



Franciszek MOSIŃSKI, Jarosław GALOCH, Tomasz PIOTROWSKI,
Bogusław BOCHENSKI

Politechnika Łódzka, Zakład Wysokich Napięć

Zarządzanie czasem życia transformatorów energetycznych za pomocą programów numerycznych

Streszczenie. W artykule przedstawione zostały wyniki pracy nad programem służącym do zarządzania czasem życia transformatora (przez dobór optymalnego obciążenia) oraz do szacowania zesterzenia izolacji papierowej (według norm IEEE oraz IEC).

Abstract. (*Power transformers life management by means of numerical programs*). There were shown results of work on computer program for transformer life management and for estimation of insulation ageing.

Słowa kluczowe: transformator, starzenie izolacji, obciążenie, program komputerowy.

Keywords: transformer, insulation ageing, load, computer program.

Wstęp

Transformatory elektroenergetyczne jako urządzenia o dużym znaczeniu wymagają odpowiedniej dbałości o ich stan techniczny. Ze wzrostem napięć i mocy znamionowych rośnie ich znaczenie w systemie elektroenergetycznym a także cena. W przypadku awarii, oprócz kosztów poniesionych na naprawę dochodzą również koszty z tytułu przerw w dostawie energii elektrycznej do odbiorców. W publikacji [1] została przedstawiona przybliżona analiza cenowa remontu transformatora. W związku z tym proponowane są różne rozwiązania mające na celu przedłużenie czasu życia transformatorów, ponieważ w wielu przypadkach koszt takich zabiegów jest znacznie niższy niż koszt remontu lub zakupu nowego transformatora. Jednym z takich zabiegów jest zarządzanie starzeniem izolacji papierowej przez odpowiednie obciążanie transformatora.

Obciążalność w świetle norm

Dopuszczalne obciążenie transformatora ograniczone jest jego wytrzymałością elektryczną, mechaniczną i cieplną oraz szybkością starzenia izolacji. Algorytmy doboru optymalnego obciążenia z uwzględnieniem powyższych ograniczeń wraz ze wzorami zostały zamieszczone w normach: IEEE C57.91-1995 [2] oraz IEC 60354 [3]. Wyniki otrzymane po obliczeniach na podstawie tych norm powinny być zbliżone, ale nie muszą być jednakowe ze względu na różnice w podejściu do niektórych zagadnień. Są to między innymi:

- starzenie izolacji szacowane na podstawie prawa Arrheniusa [2] lub zależności Montsingera [3]
- różne definicje temperatury otoczenia
- w [3] występuje dodatkowo poprawka korygująca obliczoną temperaturę najgorętszego punktu uzwojenia („hot spot”).

W [2] zamieszczone zostały dwa różne algorytmy (pierwszy w rozdziale 7, natomiast drugi w załączniku G teje normy). Każdy z tych algorytmów prezentuje odmienne podejście do niektórych procesów. W pierwszym stosowane są dwa wykładniki potęg uwzględniające odpowiednio zależność między stratami całkowitymi a przyrostem temperatury oleju oraz zależność między prądem a przyrostem temperatury uzwojenia. Natomiast w drugim obliczane są zmiany lepkości oleju, zmiany

rezystancji uzwojeń oraz zmiany strat mocy przy zmianach temperatury, co teoretycznie powinno dać dokładniejsze wyniki. Należy jeszcze wspomnieć o zasadniczej różnicy między wspomnianymi algorytmami, a mianowicie: obliczenia według algorytmu z załącznika G [2] wykonywane są metodą „krok po kroku”, bez wykorzystania całkowania numerycznego (co, jak wiadomo wprowadza dodatkowe błędy). Krok ustalany jest jako czas dziesięciokrotnie krótszy niż stała czasowa uzwojeń transformatora. Pozostałe dwa algorytmy wykorzystują całkowanie numeryczne, co jednak w niektórych przypadkach znacznie przyspiesza obliczenia.

