

Tadeusz Glinka
BOBRME Komel, Katowice

ANALIZA PRZYCZYŃ, PRZEBIEG I SKUTKI AWARII TRANSFORMATORA HUTNICZEGO

STEEL PLANT TRANSFORMER FAILURE – EVENT DESCRIPTION, CAUSES AND RESULTS ANALYSIS

Abstract: Design of steel-plant furnace three-phase transformer (110 kV/(350 to 500) V, 50 kA) and its operating conditions are described in the paper. After three months of operation this transformer failed. Cause of failure, its course and damage to transformer winding are presented. Recommendations for transformer winding design and its installation and protection are given.

Budowa i układ instalacyjny transformatora

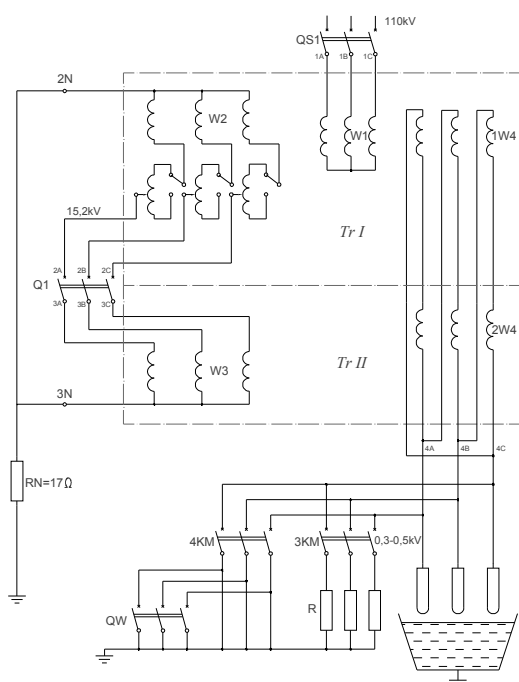
Transformatory przemysłowe są urządzeniami elektrycznymi dostarczającymi energię elektryczną do procesu technologicznego. Proces technologiczny narzuca konieczność regulacji prądu. Uzyskuje się to poprzez regulację napięcia. Regulacja ta standardowo jest skokowa. Konieczność regulacji napięcia wyróżnia budowę transformatora przemysłowego od transformatorów energetycznych blokowych i rozdzielczych. W artykule omówiono transformator podgrzewający płynną stal na linii technologicznej odlewania ciągłego. W omawianym przypadku płynna stal konwertora jest dogrzewana i ulepszana w łukowym piecu kadziowym o pojemności 300 Mg zasilanym poprzez tor wysokoprądowy z dwóch transformatorów: głównego 1 i dodatkowego 2, połączonych w sposób pokazany na rysunku 1. Transformatory są zabudowane we wspólnej kadzi i tworzą jeden układ zasilający o regulowanym skokowo napięciu. Parametry znamionowe układu transformatorów 1 i 2:

moc: $(40\ 000 \div 26\ 327)$ kVA;
napięcia: $110\ \text{kV}/15238\ \text{V}/(514 \div 304)$ V;
prądy:
 $(209,9 \div 138,2)$ A / $(840 \div 754)$ A / $(44,9 \div 50)$ kA.

Uzwojenie pierwotne W1, górnego napięcia (GN) transformatora 1 jest połączone w gwiazdę i jest zasilane ze stacji rozdzielczej 110 kV linią kablową o długości około 3 km. Napięcie na szynach stacji rozdzielczej jest podwyższone i wynosi 119 kV. W zakładzie pracują maszyny synchroniczne dużej mocy i sieć energetyczna jest przekompensowana. Pole transformatora w rozdzielni jest wyposażone w wyłącznik QS1,

odłącznik i ograniczniki przepięć. Uzwojenie wyjściowe (W4), dolnego napięcia (DN), obejmuje obydwie kolumny transformatorów 1 i 2, i jest połączone w trójkąt, a następnie szynami jest wyprowadzone na zewnątrz komory transformatora i wiązkami przewodów elastycznych jest połączone z elektrodami piecowymi. Do regulacji napięcia jest wykorzystywane uzwojenie W2, średniego napięcia (SN) o wartości 15238 V, umieszczone na rdzeniu transformatora głównego 1. Uzwojenie W2 ma odczepy połączone z podobciążeniowym przełącznikiem zaczepek. Zaczepek jest 13. Z uzwojenia regulacyjnego W2 jest zasilane uzwojenie pierwotne W3 transformatora dodatkowego 2. Uzwojenia W2 i W3 są połączone w gwiazdę. Punkty zerowe gwiazdy obydwóch uzwojeń są połączone i uziemione poprzez rezystancję o wartości 17Ω.

