

JERZY SZMIT

Zakłady Konstrukcyjno Doświadczalne
Przem. Maszyn Elektrycznych, Katowice

TRANSFORMATORY Z UZWOJENIEM ALUMINIOWYM

Streszczenie. Tradycyjne rozwiązanie konstrukcyjne transformatora z uzwojeniem aluminiowym. Transformator o wymiarach dostosowanych do uzwojeń aluminiowych. Możliwość skonstruowania transformatora z uzwojeniem aluminiowym o napięciu zwarcia i stratach takich, jak w transformatorze z uzwojeniem miedzianym.

1. Wstęp. Przesłanki ogólne i historia zagadnienia

Zastosowanie aluminium zamiast miedzi do wykonania uzwojeń powraca wciąż od szeregu lat jako zagadnienie konstrukcyjne. Przesłanką ogólną jest tu znaczne rozpowszechnienie glinu jako pierwiastka: w skorupie ziemskiej glin stanowi ok. 8,1%, miedź tylko 0,01%. U nas dochodzi jeszcze zagadnienie dewizowe: miedź kupujemy na zachodzie za wolne dewizy, boksyt otrzymujemy z Węgier drogą transakcji wymiennych. Istnieją jednak również poważne trudności na tej drodze: są to trudności natury technologicznej związane z wykonaniem połączeń w uzwojeniach aluminiowych oraz związane z wzrostem kosztów wytwarzania transformatorów.

Na szerszą skalę rozpoczęto stosowanie aluminium w naszym przemyśle w czasie okupacji: przyjęta wówczas metoda nie była szczęśliwą i spowodowała pewne zdyskredytowanie całego zagadnienia na dłuższy okres czasu. Obecnie należy już zrewidować utarte poglądy.

2. Tradycyjne rozwiązanie konstrukcyjne transformatora z uzwojeniem aluminiowym

Stosowane dotąd w wielu krajach rozwiązanie tradycyjne polega na nawinięciu uzwojenia aluminiowego na rdzeniu zwymiarowanym dla uzwojeń miedzianych bez zmiany strumienia magnetycznego: napięcia robocze oraz przekroje obu uzwojeń pozostają bez zmiany, nie ulegają również zmianie straty w żelazie. Straty w uzwojeniach pozostać muszą również bez zmiany jeśli transformator nie ma się nadmiernie nagrzewać: oznacza to konieczność obniżenia mocy znamionowej transformatora odpowiednio do mniejszej przewodności aluminium. Stosunek mocy przy uzwojeniu aluminiowym i miedzianym można określić w przybliżeniu jak następuje

$$\frac{P_{Al}}{P_{Cu}} = \sqrt{\frac{34}{57}} = 0,78$$

Ponieważ stosunek mocy znamionowych transformatorów w znormalizowanym szeregu mocy R_{10} wynosi 0,8, oznacza to konieczność zmniejszenia mocy znamionowej o 1 stopień w szeregu.

Wykonany w ten sposób transformator aluminiowy ma w porównaniu z transformatorem miedzianym tej samej mocy następujące własności:

Straty jałowe i obciążeniowe powiększone w stosunku:

$$(1,25)^{3/4} = 1,18$$

tj. o 18%

Nakład żelaza czynnego i materiałów konstrukcyjnych rośnie również o 18%, nakład robocizny o ok. 12%.

1 kg aluminium zastępuje przy tym

$$\frac{8,9}{2,7 \cdot 1,18} = 2,18 \text{ kg miedzi}$$

tj. dla zastąpienia 1 kg miedzi użyć należy

$$\frac{1}{2,78} = 0,36 \text{ kg aluminium}$$

Napięcie zwarcia transformatora aluminiowego jest równe 0,8 napięcia zwarcia transformatora miedzianego.

Wynika stąd, że parametry eksploatacyjne takiego transformatora z uzwojeniem aluminiowym są mniej korzystne niż transformatora miedzianego: poza tym można wykazać, że jest on również mniej odporny na zwarcia.