Program numeryczny

W Zakładzie Wysokich Napięć PŁ został opracowany program numeryczny o nazwie DTR służący do wyznaczania obciążalności transformatorów elektroenergetycznych. Jest to samodzielny program wchodzący w skład systemu wspomagającego eksploatację transformatorów (opisanego w [4]). Procedury obliczeniowe oparte zostały na przewodnikach obciążania transformatorów olejowych [2], [3]. W związku z tym program umożliwia wykonywanie obliczeń trzema metodami, przy czym w chwili obecnej metoda według [3] nie jest rozwijana.

Program DTR składa się z dwóch modułów: jeden służy do wprowadzania i edytowania danych oraz do wyświetlania otrzymanych wyników, a drugi do wykonywania obliczeń. Użytkownik programu widzi tylko pierwszy moduł, drugi jest ukryty. Dane do obliczeń pobierane są z dwóch plików tekstowych, które są archiwizowane. W jednym pliku umieszczone są wszystkie dane transformatora oraz ograniczenia nakładane przez użytkownika, natomiast w drugim pliku znajduje się cykl obciążenia. Możliwe jest definiowanie cykli o jednym (np. jednodobowy) lub wielu (np. wielodobowy, miesięczny, roczny) okresach. W każdym okresie można zdefiniować dowolny przebieg krzywej. W momencie pisania artykułu wdrażana jest obsługa bazy danych, w której przechowywane będą dane transformatorów oraz profile obciążenia, co pociągnie za sobą zmianę interfejsu oraz sposobu generowania danych wejściowych. Dotychczasowy wygląd interfejsu programu DTR został przedstawiony na rysunku 1. Do wykonania obliczeń

potrzebne są wszystkie dane znamionowe transformatora oraz wyniki pomiarów uzyskanych w czasie próby grzania (przyrosty temperatur, straty mocy).

Moduł wejścia/wyjścia umożliwia użytkownikowi definiowanie kolejnych cykli obliczeń oraz kontrolę ich realizacji poprzez analizę błędów sygnalizowanych przez program. Program zawiera obszerny blok analizy kompletności i poprawności wprowadzanych danych. Pozwala to korygować trudne do uniknięcia, przy dużej liczbie danych wejściowych (około 150), błędy użytkownika.

Aktualnie rozwijana wersja modułu obliczeniowego napisana jest w języku FORTRAN i opisana w języku angielskim. Natomiast interfejs wejścia/wyjścia napisano wykorzystując system Delphi (język programowania Object Pascal) firmy Borland. Program działa w środowisku Windows 95/98/NT/2000/XP.