Napięcie zwarcia między uzwojeniami górnego napięcia W1 i dolnego napięcia W4: na zaczepek 1 (napięcie wyjściowe 304 V) wynosi 10,93 %, a na zaczepek 13 (napięcie wyjściowe 514 V) wynosi 7,46 %. Wyłącznik manewrowy Q1 w obwodzie SN łączy uzwojenie regulacyjne W2 transformatora głównego 1 i uzwojenie pierwotne W3 transformatora dodatkowego 2. Po obu stronach wyłącznika manewrowego Q1 są zainstalowane ograniczniki przepięć. Jako zwieracze 3KM i 4KM uzwojenia dolnego napięcia W4, zastosowane są styczniki o prądzie znamionowym 1200 A, są one umieszczone w komorze transformatora. Zwieracz QU jest odłącznikiem sterowanym zdalnie.



Rys. 1. Schemat układu transformatora piecowego

Kabel miedziany, o przekroju żył 95 mm^2 i długości 4 m, łączący wyjścia uzwojenia DN W4 ze zwieraczami 3KM, 4KM i QU. Kabel ten z zacisków DN do zwieracza 4KM poprowadzono po kadzi transformatora. Transformator wraz z aparaturą jest umieszczony w murowanej komorze na hali produkcyjnej.

Podczas normalnej pracy pieca kadziowego, wyłącznik QS1 jest zamknięty, wyłącznik manewrowy Q1 jest zamknięty, a zwieracze 3KM, 4KM i QU są otwarte. Regulacja prądu elektrod pieca odbywa się przełącznikiem zaczepów. Przejście transformatora od pracy normalnej do stanu jałowej odbywa się według następującej sekwencji:

- otwiera się wyłącznik Q1, co powoduje spadek obciążenia i zgaszenie łuku na elektrodach, gdyż transformator dodawczy 2 nie jest zasilany i jego uzwojenie wtórne W4 działa jak dławik o dużej indukcyjności,
- elektrody automatycznie podnoszą się do góry,
- zamyka się stycznik 3KM, co powoduje zwarcie i uziemienie obwodu DN poprzez rezystory $1,6 \Omega$, zwarcie to trwa 3 sekundy,

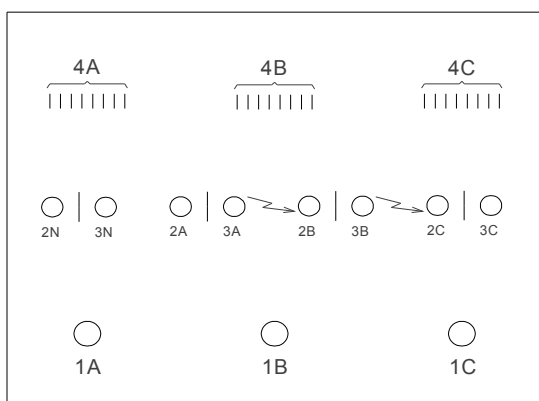
- zamyka się stycznik 4KM, co powoduje bezpośrednie zwarcie i uziemienie obwodu DN, i otwiera się stycznik 3KM,
- w razie potrzeby zamyka się odłącznik QU, czynność ta wykonywana jest przez obsługę, na przykład przy przedłużaniu elektrod lub przy konserwacji torów prądowych łączących uzwojenie DN z elektrodami.

Odłącznik QU, dublujący funkcję zwieracza 4KM, usytuowany jest na zewnątrz komory transformatora, gdyż ze względów bezpieczeństwa, obsługa widzi stan zwarcia noży tego odłącznika, ma pewność, że tor prądowy jest uziemiony i może przystąpić do pracy.

Przejście do normalnej pracy transformatora kadziowego polega na otwarciu zwieraczy QU i 4KM, załączenie wyłącznika manewrowego Q1 i obniżenie elektrod, aż do zapalenia się łuku elektrycznego. Wyłącznik sieciowy QS1 ma blokadę, poprzez styki pomocnicze, z wyłącznikiem manewrowym Q1. Wyłącznik manewrowy Q1 ma blokadę, poprzez styki pomocnicze, ze zwieraczami 3KM, 4KM i QU, które uniemożliwiają jego załączenie w przypadku zwarcia po stronie DN.

