względem chwili powstania zwarcia zależy od wielu czynników, takich jak usytuowanie miejsca zwarcia, ekranujące działanie elementów konstrukcyjnych, czy też zdolność kadzi do odkształcania się.

Zadziałanie może być spowodowane również przyczynami niemającymi nic wspólnego z uszkodzeniami wewnętrznymi, np. przepływem oleju przy nagłym wzroście obciążenia transformatora, drganiami uzwojeń, przez które przepływa bardzo duży prąd (udar prądu magnesowania, prąd zwarcia zewnętrznego), ruchem oleju spowodowanym włączeniem pomp olejowych.

W transformatorach bezkonserwatorowych, pracujących z poduszką gazową, zamiast przekaźników Buchholza stosuje się przekaźniki ciśnieniowe, reagujące na poziom ciśnienia wewnątrz kadzi i/lub na szybkość wzrostu tego ciśnienia. Rozwiązanie to jest rozpowszechnione na kontynencie amerykańskim.

Rodzaje uszkodzeń transformatora, przed którymi chroni go zabezpieczenie

Zwarcia

Zwarcia wewnątrz kadzi mogą być zwarciami na wyprowadzeniach uzwojeń, zwarciami zwojowymi oraz zwarciami pomiędzy uzwojeniem a kadzią. Pierwsze z nich, oprócz skutków takich jak te wywołane zwarciami w polu transformatora, powodują znaczny stopień uszkodzeń wewnątrz kadzi. Są one przyczyną zniszczenia izolacji, przewodów, a niekiedy i rdzenia. Mogą także spowodować znaczny wzrost ciśnienia wewnątrz kadzi, wywołany energią łuku, rozkładającą olej na produkty gazowe. Zwarcia te, podobnie do zwarć w polu, charakteryzują się znacznymi prądami, więc są dość łatwo wykrywalne przez zabezpieczenia.

Zwarcia zwojowe mogą w skrajnym przypadku dotyczyć jednego zwoju. Wówczas na skutek transformacji występuje takie zjawisko, że prąd w zwartych zwojach (czy też zwoju) osiąga duże wartości, na zaciskach zaś pojawia się prąd o niewielkiej wartości, często mniejszy od prądu znamionowego. Jeśli jednak zwarcie to wystąpi tylko w jednym równoległym przewodzie składającym się na uzwojenie, prąd zwarciowy mierzony na zaciskach transformatora może być nawet mniejszy niż 10% prądu znamionowego. Natomiast poprzez łuk płynie bardzo duży prąd, niekiedy parę setek krotności prądu znamionowego. Spadek napięcia na występującym łuku ma zwykle wartość zbliżoną do 100 V, co pozwala

oszacować energię wyładowującą się wewnątrz kadzi. Na każdą kilowatosekundę energii wydzielanej na łuku przypada ok. 75 cm^3 gazu będącego produktem rozkładu oleju.

Można zatem ocenić te ilości gazu powstające przy zwarciu zwojowym i grożące spowodowaniem wybuchu kadzi, mimo że wynik pomiaru prądu na zaciskach transformatora na to nie wskazuje. Jednocześnie prąd zwarciowy płynący przez uszkodzony zwój (lub zwoje) powoduje szybki wzrost temperatury przewodów. Osiągnięcie temperatury topnienia miedzi (1080°C) jest możliwe już po czasie rzędu 1 s. Zwarciu wewnętrznemu między uzwojeniem a kadzią towarzyszy prąd zależny od liczby zwartych zwojów oraz od tego, czy punkt gwiazdowy jest uziemiony. Jeśli tak jest, to zwarcie można traktować jako zwarcie zwojowe pewnej liczby zwojów.

Dla doboru zabezpieczeń i ich nastawienia należy przyjąć kryterium zwarcia na zaciskach oraz zwarcia wewnętrzne zwojowe, obejmujące pojedynczy zwój.

