędrownych i dużych, większych niż przewidują stosowne przepisy, odstępach transformator-ogranicznik. Poziom ochrony (U_{pl}) określa wzór(1):

$$(1) \quad U_{pl} > \frac{k_o \times k_{tov} \times U_m}{\sqrt{3}}$$

gdzie: k_o – współczynnik ochrony, k_{tov} – oczekiwana krotność przepięć dorywczych, U_m – najwyższe dopuszczalne napięcie uzwojenia.

Współczynnik ochrony określa jakość ogranicznika przepięć jako urządzenia do ochrony przeciwprzepięciowej; jest on mocno skorelowany z jego ceną. Zaś oczekiwana krotność przepięć dorywczych wyznaczają, przede wszystkim, przepięcia ziemnozwarciowe.

Poziomy izolacji

Odpowiednio do poziomu ochrony dostosowuje (koordynuje) się wytrzymałość izolacji; opisuje ją poziom izolacji (U_{wt}). Poziom izolacji jest k_b razy wyższy od poziomu ochrony (U_{pl}), a więc wiąże je zależność (2):

$$(2) \quad U_{wt} \geq k_b \times U_{pl}$$

gdzie: k_b – jest konwencjonalnym współczynnikiem bezpieczeństwa (zapasu).

Dla narażeń piorunowych (LI) jego wartość powinna wynosić co najmniej 1,25, a dla narażeń łączeniowych (SI) – 1,15.

Koncepcja koordynacji izolacji jest taka sama dla całego zakresu napięć stosowanych w transformatorach energetycznych; jej rozwiązania – w zależności od napięcia U_m – są jednak różne. Poszczególne rozwiązania uwzględniają specyficzne warunki środowiskowe eksploatacji transformatora, wielkość ich produkcji oraz wpływ narażeń napięciowych (udarowych i przemiennych) na konstrukcję uzwojeń, a także koszty przeprowadzania prób, głównie udarowych.

a) rozwiązanie dla średnich napięć

($U_m \leq 72,5$ kV)

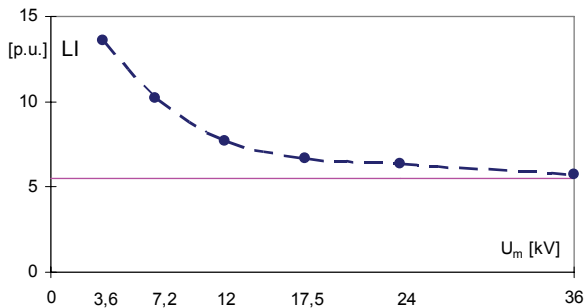
Optymalnym rozwiązaniem koordynacji izolacji dla transformatorów na średnie napięcia okazało się takie, w którym stopień ograniczania przepięć jest **mały**¹, a **duży**² jest poziom izolacji zacisków liniowych transformatora. Poziom ten wyznaczają przepięcia piorunowe, które w sieciach na te napięcia dominują nad przepięciami łączeniowym i przemiennymi. Poza tym dla tych napięć, a szczególnie dla $U_m \leq 36$ kV (transformatory rozdzielcze), przyjęto tak duże wartości LI, że nie ma potrzeby uwzględniać innych narażeń napięciowych, a zwłaszcza

¹ tanie ograniczniki przepięć o dużym współczynnikiem ochrony

² warunkowany jakością zastosowanego ogranicznika przepięć (wartość współczynnika ochrony) i przyjętym współczynnikiem bezpieczeństwa (zapasu) dla izolacji danego zacisku transformatora

łączeniowych. Krotność poziomu izolacji (składnika LI), wyrażona w jednostkach względnych ($\sqrt{2} \cdot U_m / \sqrt{3}$), dla transformatorów rozdzielczych przedstawia wykres na rysunku 1. Krotność ta dla $U_m = 3,6$ kV wynosi aż 13,6 i maleje wraz z jego wzrostem.

Ustalono, że weryfikacja składnika LI poziomu izolacji za pomocą próby udarem piorunowym (LIT) dotyczy tylko rozwiązania konstrukcyjnego (typu)³. Ustalono również, że w poszczególnych transformatorach danego typu zadanie to spełni w praktyce wystarczająco dobrze, przynajmniej dla izolacji głównej części uzwojenia przy badanym zacisku, **próba zastępcza** - napięciem przemiennym doprowadzonym (ACSS)⁴.