Awaria transformatora

Transformator był nowy, został zainstalowany i uruchomiony w lipcu, a awarii uległ w październiku. Transformator pracował trzy miesiące. Awaria wystąpiła w czasie przełączania transformatora ze stanu jałowego do pracy normalnej. Po załączeniu wyłącznika Q1 nastąpiło awaryjne wyłączenie transformatora wyłącznikiem sieciowym QS1 w rozdzielni. Wyłącznik QS1 zadziałał po czasie 70 ms. Zadziałało także zabezpieczenie gazowo – przepływowe stanowiące drugi stopień zabezpieczenia oraz zadziałały zabezpieczenia na obydwóch uzwojeniach SN. Ograniczniki przepięć zainstalowane po obydwóch stronach wyłącznika Q1 nie działały. Stwierdzono ponadto, że zwieracz 4KM jest złączony, a kabel łączący uzwojenie DN ze zwieraczem jest wypalony (nie ma go). Transformator był złączony na zwarcie. Izolatory przepustowe uzwojeń SN były opalone i zniszczone przez łuk elektryczny.



Rys. 2. Widok na pokrywę kadzi transformatora z zaznaczonym położeniem izolatorów przepustowych

Łuk elektryczny wystąpił między izolatorami 3A – 2B i 3B – 2C, jak to pokazano na rys. 2. Ślady opalenia łukiem elektrycznym były także na wyprowadzeniach uzwojenia DN. Łuk ten spowodował łukowe zwarcie trójfazowe uzwojenia SN transformatora głównego. Pomiar poawaryjne rezystancji uzwojeń i pomiary rezystancji izolacji uzwojeń wykazały, że uzwojenie SN transformatora głównego, zostało uszkodzone. Badanie chromatograficzne gazów rozpuszczonych w oleju oraz gazów pobranych z przekaźnika gazowo – przepływowego wykazały istnienie zwarcia wewnętrznego w transformatorze. Następnie transformator przewieziono do fabryki, która go wyprodukowała. Po wyjęciu transformatora z kadzi i częściowym rozmontowaniu stwierdzono, że:

- uzwojenie GN 110 kV W1 nie zostało uszkodzone,
- uzwojenie SN transformatora głównego W2 zostało uszkodzone przez siły elektrodynamiczne,
- uzwojenie DN napięcia obydwóch transformatorów W4 nie zostało uszkodzone,
- uzwojenie SN transformatora dodatkowego W3 nie zostało uszkodzone.

Opis uszkodzenia uzwojenia W2

Uzwojenie W2 składa się z dwóch warstw. Warstwę pierwszą, przylegającą do rdzenia, stanowi odwracalne uzwojenie regulacyjne zawierające 6 zaczepów. Warstwę drugą stanowi uzwojenie podstawowe SN. W fazach A, B i C, uzwojenie podstawowe zostało wypchnięte do góry, a uzwojenie regulacyjne do dołu, o 8 do 15 cm. Elkonowe pierścienie prasujące zostały połamane na kilka części, a śruby krępujące

uzwojenie (tzw. spychowe) zostały wbite w pierścienie elkonowe i pokrzywione. W wyniku przesunięcia się warstw uzwojenia została lokalnie uszkodzona izolacja. W fazach A i B w miejscu uszkodzenia izolacji wystąpiły zwarcia jednego stopnia regulacji. W miejscach zwarcia były niewielkie wypalenie izolacji i wytopienie miedzi.

Dlaczego doszło do awarii?

Wzajemne blokady między wyłącznikiem Q1 i zwieraczem 4KM były rozwiązane na stykach pomocniczych. Styki pomocnicze zwarte w zwieraczu 4KM blokują załączenie wyłącznika Q1 i odwrotnie. Technologia ciągłego odlewania stali emituje pył, który ma właściwości izolacyjne. Komora transformatora nie była szczelna. Pył przedostawał się do komory, a ponieważ urządzenia w komorze są pod napięciem, komora jest zamknięta i nie była czyszczona. Pył przenikał do wszystkich urządzeń tam znajdujących się, w tym także osadzał się na stykach pomocniczych zwieracza 4KM izolując je. Zaizolowane styki pomocnicze zwieracza 4KM nie blokowały wyłącznika Q1. Tak więc przy załączonym zwieraczu 4KM wyłącznik Q1 mógł być załączony. Na pokrywie transformatora, na izolatorach przepustowych i na przewodach była warstwa pyłu. Po załączeniu wyłącznika Q1, przy zwartym uzwojeniu DN, siły elektrodynamiczne generowane przez prąd zwarcia wzbudziły wstrząs pokrywy transformatora, co spowodowało uniesienie się chmury pyłu. Prąd zwarcia po stronie DN wynosił około 230 kA, wartość ta wynika z obliczeń. Gęstość prądu w kablu zawierającym wynosiła około 2400 A/mm². Przy tej gęstości prądu przewód miedziany wytopił się po około 50 ms, pomiędzy końcówkami upalonego przewodu powstał łuk, który spowodował wyparowanie miedzi. Siły elektrodynamiczne działające w łuku wyrzuciły pary miedzi na wyprowadzenia uzwojenia DN opalając je i na izolatory przepustowe SN. Przestrzeń między izolatorami stała się przewodząca, przez którą nastąpiło zwarcie łukowe między izolatorami: 3A-2B i 3B-2C, jak to pokazano na rysunku 2. Zwarcie to jest zwarcie transformatora głównego 1, którego napięcie zwarcia jest małe. Prąd zwarcia wzrósł, siły elektrodynamiczne generowane w uzwojeniach wzrosły proporcjonalnie do kwadratu prądu. Transformator główny nie był konstrukcyjnie przewidziany do wytrzymania takiego zwarcia.