Najwyższa temperatura jaką może osiągnąć uzwojenie w czasie zwarcia w sieci nie może przekroczyć 250°C dla miedzi i 200°C dla aluminium.

Przypuśćmy, że przyrost temperatury uzwojenia ponad olej wynosi przy znamionowym obciążeniu 20°C, uzwojenia ponad otoczenie 65°C.

Szybkość wzrastania temperatury uzwojenia miedzianego w czasie zwarcia wyraża się w założeniu adiabatycznego przebiegu wzorem przybliżonym

$$\frac{j_z^2}{125} = \left(\frac{100}{U_z}\right)^2 \frac{j_m^2}{125}$$

gdzie:

j_z - gęstość prądu ustalonego przy zwarciu transformatora

j_m - gęstość prądu przy obciążeniu znamionowym

U_z - napięcie zwarcia w %.

Dla uzwojenia aluminium szybkość wzrostu temperatury analogicznie

$$\frac{J_{za}^2}{62,5} = \left(\frac{100}{U_{za}}\right)^2 \frac{J_a^2}{62,5}$$

Gęstość prądu w uzwojeniu miedzianym leży obecnie w transformatorach średniej mocy przeciętnie w granicach ok. 3 - 3,5 A/mm²: w uzwojeniu aluminium jest ona również przy obniżeniu mocy o 1 stopień

$$J_a = 0,8 J_m = 2,4 + 2,8 \text{ A/mm}^2$$

Napięcie zwarcia transformatora aluminium jest o 20% niższe od napięcia zwarcia transformatora miedzianego tej samej wielkości

$$U_{za} = 0,8 U_{zm}$$

Stąd:

$$\frac{J_{za}^2}{62,5} = \left(\frac{100}{0,8 U_{zm}}\right)^2 \frac{0,8^2 J_m^2}{62,5} = \left(\frac{100}{U_z}\right)^2 \frac{J_m^2}{62,5} = 2 \frac{J_{zm}^2}{125}$$

oznacza to, że szybkość wzrastania temperatury uzwojenia w transformatorze aluminiowym jest ok. dwukrotnie większa niż w transformatorze miedzianym. Ponieważ z drugiej strony wobec równości strat jałowych i obciążeniowych przyrosty temperatury obu transformatorów są przy obciążeniu znamionowym równe, przeto dopuszczalny czas zwarcia transformatora aluminiowego wyniesie przy temperaturze otoczenia 40°C i przyroście temperatury uzwojenia 60°C

$$t_{za} = (200 - 40 - 60) \frac{62.5}{J_{za}^2} = \frac{100 \cdot 125}{2 J_{zm}^2}$$

podczas gdy dla uzwojenia miedzianego

$$t_{zm} = (250 - 40 - 60) \frac{125}{J_{zm}^2} = \frac{150 \cdot 125}{J_{zm}^2}$$

Stąd:

$$t_{za} = \frac{100}{150} \frac{150 \cdot 125}{2 \cdot J_{zm}^2} = 0,33 t_{zm}$$

oznacza to, że dopuszczalny czas zwarcia "tradycyjnego" transformatora po wymianie uzwojenia na aluminiowe jest znacznie krótszy od czasu zwarcia transformatora miedzianego. Z punktu widzenia eksploatacyjnego jest to oczywiście bardzo niedogodne.

Podobnie niekorzystnie wygląda sprawa wytrzymałości mechanicznej transformatora aluminiowego na siły zwarcia.

Jeżeli oba transformatory, aluminiowy i miedziany mają jednakowe wymiary i liczby zwojów to i liczbowa wartość ustalonego i udarowego prądu zwarcia jest dla obu ta sama, a wobec równości przekrojów wywołują one w uzwojeniach takie same naprężenie.