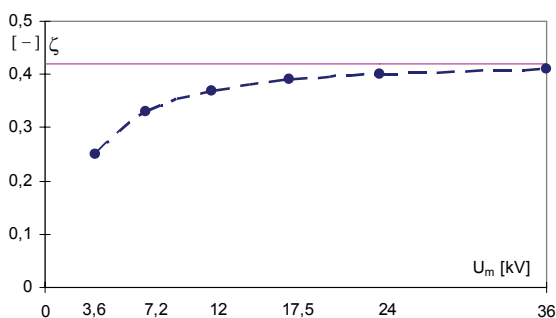


Rys. 1. Składnik LI poziomu izolacji zacisków liniowych transformatorów rozdzielczych ($U_m \leq 36$ kV) [1]

A zatem, poziom izolacji transformatorów na napięcia $U_m \leq 72,5$ kV opisują dwie wielkości LI i AC; składnik AC jest w tym przypadku koordynacyjnym napięciem przemiennym. Stosowane w praktyce europejskiej znormalizowane wartości składników poziomu izolacji zacisków liniowych dla poszczególnych napięć U_m podano w tabelicy 2 normy [1]. Zasadniczą kwestią dla próby zastępczej jest wyznaczenie koordynacyjnego napięcia pobierczego przemiennego AC, którą ma ona właśnie weryfikować. Zasada jednakowej ostrości powyższych prób wiąże ze sobą dwie wielkości LI i AC w parę. Ujmuje to zależność (3):

$$(3) \quad AC = \zeta_{LI-AC} \times LI$$

gdzie: ζ_{LI-AC} - współczynnik jednakowej ostrości prób: LIT i ACSS.



Rys.2. Wartości współczynnika ζ_{LI-AC} dla napięć stosowanych w transformatorach rozdzielczych ($U_m \leq 36$ kV) [1]

³ kwestia ta ma znaczenie dla wytwórni transformatorów rozdzielczych ($U_m \leq 36$ kV) - produkcja masowa

⁴ tania i prosta oraz najstarsza próba wytrzymałości elektrycznej izolacji głównej transformatorów

Podstawą określenia wartości powyższego współczynnika są charakterystyki napięciowo-czasowe $U_w=f(t)$ oraz doświadczenie i wiedza zarówno użytkowników, jak i wytwórców transformatorów. Dla napięć stosowanych w transformatorach rozdzielczych wartości współczynnika ζ_{LI-AC} przedstawiono graficznie na wykresie podanym na rysunku 2. Wartość omawianego współczynnika zależy od napięcia U_m transformatora; dla napięć $U_m > 36$ kV jego wartość jest praktycznie stała i wynosi około 0,4.

b) rozwiązanie dla wysokich napięć

($U_m \in (72,5 \dots 170)$ kV)

Transformatory na napięcia $U_m \in (72,5 \dots 170)$ kV pracują w sieciach elektroenergetycznych rejonowych, w których pułap przepięć łączeniowych praktycznie nie przekracza 80 % poziomu ochrony piorunowej. Poziom izolacji zacisków liniowych takich transformatorów opisują dwie wielkości LI i AC; składnik AC jest w tym przypadku koordynacyjnym napięciem przemiennym, a jego wartość określa wzór (4):

$$(4) \quad AC = \zeta_{SI-AC} \times 0,8 \times LI$$

gdzie: ζ_{SI-AC} - współczynnik jednakowej ostrości prób SIT i ACSS; dla U_m z przedziału $(72,5 \div 170)$ kV $\zeta_{SI-AC} \approx 0,53$.

Norma [1] dla omawianych transformatorów przewiduje kilka zestawów (par) znormalizowanych poziomów izolacji zacisków liniowych; uwzględniają one surowość warunków występujących w systemie elektroenergetycznym i jego znaczenie (ważność) oraz właściwości zastosowanych środków ochrony przeciwprzebiegowej. Poziomy te weryfikują, przeprowadzane na każdym transformatorze, próby: napięciem piorunowym LIT i napięciem przemiennym - w zależności od rodzaju izolacji uzwojeń - doprowadzonym (izolacja niestopniowana) lub indukowanym (izolacja stopniowana).

c) rozwiązanie dla bardzo wysokich napięć

($U_m > 170$ kV)

Transformatory na bardzo wysokie napięcia ($U_m > 170$ kV) są na ogół produkowane w niewielkich seriach, liczących kilka ... kilkanaście sztuk; ostatnio zdarzają się i to dość często wykonania jednostkowe. Koszty ich wytwarzania są bardzo duże i zależą dość istotnie od poziomu izolacji transformatora. Dla tych transformatorów optymalnym rozwiązaniem okazuje się takie, w którym poziom izolacji jest stosunkowo niski i precyzyjnie określony, ale także i zróżnicowany⁵. Powyższe potrzeby zawiera aktualna oferta dotycząca urządzeń przeciwprzebiegowych, a ich dobór do konkretnych warunków eksploatacyjnych dokonuje - odpowiednio do posiadanych środków finansowych - użytkownik.