Jakie popelniono błędy?

Analizując warunki pracy transformatora, dopasowanie transformatora do napięcia zasilającego oraz budowę samego transformatora, odnosi się wrażenie, że miało tu miejsce sumowanie się kilku niekorzystnych dla transformatora zdarzeń, które można zestawić w trzech punktach:

- błędy w założeniach projektu transformatora,
- wady projektowo – konstrukcyjne transformatora,
- i największe błędy, które były bezpośrednią przyczyną awarii, to są warunki pracy transformatora i sposób rozwiązania blokad działania styczników.

Założenia do projektu transformatora

Uzwojenie górnego napięcia transformatora zaprojektowano na napięcie 110 kV, podczas gdy napięcie zasilające wynosiło 119 kV, było zatem o 8,2% większe od znamionowego, o taką samą wartość był większy prąd zwarcia, a siła elektrodynamiczna generowana w uzwojeniach była większa o 17%. Drugi błąd dotyczy komory transformatorowej.

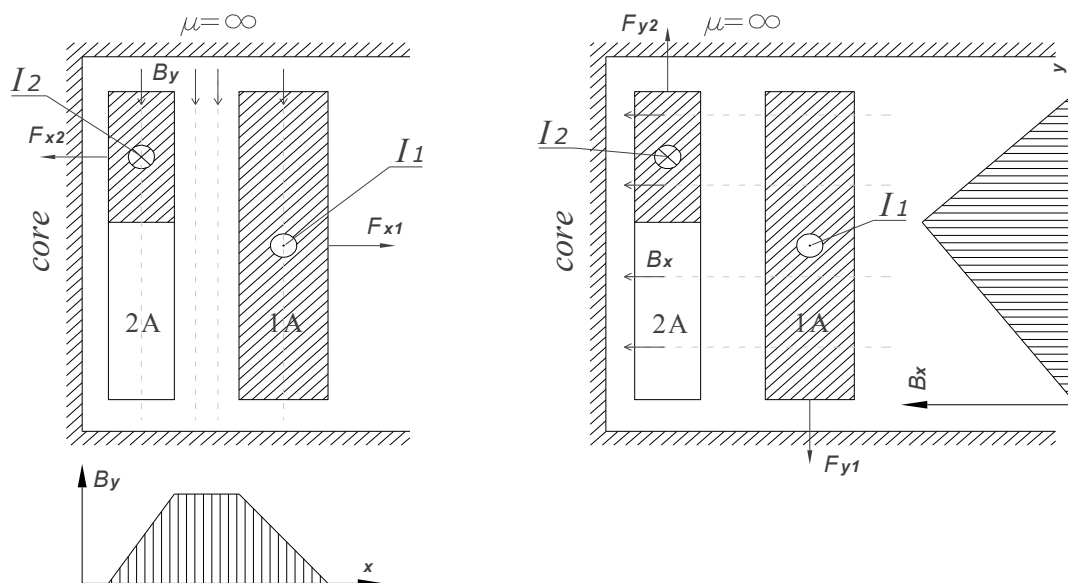
Na hali ciągłego odlewania stali występuje duże zapylenie pyłem technologicznym.

Pył ten przedostaje się do wnętrza komory transformatorowej, głównie przez kanały wentylacyjne i osadza się na wszystkich urządzeniach znajdujących się wewnątrz komory.

Urządzenia są pod napięciem, niemożliwe jest bieżące zbieranie pyłu i czyszczenie tych urządzeń.