Jednak wytrzymałość mechaniczna na rozerwanie przewodu aluminiowego wynosi ok. 8 - 10 kg/mm^2 podczas gdy wytrzymałość miedzi jest równa ok. 20. Współczynnik bezpieczeństwa spada więc przy uzwojeniu aluminiowym w stosunku wytrzymałości na rozerwanie, jest więc mniej więcej o połowę niższy niż przy miedzi.

Jak wynika z tych rozważań własności eksploatacyjne transformatorów aluminiowych o takich samych wymiarach, jakie ma transformator miedziany przedstawiają się bardzo niekorzystnie.

3. Transformator aluminiowy o wymiarach dostosowanych do uzwojeń z tego materiału

O przydatności transformatora w eksploatacji decydują głównie jego straty jałowe i obciążeniowe oraz napięcie zwarcia: transformator z uzwojeniem aluminiowym powinien mieć z punktu widzenia eksploatacji takie same straty, jakie ma transformator miedziany.

Rozważmy więc jakie powinny być wymiary tak zaprojektowanego transformatora aluminiowego w stosunku do wymiarów transformatora miedzianego tej samej mocy.

Jak wiadomo z teorii (E. Jeziński, Transformatory t. II, str. 277) szerokość uzwojenia dolnego i górnego napięcia pozostają stałe przy stałej wartości napięcia zwarcia i strat w uzwojeniach. Oznacza to, że przy jednakowym napięciu roboczym, a więc i jednakowych odległościach między uzwojeniami i rdzeniem oraz uzwojeń między sobą szerokość okna transformatora nie powinna się również zmienić przy przejściu z uzwojenia miedzianego na aluminiowe.

Jeżeli straty uzwojeniowe obu transformatorów mają być jednakowe, to sumaryczny przekrój uzwojenia aluminiowego musi być większy w stosunku odwrotnym do przewodności

$$\frac{\lambda_{Al}}{\lambda_{Cu}} = \frac{57}{34} = 1,68$$

Ponieważ szerokość uzwojeń pozostaje bez zmiany, oznacza to, że długość uzwojenia powinna wzrosnąć o ok. 60%: napięcie zwarcia maleje przy tym w tym samym mniej więcej stosunku, jeżeli jednak ma ono pozostać takie samo, jak w transformatorze aluminiowym, to trzeba zwiększyć liczbę zwojów uzwojenia w stosunku

$$\frac{Z_{Al}}{Z_{Cu}} = \sqrt{\frac{L_{Al}}{L_{Cu}}} = \sqrt{1,68} = 1,29$$

A przy zachowaniu tego samego kształtu przekroju kolumny i tej samej indukcji średnica kolumny powinna wynosić

$$\frac{D_{Al}}{D_{Cu}} = \sqrt{\frac{1}{1,29}} = 0,89$$

Długość kolumny transformatora aluminiowego będzie ze względu na wpływ wstawek końcowych ok. 1,5 razy większa od długości kolumny przy miedzi, a straty w kolumnach zmieniają się przy tej samej indukcji proporcjonalnie do objętości kolumny

$$\frac{\Delta P_{zKAl}}{\Delta P_{zKCu}} = 0,89^2 \cdot 1,5 = 1,18$$

Straty w kolumnach będą więc o ok. 18% większe niż przy miedzi.

Przy zachowaniu tego samego dla obu transformatorów współczynnika wzmocnienia jarzma

$$\beta = \frac{S_{jAl}}{S_{KAl}} = \frac{S_{jCu}}{S_{KCu}}$$

i tej samej indukcji stosunek strat w jarzmie

$$\frac{\Delta P_{zjAl}}{\Delta P_{zjCu}} = 0,89^2 = 0,79$$

Oznacza to, że straty w jarzmie zależą o ok. 20%. Jeżeli straty w jarzmach były w transformatorze miedzianym równe stratom w kolumnach, to stosunek całkowitych strat w żelazie będzie

$$\frac{\Delta P_{zAl}}{\Delta P_{zCu}} = \frac{0,79 + 1,18}{1 + 1} = \frac{1,97}{2} = 0,985$$

Oznacza to, że straty w żelazie transformatora aluminiowego będą praktycznie równe stratom w żelazie transformatora miedzianego. Ciężar żelaza czynnego zmienia się przy stałej indukcji tak samo jak straty tj. pozostaje zgrubsza taki sam jak przy miedzi.

