

Szczególny przypadek awarii transformatora elektrowni wiatrowej

Artur Polak

1. Wstęp

Transformatory żywiczne (suche) ze względu na ich zalety pożarowe i ekologiczne są bardzo chętnie stosowane w sieciach rozdzielczych SN, gdyż nie mają oleju. Uzwojenia transformatorów suchych są narażone na bezpośrednie działanie czynników zewnętrznych, należy im zapewnić odpowiednie warunki w miejscu zainstalowania transformatora. Warunki środowiskowe powinny uwzględniać następujące elementy: temperaturę otoczenia, wilgotność powietrza, brak zapylenia oraz przewietrzanie komory, w której zainstalowany jest transformator. W artykule odniesiono się do awarii transformatora zainstalowanego w elektrowni wiatrowej, w którym nastąpiło zwarcie katastrofalne. W transformatorze uszkodzone zostało uzwojenie średniego napięcia (15 kV) w kolumnie środkowej. Dokumentacja uszkodzenia transformatora udostępniona do przeprowadzenia ekspertyzy zawierała m.in. protokoły oględzin uszkodzonego transformatora, opinie biegłego sądowego i biegłych powołanych przez użytkownika transformatora oraz producenta przedmiotowego transformatora.

Transformator, którego awarię opisano, to transformator żywiczny o następujących parametrach:

- moc znamionowa – $S_N = 2500$ kVA, moc poszczególnych uzwojeń: 2198/1985/214 kVA;
- górne napięcie znamionowe – $U_N = 15750$ V;
- dolne napięcie znamionowe – $U_N = 1000/392$ V;
- $\cos \varphi_N = 0,9/0,76$;
- klasa izolacji – F;
- rodzaj pracy – S1;
- temperatura otoczenia – $-15^\circ\text{C} < \vartheta_o < 40^\circ\text{C}$;
- grupa poł. – Dyn5 Masa 6000 kg;
- prąd GN – $I_{GN} = 80,6$ A;
- prąd DN – $I_{DN} = 1146/314$ A;
- poziom izol. LI95 AC38/AC3;
- liczba faz – 3;
- stopnie reg. $\pm 2 \times 2,5\%$
- częstotliwość – $f = 50$ Hz;
- stopień ochrony – IP00.

Transformator był zainstalowany w gondoli elektrowni wiatrowej i przyłączony do generatora o mocy 3 MW wspomnianej elektrowni.

Uszkodzenia przedstawiają rysunki 1–3.

2. Hipotetyczny przebieg zwarcia transformatora

Większość awarii uzwojeń transformatorów i maszyn elektrycznych ma swój początek w zwarcjach zwojowych.



Rys. 1. Miejsce zainstalowania transformatora (rysunek poglądowy)

Streszczenie: Transformatory żywiczne, dzięki swoim zaletom w odniesieniu do transformatorów olejowych, znalazły szerokie zastosowanie jako transformatory do falowników, pieców indukcyjnych lub elektrowni wiatrowych. Transformatory suche można konfigurować z myślą o ekstremalnych warunkach pracy (np. skrajnych temperaturach). W większości przypadków doskonale sprawdzają się jednak wykonania standardowe, które pracują np. w halach produkcyjnych czy centrach handlowych. Ważnym aspektem są na pewno ciche działanie i redukcja vibracji rdzenia. Najczęstsze awarie, jakim ulegają transformatory żywiczne, to zwarcia zwojowe rozwijające się w zwarcia między dyskami. Zwarcia te zaliczamy do zwań katastrofalnych.

Słowa kluczowe: transformator żywiczny, zwarcie, wielokrotne załączenie

Abstract: Resin transformers have been widely used as transformers for inverters, induction furnaces or wind turbines due to their advantages relating to oil transformers. Dry transformers can be configured for extreme operating conditions (eg extreme temperatures). However, standard versions which work, for example, in production halls or shopping centers are perfect choice in most cases. An important aspect is definitely quiet operation and reduction of core vibration. The most frequent failure that resin transformers undergo is the shorting of the coils developing in the short-circuit between the discs. These faults are classified as catastrophic short-circuits.

Keywords: resin transformer, shorting of the coils, catastrophic short-circuits



Rys. 2. Widok uszkodzonego uzwojenia fazy B uzwojenia 15 kV (fot. serwisu producenta)



Rys. 3. Widok krateru eksplozywnego uzwojenia SN (fot. serwisu producenta)



Rys. 4. Widok działania pierwotnej przyczyny awarii i źródło zwarcia międzwojowego (fot. serwisu producenta)

Załączenie i wyłączenie prądu generuje napięcia w uzwojeniu transformatora. Szybkie rozłączenie prądu w obwodzie transformatora, nawet o niewielkiej wartości (mniejszej od wartości prądu stanu jałowego transformatora), generuje w uzwojeniu napięcie o znacznej wartości, identyczne we wszystkich zwojach. Przebieg generowanego napięcia zależy wyłącznie od rezystancji, indukcyjności uzwojenia, pojemności izolacji zwojowej (Rz, Lz, Cz) oraz szybkości rozwierania styków wyłącznika.