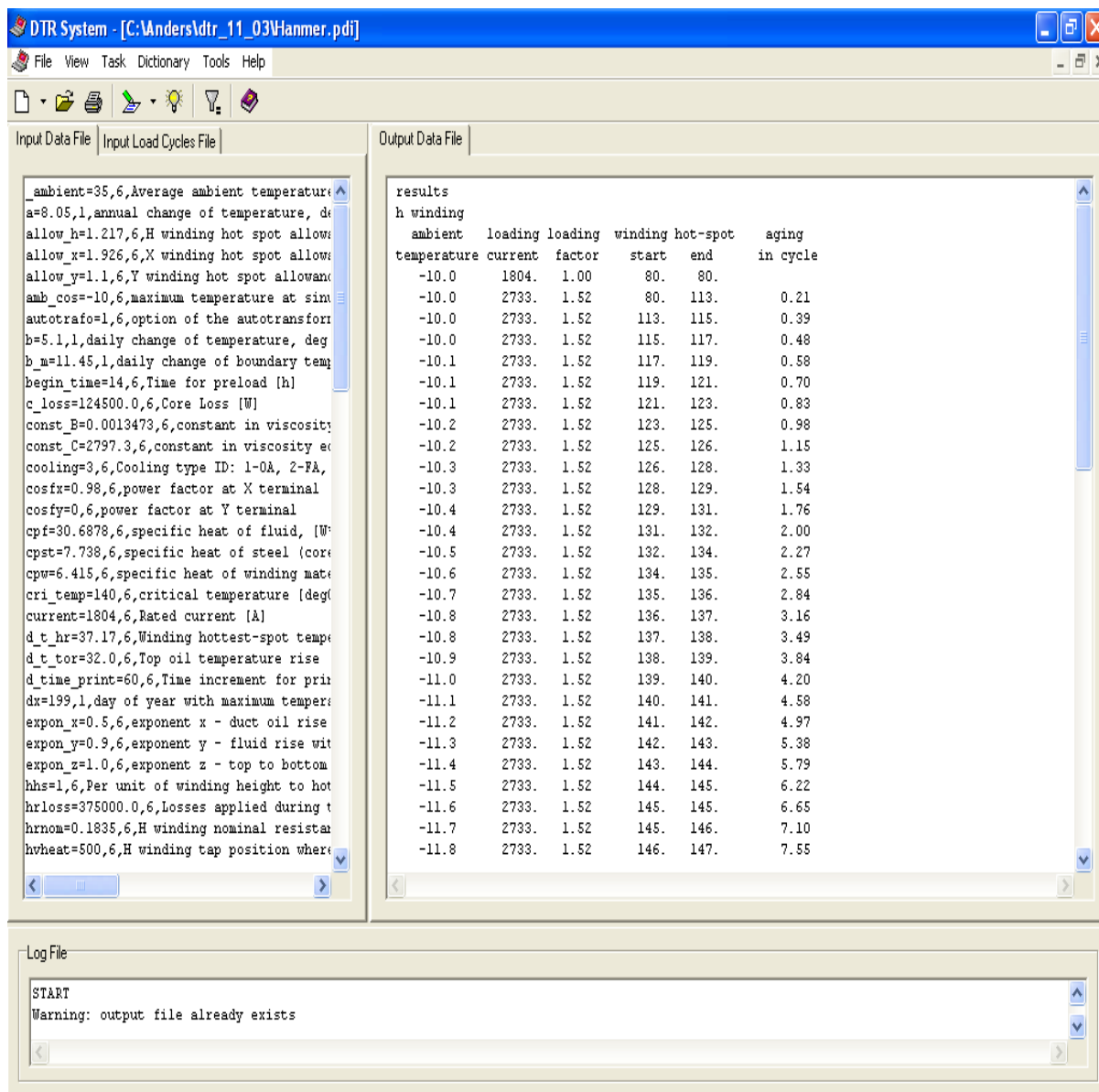
W aktualnej wersji program umożliwia wykonywanie obliczeń w trzech trybach (dla charakterystycznych stanów pracy transformatora):

1) Simple – przy zadanym cyklu obciążenia program oblicza temperaturę najgorętszego punktu uzwojenia, względne zatarzenie izolacji, czas do przekroczenia temperatury krytycznej i czas przekroczenia temperatury krytycznej

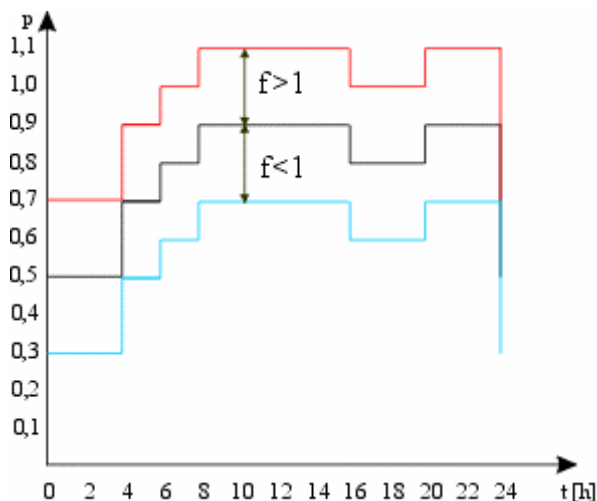
2) Rating – umożliwia wyznaczanie długotrwałych awaryjnych obciążeń cyklicznych (rys.2); dobierany jest współczynnik f – krotnie zwiększający obciążenie (w całym cyklu, czyli „podnosi” lub „obniża całą krzywą”) tak, aby nie przekroczyć jednego z czterech zadanych ograniczeń:

- a) maksymalnego obciążenia (wytrzymałość mechaniczna)
- b) maksymalnej temperatury najgorętszego punktu uzwojenia (wytrzymałość termiczna)
- c) maksymalnego zatarzenia izolacji
- d) maksymalnego czasu przekroczenia temperatury krytycznej

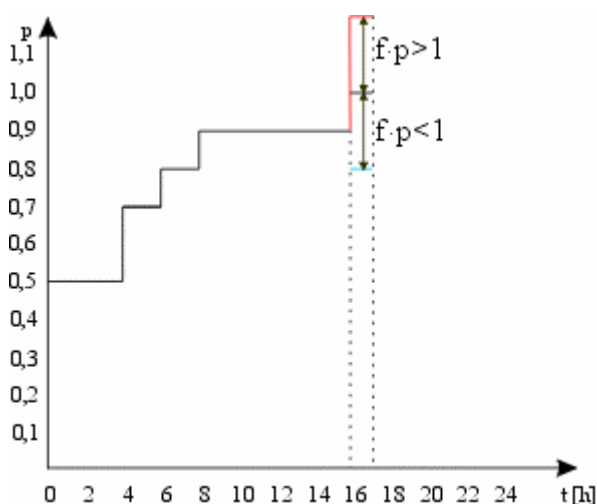
3) Preload – połączenie obu poprzednich trybów – umożliwia wyznaczanie krótkotrwałych obciążeń awaryjnych (rys.3). Obliczenia wykonywane są w dwóch etapach. W pierwszym program wyznacza warunki początkowe dla drugiego etapu obliczeń (do wystąpienia obciążenia awaryjnego). W drugim etapie wyznaczane jest maksymalna moc, jaką można obciążyć transformator nie przekraczając założonych ograniczeń (jak w trybie rating).



Rys.1. Interfejs programu DTR



Rys.2. Tryb „Rating”



Rys.3. Tryb „Preload”

Można więc przeprowadzić symulację jak zorganizować pracę transformatora podczas awarii przy przewidywanej szybkości zużycia izolacji lub tak, aby nie przekroczyć dopuszczalnej temperatury czy dopuszczalnego obciążenia. Należy dodać jeszcze do tego możliwość wykonania obliczeń dla autotransformatorów, transformatorów dwu- i trójuzwojeniowych również z przełącznikiem zaczepów. Program umożliwia także wskazanie uzwojenia najbardziej obciążonego (termicznie) i wybór właśnie tego uzwojenia jako decydującego przy ograniczeniu mocy. Wiadomym jest, że temperatura uzwojeń i oleju w transformatorze zależy od temperatury otoczenia. To również zostało uwzględnione i w konsekwencji temperaturę otoczenia można podać w kilku wariantach:

- Stała temperatura otoczenia
- Wprowadzana razem z profilem obciążenia
- Aproksymowana sumą funkcjami sinusoidalnymi

Na rysunku 1 został przedstawiony przykładowy wygląd okna programu po wykonaniu obliczeń. Okno dzielone jest na trzy części: dane wejściowe (dane transformatora lub cykl obciążenia pokazuje lewe górne okno), wyniki obliczeń (temperatury, zużycie izolacji, obciążenie, czas przekroczenia temperatury maksymalnej pokazuje prawe górne okno) oraz okno dolne służące do wyświetlania błędów. W prezentowanym przypadku obciążenie było stałe w całym cyklu 24-godzinny, a obliczenia wykonane zostały w trybie „preload”. Temperatura otoczenia była zadana funkcją sinusoidalną o okresie jednej doby, z war-