Obliczmy stosunek gęstości prądu z warunku równości oporów czynnych przy 75°C

$$\frac{z_{Al} \cdot l_{sr}}{34 \cdot s_{Al}} \cdot \frac{245 + 75}{245 + 15} = \frac{z_{Cu} \cdot l_{sr}}{57 \cdot s_{Cu}} \cdot \frac{235 + 75}{235 + 15}$$

Stąd przy $z_{Al} = 1,29 \cdot z_{Cu}$ otrzymujemy $s_{Al} = 2,15 s_{Cu}$

$$J_{Al} = 0,475 J_{Cu}$$

Ciężar uzwojenia aluminiowego wynika z równości strat w uzwojeniach

$$2,44 J_{Cu}^2 G_{Cu} = 13,4 J_{Al}^2 \cdot G_{Al}$$

a stąd $G_{Al} = 0,84 G_{Cu}$

Nakład aluminium jest przy takim rozwiązaniu konstrukcyjnym znacznie większy niż w dawnej konstrukcji dla której $G_{Al} = 0,36 G_{Cu}$

Podane wyżej rozumowanie i wyprowadzone liczby mają oczywiście charakter przybliżony. Poniżej podano zestawienie obliczonych ściśle wielkości charakterystycznych dwóch transformatorów 160 kVA przy uzwojeniu miedzianym i aluminiowym i przy rdzeniu z blachy zimnowalcowanej 0,8 W/kg.

Mater. uzwojenia	Cu	Al
Straty jałowe	655	660 W
Straty obciążeniowe	3350	3025 W
Napięcie zwarcia	5,97	5,85%
Ciężar blach rdzenia	340	327 kg
Ciężar uzwojenia	122	90 kg
Ciężar oleju	448	499 kg
Średnica kolumny	152	135 mm
Długość kolumny	450	680 mm
Rozstaw osi	335	335 mm

Jak widać z tych liczb racjonalnie zaprojektowany transformator z uzwojeniem aluminiowym może mieć takie same straty jałowe i obciążeniowe oraz napięcie zwarcia, przy czym nakład blachy magnetycznej również nie jest większy.

Pozostaje jeszcze sprawdzić jego zachowanie się przy zwarcia. Gęstość prądu w uzwojeniu aluminiowym

$$j_{Al} = 0,475 j_{Cu} = 0,475(3 + 3,5) \approx (1,4 - 1,65) \text{ A/mm}^2$$

jest więc znacznie niższa, niż przy rozwiązaniu tradycyjnym.

Szybkość narastania temperatury w uzwojeniu aluminiowym:

$$\frac{J_{zAl}^2}{62,5} = \left(\frac{100}{U_z}\right)^2 \frac{J_{Al}^2}{62,5} = \left(\frac{100}{U_z}\right)^2 \frac{J_{Cu}^2}{125} \cdot 2 \cdot 0,475^2 \approx 0,45 \frac{J_{Cu}^2}{125}$$

jest zgrubsza o połowę mniejsza niż w uzwojeniu miedzianym

$$V_{\nu Al} = 0,45 V_{\nu Cu}$$

Stąd czas potrzebny do osiągnięcia przy zwarciu temperatury 200°C.

$$t_{zAl} = (200 - 40 - 60) \frac{1}{V_{\nu Al}} = \frac{100}{0,45 V_{\nu Cu}}$$

Ten sam czas dla uzwojenia miedzianego i dopuszczalnej temper. 250°C

$$t_{zCu} = (250 - 40 - 60) \frac{1}{V_{\nu Cu}} = \frac{150}{V_{\nu Cu}}$$

Stąd

$$t_{zAl} = t_{zCu} \cdot \frac{100}{0,45 \cdot 150} = 1,5 t_{zCu}$$

Zatem dopuszczalny czas zwarcia transformatora aluminiowego jest dłuższy niż przy uzwojeniu miedzianym i nie zachodzi potrzeba przestawiania przełączników czasowych w wyłącznikach.