2.1. Wyniki badań eksperymentalnych

Badania eksperymentalne wykonano w warunkach laboratoryjnych na uzwojeniach transformatora suchego. Na rysunku przedstawiono przebiegi napięcia na transformatorze o danych znamionowych: 800 kVA, 6,3 kV/400 V, 73,4 A/1154 A, Dy0 możliwa jest tylko godzina nieparzysta.

Wartość maksymalna napięcia wynosi 2,5 kV.

Indukcyjność uzwojenia i zgromadzona w niej energia elektromagnetyczna w czasie przerywania prądu generuje falę napięciową, a pojemność izolacji zwojowej i indukcyjność uzwojenia tworzą układ rezonansowy. Amplituda tego napięcia zależy od wartości prądu płynącego w uzwojeniu i szybkości przerywania przepływu tego prądu. Układ

rezonansowy pobudzony falą napięciową generuje oscylacje. Indukcyjność uzwojenia i pojemność izolacji zwojowej są równomiernie rozłożone na wszystkich zwojach uzwojenia, inaczej niż w przypadku wystąpienia udaru napięciowego będącego skutkiem np. wyładowania atmosferycznego [1, 7].

Fala napięciowa udarowa generowana przez pioruny jest impulsowa. W teorii wysokich napięć impuls napięcia piorunowego znormalizowano, przyjmując czas narastania napięcia 1,2 μ s i czas zanikania napięcia do połowy wartości maksymalnej 50 μ s.

Podczas załączania uzwojenia transformatora mamy tu do czynienia także z generowaniem fal napięciowych. Tego rodzaju przepięcia łączeniowe występują zawsze podczas przełączeń w sieci elektroenergetycznej. Indukcyjności, pojemności i rezystancje sieci elektroenergetycznej powodują, że przepięcia łączeniowe mają charakter oscylacji tłumionych. Częstotliwość oscylacji mieści się w przedziale od 103 Hz do 104 Hz, a czas zanikania oscylacji wynosi około 5 ms. Przepięcia łączeniowe w teorii wysokich napięć charakteryzuje się przez udar łączeniowy normalny. Czas narastania udaru napięcia do szczytu $T_p = 250 \mu$ s i czas spadku napięcia do półszczytu $T_2 = 2500 \mu$ s. Z tego widać, że czas trwania przepięć łączeniowych jest wielokrotnie dłuższy od czasów

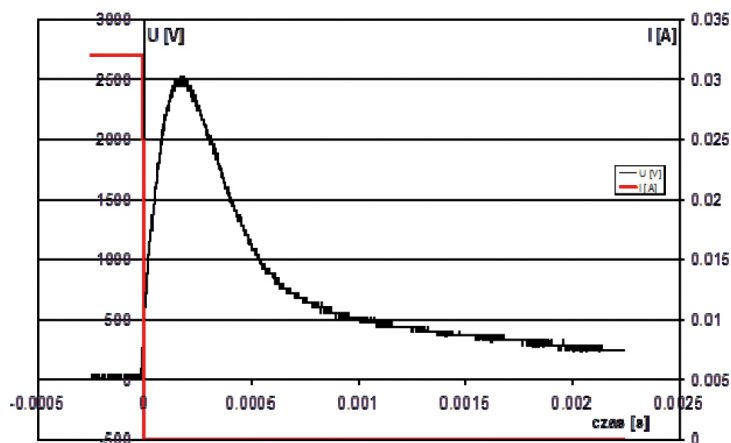
impulsów piorunowych. Przepięcia oscylacyjne tłumione o dłuższym czasie trwania mają na ogół łagodniejszy rozkład gradientu napięcia na uzwojeniu.

Zazwyczaj awarie uzwojeń – pierwotne zwarcia zwojowe lub zwarcia w obrębie izolacji głównej – są zauważane podczas załączania uzwojenia pod napięcie, co sugeruje, że awaria nastąpiła w tej chwili czasu. Lokalizując miejsce awarii poza pierwszymi zwojami uzwojenia, można twierdzić z dużą pewnością, że uzwojenie było już uszkodzone w chwili jego załączenia. Uszkodzenie zaś nastąpiło podczas szybkiego wyłączenia uzwojenia [6].

Uzwojenie transformatora może być znacznie bardziej podatne na tego typu awarie w przypadku przeprowadzenia licznych załączeń w stosunkowo krótkim czasie.

Wielokrotne załączanie i wyłączenie uzwojenia transformatora znacznie zwiększa ryzyko wystąpienia awarii z powodu zjawisk dynamicznych zachodzących podczas procesów łączeniowych, takich jak:

- nagrzewanie uzwojeń powodowane prądami rozruchowymi;
- oddziaływanie gorących uzwojeń na izolację;
- wystąpienie w uzwojeniu naprężeń dynamicznych, które występują podczas przepływu prądów o charakterze udarowym.