Wady projektowo-konstrukcyjne transformatora

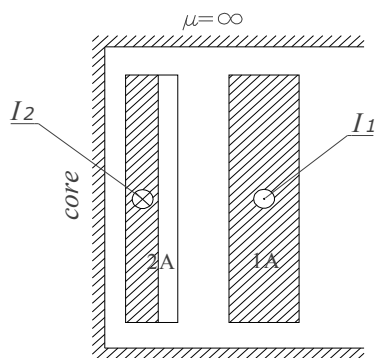
Rozwiązanie konstrukcyjne uzwojenia regulacyjnego W2 posiada zaczepty (wyprowadzenia). Na każdym zaczepte pracuje tylko część uzwojenia i jest ona ułożona niesymetrycznie na wysokości kolumny w stosunku do uzwojenia pierwotnego W1, pokazano to na rysunku 3. Szczególnie duża asymetria występuje na zaczepte pierwszym, a ten zaczept był załączony w czasie zwarcia awaryjnego. W czasie drugiej fazy zwarcia amperozwoje uzwojenia W1 i uzwojenia W2 są sobie równe. Wymieniona niesymetria wzbudza w oknie transformatora pole magnetyczne podłużne B_y , i poprzeczne B_x , które współdziałając z prądem płynącym w uzwojeniach i generują siły elektrodynamiczne, jak to pokazano na rysunku 3. Rysunek 3 jest tylko modelem który ilustruje generację sił F_x i F_y , w szczególności siły osiowej F_y , która była siłą niszczącą. Siła F_y byłaby mniejsza, gdyby część aktywna uzwojenia regulacyjnego W2 na każdym zaczepte była rozłożona na całej wysokości kolumny, gdyż wówczas składowa indukcji jest minimalna, jak to pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Części aktywne uzwojenia transformatora 1 w czasie zwarcia z zaznaczonymi kierunkami działania sił elektrodynamicznych

Błędy w układzie sterująco – załączającym

Błędem największym, który bezpośrednio przyczynił się do awarii, był błąd w projekcie układu sterująco – załączającym. Błędem tym było zaprojektowanie i wykonanie zawodnej wzajemnej blokady między wyłącznikiem Q1 i zwieraczem 4KM. Drugim błędem było umieszczenie wyłącznika zwierającego 4KM w komorze transformatora i poprowadzenie kabla uziemiającego z wyprowadzeń uzwojenia W4 do wyłącznika 4KM, po kadzi transformatora.



Rys. 4. Poprawne wykonanie uzwojenia regulacyjnego transformatora 1

Wnioski

Awaria transformatora została szczegółowo przeanalizowana przez ekspertów, którzy w swych opiniach zalecili:

- założyć drugą blokadę między wyłącznikami Q1 i 4KM, na przykład opartą na pomiarze prądów w cewkach podtrzymujących wyłączniki Q1 i 4KM (wniosek obligatoryjny),
- kabel uziemiający przyłączyć do torów prądowych DN na zewnątrz komory, także uziemiacze 3KM i 4KM zainstalować na zewnątrz komory (wniosek obligatoryjny),
- uzwojenie górnego napięcia W1 wykonać na napięciu 120 kV,
- zaczepty uzwojenia regulacyjnego W2 rozłożyć na wysokości kolumny, jak to pokazano na rys.4, zmienić mocowanie elkonowego pierścienia prasującego z punktowego na powierzchniowe i pogrubić sworznie mocujące ten pierścień,
- uszczelnić komorę transformatora, do komory wprowadzić nadmuch czystego powietrza i utrzymać w komorze wyższe ciśnienie w stosunku do hali (wniosek obligatoryjny).

Wyremontowany transformator pracuje już bezawaryjnie 15 lat.

Powstaje pytanie, czy inwestor linii technologicznej ciągłego odlewania stali nie powinien był zlecić doświadczonemu ekspertom opracowanie opinii o projekcie tej instalacji, przed jej wykonaniem? Czy konieczna była awaria i związane z nią duże koszty, aby takie opinie opracować?

Eksperti opracowujący takie opinie powinni szczegółowo analizować pracę urządzeń przy wszystkich możliwych do wystąpienia zdarzeniach awaryjnych i anormalnych stanach pracy.

Artykuł opracowano w ramach grantu: 6025/B/T02/2011/40

Literatura

- [1]. Jezierski E.: Transformatory. Wydawnictwa Naukowo -Techniczne, Warszawa 1975 r.
- [2]. www.ftz.com.pl
- [3]. www.sgb.smit.pl