Poziom izolacji zacisków liniowych transformatorów na napięcia $U_m > 170$ kV opisują dwie wielkości: SI i LI; obie są weryfikowane za pomocą prób udarowych - odpowiednio SIT i LIT. Dla poszczególnych napięć U_m przyjęto kilka (2÷4) różnych wartości wielkości SI_i, a dla każdej z nich na - ogół dwie wartości wielkości LI_j [1].

d) rozwiązanie dla izolacji zacisku neutralnego

Wyprowadzony na zewnątrz (pokrywę) zacisk neutralny transformatorów energetycznych jest albo uziemiony bezpośrednio lub pośrednio (odziemiony). Na uziemionym bezpośrednio zacisku neutralnym wystąpi stosunkowo

⁵ zapewniają to drogie ograniczniki przepięć dobrej jakości (mała wartość współczynnika ochrony) oraz mały współczynnik bezpieczeństwa (zapasu) dla izolacji zacisku transformatora.

wysoki potencjał⁶ względem uziemionej konstrukcji transformatora tylko podczas niesymetrycznych zwarciach doziemnych. Przyjęto, że wtedy poziom izolacji zacisku neutralnego określa wielkość AC; jej wartość ma wynosić, niezależnie od U_m danego uzwojenia, co najmniej 38 kV, a weryfikuje ją - próba ACSS.

Zaś poziom izolacji odziemionego zacisku neutralnego opisują dwie wielkości LI i AC; wiodącą jest oczywiście wielkość LI, wynikająca z właściwości chroniącego ten zacisk ogranicznika przepięć. Ustalono ponadto, że poziom ten weryfikować ma, przede wszystkim, **próba zastępcza ACSS⁷**, i gdy zostało to uzgodnione (użytkownik, wytwórca) także *próba specjalna* LIT. Przeprowadzenie tej *próby specjalnej* jest - zdaniem autorów - zasadne, gdy w punkcie neutralnym (gwiazdowym) znajduje się regulacja przekładni pod obciążeniem.

Formalna weryfikacja poziomów izolacji transformatora nie jest czasami wystarczająca dla pełnej oceny układu izolacyjnego. Chodzi tu o próby **kontrolne** (uzupełniające) [1, 4], których nie brano pod uwagę przy formułowaniu koncepcji i rozwiązań koordynacji izolacji, a mianowicie:

- kontrolę wytrzymałości izolacji wzdłużnej i międzyfazowej przy koordynacyjnych napięciach probierczych przemiennych transformatorów z izolacją niestopniowaną na napięcia $U_m \leq 170$ kV,
- bezpośrednie sprawdzenie odporności układu izolacyjnego na przepięcia dorywcze i naprężenia ciągłe podczas pracy w transformatorach na napięcia $U_m > 170$ kV,
- potwierdzenie braku wyładowań (PD) w warunkach roboczych w transformatorach na napięcia $U_m > 170$ kV.

⁶ spadek napięcia na szynie łączącej zacisk neutralny z uziemieniem rozdzielni; dla wielkich transformatorów spadek ten wynosi kilka ... kilkanaście kV.

⁷ napięcie probiercze dla tej próby zastępczej $AC = \zeta_{LI-AC} \times LI$; patrz wzór (3)

Uwagi końcowe

1. Poziom ochrony to wymagania dla urządzeń przeciwprzepięciowych transformatora pracującego w określonej sieci (w określonych warunkach środowiskowych eksploatacji), a - poziom izolacji to wymagania dla układu izolacyjnego tego transformatora,
2. Próba napięciem przemiennym ma na celu sprawdzenie odporności na przepięcia dorywcze i długotrwałe oddziaływanie napięcia roboczego oraz zastąpienie kosztownych i kłopotliwych prób udarowych, przy najmniej jako prób wyrobu transformatorów na napięcia $U_m \leq 170$ kV.

LITERATURA

- [1] PN-EN 60076-3:2002, Transformatory – Część 3: Poziomy izolacji, próby wytrzymałości elektrycznej i zewnętrzne odstępy izolacyjne w powietrzu, Polski Komitet Normalizacyjny, Warszawa 2002
- [2] Hasterman Z., Mosiński F., Maliszewski A.: Wytrzymałość elektryczna transformatorów energetycznych, WNT, Warszawa 1983
- [3] Jezierski E.: Transformatory, WNT, Warszawa 1983 (rozdziały 12 i 13 opracowane przez Z. Hastermana)
- [4] Ketner A., Narażenia napięciowe izolacji transformatora podczas prób odbiorczych, Forum – Transformatory Energetyczne, SEP Oddział Łódzki, 2006

Autorzy: mgr inż. Adam Jaros, dr inż. Adam Ketner, mgr inż. Krzysztof Krupski, ABB Sp. z o.o., Oddział W Łodzi – Zakład Transformatorów Mocy, ul. Aleksandrowska 67/93, 91-205 Łódź