Rys. 5. Przebieg napięcia (RMS) na którym uzwojeniu transformatora po wyłączeniu prądu stałego o wartości $I = 32 \text{ mA}$ (ok. 0,044% I_n)

Efektom takiego stanu jest osłabienie stabilności mechanicznej zwojów cewek uzwojeń w obszarze warstwy przyzwojowej izolacji. W takiej sytuacji, gdy nastąpi gwałtowny wzrost natężenia pola elektrycznego, z czym mamy do czynienia w przypadku szybkiego wyłączenia i powstania fali napięciowej o wysokiej amplitudzie, jest inicjowane zwarcie zwojowe. Rozwijające się zwarcie pomiędzy pojedynczymi zwojami rozszerza swój obszar na większą liczbę zwojów i w konsekwencji doprowadza do zwarcia wysokoenergetycznego. Przykładami takich zwarcz wysokoenergetycznych wywołujących awarie katastrofalne są zwarcia pomiędzy dyskami w obrębie jednej cewki lub zwarcia izolacji głównej pomiędzy uzwojeniami. W przypadku uszkodzenia przedmiotowego transformatora wystąpiło zwarcie wysokoenergetyczne pomiędzy dyskami w obrębie jednej cewki [2].

2.2. Określenie przyczyn wystąpienia awarii transformatora

Po uwzględnieniu wyników przeprowadzonego eksperymentu badawczego oraz w oparciu o informacje z systemu monitorowania pracy elektrowni wiatrowej (dane z systemu SCADA Regionalna Dyspozycja Mocy – zapisy z Dziennika zdarzeń systemu operacyjnego WindEx),

gdzie zarejestrowano liczne załączenia i wyłączenia elektrowni w stosunkowo krótkich odstępach czasu.

Zarejestrowana była wtedy następująca sekwencja załączeń i wyłączeń transformatora:

- godz. 05:04:00 – wyłączenie, 05:05:59 załączenie (119 s przerwy);
- godz. 05:58:55 – wyłączenie, 05:59:48 załączenie (53 s przerwy);
- godz. 14:55:08 – wyłączenie, 14:56:17 załączenie (69 s przerwy);
- godz. 17:03:29 – wyłączenie, 17:03:38 załączenie (9 s przerwy);
- godz. 17:09:54 – wyłączenie, 17:10:02 załączenie (8 s przerwy);
- godz. 21:16:22 – wyłączenie, 21:19:06 załączenie (164 s przerwy);

Przyczyną bezpośrednią zaistniałej awarii były bardzo przyspieszone procesy degradacji izolacji spowodowane przede wszystkim częstymi przypadkami tzw. szybkiego ponownego załączenia.

3. Konkluzja i uwagi końcowe

Analiza zgromadzonych danych: rodzaj i opis uszkodzenia, dane z układów rejestracji i wyniki eksperymentu badawczego umożliwiły zidentyfikowanie przyczyny awarii transformatora.

Przyczyną uszkodzenia transformatora suchego turbiny wiatrowej 3 MW było powstanie awarii katastrofalnej,


a mianowicie – zwarcie pomiędzy dyskami uzwojeń w obrębie jednej cewki napięcia górnego transformatora żywicznego (suchego).

Przyczyną bezpośrednią zaistniałej awarii były bardzo przyspieszone procesy degradacji izolacji spowodowane przede wszystkim częstymi przypadkami tzw. szybkiego ponownego załączenia.

W skrajnym przypadku czas pomiędzy wyłączeniem transformatora i ponownym jego załączeniem wynosił 8 sekund.

Literatura

- [1] GLINKA T., SIKORA A., BERNATT J., POLAK A.: *Badanie izolacji zwojowej transformatorów prądem stałym*. „Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)”, 10/2015.
- [2] GLINKA T., POLAK A., DECNER A.: *Wpływ czasu eksploatacji maszyn elektrycznych na stopień degradacji izolacji uzwojeń*. „Wiadomości Elektrotechniczne”, 7–8/2005.
- [3] Akty normatywne: IEC 60076:2004, PN-EN 60076-1:2011 – wersja angielska.
- [4] GLINKA T.: *Badania maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME Komel, Katowice 1998.
- [5] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. ISBN:83-916040-0-04. 2012 r. Zakład Pomiarowo-Badawczy Energetyki Energopomiar-Elektryka Gliwice.
- [6] GLINKA T., POLAK A., DECNER A.: *Sposób badania diagnostycznego izolacji zwojowej*. Patent RP Nr 210409. 31.01.2012 r.
- [7] GLINKA T.: *Maszyny elektryczne i transformatory. Podstawy teoretyczne, eksploatacja i diagnostyka*. Wydawnictwo Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, 2015.

 Artur Polak

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL, Katowice