tością maksymalną równą -10°C . W pierwszej linii wyświetlane są nagłówki kolumn, następnie obciążenie i temperatury przed rozpoczęciem poszukiwania maksymalnego obciążenia (przed symulowaną awarią). W kolejnych liniach drukowane są znalezione rozwiązania (obciążenie i temperatury) dla kolejnych podprzedziałów czasowych. Dobę podzielono na podprzedziały piętnastominutowe, a czas trwania przeciążenia przewidziano na 8 godzin. W ostatniej kolumnie zestawione są wartości liczbowe określające względne starzenie (odniesione do doby jako jednostki). Kryterium obliczeń była graniczna temperatura 150°C . Program liczy dla wszystkich uzwojeń i wyświetla wyniki w kolejności od uzwojenia najbardziej obciążonego (według przyjętego kryterium; w tym przypadku w kategoriach temperatury gorącego punktu izolacji uzwojenia) do najmniej obciążonego. W przykładzie uzwojeniem decyzyjnym było uzwojenie szeregowo (GN) autotransformatora, oznaczone jako H.

Podsumowanie

Program DTR był już wcześniej prezentowany [4] lecz wówczas pozwalał tylko na obliczenia dla transformatora dwuuzwojeniowego bez przełącznika zaczepów. Nie posiadał również możliwości znajdowania uzwojenia najbardziej obciążonego i aproksymacji temperatury otoczenia za pomocą funkcji sinusoidalnych. W chwili obecnej wszystkie wyżej wymienione funkcje są już dostępne. Jak już zostało wcześniej wspomniane, wdrażana jest współpraca programu z bazą danych, a w przyszłości przewiduje się rozbudowę o możliwość uwzględniania przewzbudzenia rdzenia oraz wpływu zawartości wyższych harmonicznych napięcia i prądu na straty mocy. Przeznaczeniem prezentowanego programu jest praca w systemie monitoringu „on-line” i wspomaganie decyzji dyspozytora, jednak w systemie „off-line” może zostać wykorzystany do symulacji stanów awaryjnych lub do ekonomicznego rozdziału mocy. Program może być uzupełnieniem lub alternatywą dla instalacji monitoringu transformatorów.

LITERATURA

- Zajac M., Wójtowicz M., Molenda J., Rogoś J., Wydłużenie cyklu życia olejów transformatorowych, Materiały konferencyjne Transformatory w Eksploatacji, Sieniawa (2002), 233-244
- IEEE Std C57.91-1995, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers, (1996)
- PN-IEC 60354, Przewodnik obciążania transformatorów olejowych, (1999)
- Mosiński F., Piotrowski T., Galoch J., Program numeryczny do obliczania obciążalności i czasu życia transformatorów energetycznych, *Materiały konferencyjne Transformatory Energetyczne i Specjalne*, (2002), 139-144
- Baum J., Dörnemann K., Stirl T., Tenbohlen., Monitoring on-line transformatorów energetycznych, wykorzystanie technik informatycznych., *Materiały konferencyjne Transformer 01*, (2001), 109-117
- Valenta L., Aschenbrenner V., Učík T., Transformatory – monitoring i gospodarowanie czasem życia, *Materiały konferencyjne Transformer 01*, (2001), 216-223

Autorzy: prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński, Politechnika Łódzka, Zakład Wysokich Napięć, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: mosinskf@mail.p.lodz.pl; dr inż. Jarosław Galoch, Politechnika Łódzka, Zakład Wysokich Napięć, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: jaroslaw.galoch@p.lodz.pl; dr inż. Tomasz Piotrowski, Politechnika Łódzka, Zakład Wysokich Napięć, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: piotr@p.lodz.pl; mgr inż. Bogusław Bocheński, Politechnika Łódzka, Zakład Wysokich Napięć, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: bochensk@mail.p.lodz.pl