Wzrost strumienia w rdzeniu

Rdzenie współczesnych transformatorów, w których maksymalna znamionowa indukcja sięga 1,6−1,75 T, pracują blisko poziomu nasycenia, wynoszącego 2,0−2,1 T dla zimnowalcowanych blach transformatorowych. Jeśli w czasie pracy indukcja ulegnie zwiększeniu na skutek wzrostu napięcia i/lub zmniejszenia częstotliwości, to nastąpi zjawisko nasycania się rdzenia, zwłaszcza w tych jego częściach, gdzie występują zwężenia przekroju. Podczas nasycenia zmienia się rozpływ strumienia i zwiększa jego część zamykającą się przez powietrze. Jest to szczególnie groźne w otoczeniu śrub mocujących, przez które w normalnych warunkach przepływa maleńka część strumienia. Po nasyceniu sytuacja ulega zmianie, gdyż większy strumień przechodzący przez stalowe lite śruby powoduje powstawanie znacznych prądów wirowych i nagrzewanie się tych fragmentów konstrukcji. Wzrost temperatury może być tak duży, że zostaną zniszczone podkładki izolujące konstrukcję od rdzenia, tworzące diamagnetyczną przegrodę dla strumienia. Mogą więc powstać lokalne obszary, w których nawet po zmniejszeniu indukcji strumień przechodzi przez elementy, wywołując w nich nadal znaczne prądy wirowe i nagrzewając je. Taki długotrwały stan podwyższa temperaturę w sąsiedztwie izolacji przewodów, prowadząc zarówno do jej stopniowego osłabiania, a niekiedy nawet do zwarć wewnętrznych, jak i do skrócenia trwałości użytkowej transformatora. Z tego względu dopuszczenie długotrwałego wzrostu indukcji w rdzeniu powyżej granicy 2 T jest dla transformatora groźne. Rozpatrując pomiar prądu na zaciskach transformatora należy stwierdzić, że nadmierna wartość strumienia powiększa prąd magnesowania, który w warunkach normalnych, przy parametrach

znamionowych, ma bardzo małą wartość (w nowoczesnych dużych transformatorach najczęściej mniej niż 1% prądu znamionowego). Jednak dziesięcioprocentowy wzrost indukcji w rdzeniu powoduje przeważnie trzykrotny wzrost tego prądu, natomiast zwiększenie indukcji o 20% − aż dziesięciokrotny wzrost jego wartości skutecznej. Jednocześnie następuje zwiększenie zawartości wyższych harmonicznych nieparzystych w przebiegu tego prądu. W skrajnych przypadkach nadmiernej indukcji w rdzeniu wartość skuteczna prądu magnesowania jest zbliżony do poziomu 50% prądu znamionowego, głównie dzięki piątej harmonicznej najbardziej typowej dla tego zjawiska.

Przegrzanie uzwojeń

Energia wydzielana na rezystancji uzwojeń jest przyczyną wzrostu temperatury wewnątrz kadzi. Powstające ciepło jest oddawane izolacji stałej i olejowi, który przez system naturalnego, a nawet częściej wymuszonego obiegu oleju powoduje efekt chłodzenia. Najgorętsza jest wierzchnia warstwa oleju, ale ze względu na cieplne zagrożenie stanu izolacji istotniejsze jest to miejsce na powierzchni przewodu uzwojenia, w którym lokalnie temperatura osiąga największą wartość. W stanie normalnym temperatura górnej warstwy oleju może wynosić 90°C, co odpowiada temperaturze ok. 105°C w najgorętszym miejscu przewodu. Jeśli natomiast temperatura górnej warstwy przekroczy 105°C, oznacza to, że najgorętszy punkt ma zapewne temperaturę ok. 140°C i można ją uznać za granicznie dopuszczalną. Taki wzrost temperatury uzwojeń może być wywołany przeciążeniem prądowym lub zmniejszeniem intensywności chłodzenia, np. na skutek całkowitego lub częściowego wyłączenia pomp wymuszających obieg oleju.

Ogólna ocena sytuacji w zakresie użytkowania zabezpieczeń

Kilka lat temu *„Energopomiar-Elektryka” Sp. z o.o.* − na zlecenie *PSE S.A.* − przeprowadził:

- inwentaryzację zabezpieczeń zainstalowanych na transformatorach w krajowej energetyce,
- badania jakości zabezpieczeń typu Buchholz różnych producentów.

Wyniki inwentaryzacji zabezpieczeń transformatorów były bardzo niepomyślne. Istnieje nadal sporo zabezpieczeń, których wiek sięga kilkudziesięciu lat i nigdy nie były badane