Prądy zwarcia transformatora aluminiowego i miedzianego są wobec równości napięć zwarcia równe.

Wg Transformatorów Jezierskiego t. 1 str.218 siła promieniowa

$$F = 2,04 \cdot 10^{-8} (J_z)^2 \frac{I_{gr}}{C} K$$

Zatem stosunek sił promieniowych w obu transformatorach

$$\frac{F_{Al}}{F_{Cu}} = \left(\frac{z_{Al}}{z_{Cu}}\right)^2 \cdot \frac{K_{Al}}{K_{Cu}} = 1,29^2 \frac{K_{Al}}{K_{Cu}}$$

Stosunek $\frac{K_{Al}}{K_{Cu}}$ waha się w niezbyt szerokich granicach i w pierwszym przybliżeniu można przyjąć, że równa się on ok.2/3, wtedy stosunek sił promieniowych

$$\frac{F_{Al}}{F_{Cu}} = 1,29^2 \cdot \frac{2}{3} \approx 1,1$$

Naprężenie rozrywające będzie odwrotnie proporcjonalne do sumarycznego przekroju i proporcjonalne do siły F.

Ponieważ stosunek wytrzymałości na rozerwanie aluminium i miedzi jest równy ok.0,5 więc współczynnik bezpieczeństwa na rozerwanie przy zwarciu udarowym będzie zgrubsza taki sam.

Jak stąd wynika racjonalnie zaprojektowany transformator aluminiowy nie jest przy zwarciu mniej wytrzymały od miedzianego tak pod względem wytrzymałości termicznej, jak i dynamicznej.

4. Wnioski

Podane wyżej rozważania i wyniki obliczeń dowodzą, że możliwe jest skonstruowanie transformatora, z uzwojeniem wykonanym z aluminium, którego straty i napięcie zwarcia byłyby równe stratom i napięciu zwarcia transformatora z uzwojeniem miedzianym. Nakład blachy transformatorowej może być również taki sam, a koszt ogólny, dzięki niższej cenie materiału nawojowego, niewiele tyl-

ko różni się od kosztu wytwarzania transformatora z uzwojeniami nawiniętymi miedzią, natomiast dość znacznie większa jest pracochłonność uzwojeń.

Ponieważ własności termiczne i wytrzymałość przy zwarciu tak zaprojektowanego transformatora aluminiowego są nawet nieco lepsze od odpowiednich własności transformatora miedzianego, przeto obie konstrukcje uznać należy z punktu widzenia eksploatacji za równoważące i nic nie stoi na przeszkodzie do szerokiego zastosowania transformatora aluminiowego w praktyce energetycznej.

Pewne poprawki w tym rachunku wprowadzić mogą jeszcze tylko względy ekonomiczne związane z większą pracochłonnością transformatora aluminiowego i wynikające stąd zagadnienie opłacalności ich wytwarzania, ale to jest już oddzielne zagadnienie.

Трансформаторы с алюминиевыми обмотками

Классические решения для алюминиевых обмоток. Возможность конструкции трансформатора с алюминиевой обмоткой с аналогичными параметрами как для медного трансформатора.

Les transformateurs á l'aluminium

Solution traditionnelle et solution nouvelle, ayant pour but les transformateurs á l'aluminium avec les paramètres inchangées des transformateurs á cuivre.