



Franciszek MOSIŃSKI, Bogusław BOCHEŃSKI, Tomasz PIOTROWSKI

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

Wpływ wybranych parametrów na obciążalność transformatorów energetycznych

Streszczenie. W referacie opisano przykład wykorzystania programu numerycznego do dynamicznego obliczania obciążalności transformatora w zależności od temperatury otoczenia. Pokazano jak na obciążalność wpływa zmiana napięcia na wejściu transformatora, oraz wybór pozycji przełącznika zacsepów pod obciążeniem. Podano przykład wykorzystania ciągłego pomiaru maksymalnej temperatury oleju do korekty wykładników w równaniach cieplnych transformatora, co zwiększa dokładność obliczeń temperatur gorącego punktu w uzwojeniach.

Abstract. (The influence of selected parameters on power transformers load capacity). An example of numerical program application to dynamic computation of power transformer rating due to ambient temperature is presented in the paper. The influence of voltage and selected position of under load tap changer on transformer load capacity is shown. An example of on-line measurement of top oil temperature utilization to correct exponents in thermal equations and improve accuracy of hot spot temperature calculations is also given.

Słowa kluczowe: transformator, obciążalność, program komputerowy
Keywords: power transformer, load capacity, numerical program

Wstęp

W diagnostyce transformatorów wyróżnić można aktualnie dwa trendy. Pierwszy z nich polega na przeprowadzaniu przeglądów okresowych w odstępach czasu uzależnionych od tego, do jakiej grupy dana jednostka, biorąc pod uwagę jej moc i napięcie znamionowe, została zakwalifikowana. Druga z tendencji, która zdobywa coraz szersze uznanie, związana jest z ciągłym śledzeniem zmian wybranych wielkości, charakteryzujących stan techniczny transformatora. Obydwa rozwiązania mają oczywiście swoje wady. W pierwszym przypadku możliwe jest przeoczenie momentu powstania awarii szczególnie, gdy zakłócenie ma charakter szybko rozwijający się. W drugim zaś istotną rolę odgrywa dobór właściwych czujników, koszty ich instalacji, a w przypadku transformatorów starszych, również nie bez znaczenia są problemy techniczne związane z ich instalacją. Ponieważ w rzeczywistości, obydwie koncepcje wzajemnie się uzupełniają należy spodziewać się wzrostu znaczenia i atrakcyjności modelu zarządzania eksploatacją transformatora zwanego *CBM* (*Condition Based Maintenance*).

W przypadku diagnostyki prowadzonej w trybie *on-line* o wyborze zestawu czujników monitorujących stan transformatora decyduje w głównej mierze statystyka uszkodzeń. Jej analiza wskazuje na uzwojenia i pod-obciążeniowy przełącznik zacsepów (*ppz*), jako elementy najbardziej zagrożone i stanowiące przyczynę awarii transformatorów. Wynika z tego, że kluczowymi wielkościami, które powinny być śledzone i oceniane, są parametry *ppz*, zestarzenie izolacji papierowo-olejowej, gazy (również tlen) rozpuszczone w oleju, zawilgocenie układu izolacyjnego, temperatury punktów gorących *HST* (tzw. *Hot-spot temperatures*) oraz parametry charakteryzujące obciążenie transformatora.

W artykule opisano wybrane zagadnienia, związane z obciążalnością transformatorów, przeanalizowane w oparciu o wyniki autorskiego programu numerycznego *DTR* (*Dynamic Transformer Rating*).

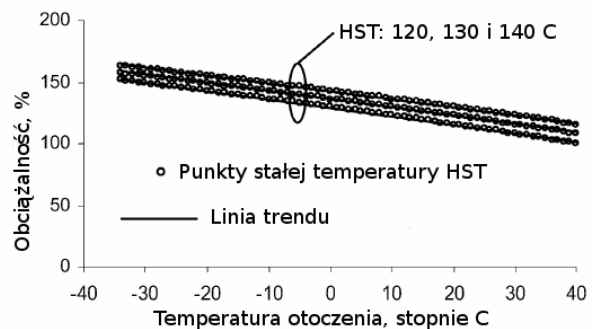
Graniczne zimowe i letnie obciążenie szczytowe

Istnieje tendencja do coraz lepszego wykorzystania eksploatowanych transformatorów. Jednym ze sposobów realizacji tego zadania jest dokładne określenie zimowych

i letnich obciążeń dopuszczalnych. W [4] podano metodę określania tych obciążeń granicznych w zależności od temperatury otoczenia. Poczyniono przy tym szereg założeń upraszczających jak np. zerowa stała czasowa dla nagrzewania oleju. Znacznie dokładniejsze wyniki uzyskuje się z programu *DTR*, który uwzględnia:

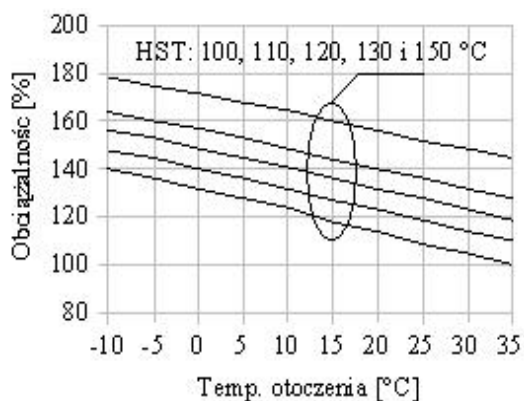
- zmienność temperatury otoczenia w ciągu doby według funkcji cosinusoidalnej z okresem dobowym i zadaną wartością szczytową o godzinie 14:00,
- stałą czasową nagrzewania się uzwojeń,
- stałą czasową nagrzewania się oleju obliczaną według [2], w oparciu o masy elementów transformatora i ze zróżnicowaniem w zależności od rodzaju chłodzenia.

Na rysunku 1 zacytowano za [4] przykład obciążalności transformatora przy założeniu stałej wartości temperatury hot-spot'u, w funkcji stałej wartości temperatury otoczenia.



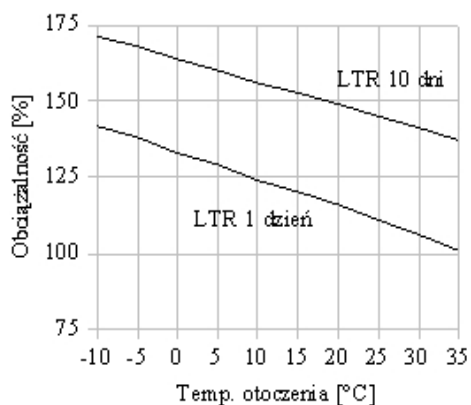
Rys.1. Linie stałego *HST* dla przypadku transformatora z chłodzeniem OFAF [4]

Na rys. 2 pokazano podobne wyniki dopuszczalnej obciążalności, dla transformatora trójuzwojeniowego o mocy 125 MVA i napięciu GN 220 kV, uzyskane z programu *DTR*. Obliczenia wykonano przy zmiennym dobowym obciążeniu każdego z uzwojeń wtórnych, przy zachowaniu proporcji mocy 1:1 między uzwojeniami DN oraz zmiennej dobowej temperaturze otoczenia odwzorowanej cosinusoidą, zdefiniowaną wartością maksymalną w zakresie od -10°C do 35°C , co 5°C . Wartość obciążalności podana jest w [%] prądu znamionowego i dotyczy maksymalnej wartości dobowej.



Rys.2. Linie stałego HST dla transformatora trójzwojowego 125/62,5/62,5 MVA, 220/44/28 kV z chłodzeniem ONAF z obliczeń programem DTR

Dla tego samego transformatora i tych samych warunków, na rysunku 3 pokazano linie stałego starzenia izolacji papierowej dla obciążenia awaryjnego (*LTR 10 dni* - w ciągu 10 dni pracy transformator zestarzeje się o rok) oraz normalnego (*LTR 1 dzień* - w ciągu 1 dnia pracy transformator zestarzeje się o jeden dzień).



Rys.3. Linie stałego starzenia izolacji papierowej dla transformatora trójzwojowego 125/62,5/62,5 MVA, 220/44/28 kV z chłodzeniem ONAF z obliczeń programem DTR

Wyniki obliczeń, które posłużyły do stworzenia wykresów przedstawionych na rysunkach 2 i 3 zebrane zostały w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki obliczeń dla transformatora trójzwojowego przy jednakowym obciążeniu obu uzwojeń DN

Temp. otoczenia [°C]	-10	-5	0	5	10	15	20	25	30	35
Limit HST	Obciążalność [pu]									
100	1,40	1,36	1,32	1,28	1,24	1,18	1,14	1,09	1,05	1,00
110	1,48	1,45	1,40	1,36	1,32	1,27	1,23	1,19	1,14	1,10
120	1,56	1,53	1,49	1,45	1,41	1,36	1,32	1,28	1,23	1,19
130	1,64	1,60	1,57	1,53	1,49	1,44	1,40	1,36	1,32	1,28
150	1,79	1,75	1,72	1,68	1,65	1,60	1,56	1,52	1,49	1,45
Limit starzenia	Obciążalność [pu]									
dzień=dzień	1,42	1,38	1,33	1,29	1,24	1,20	1,16	1,11	1,06	1,01
10 dni=rok	1,72	1,68	1,64	1,60	1,56	1,53	1,49	1,45	1,41	1,37

Problem regulacji napięcia pod obciążeniem

Najprostszym przypadkiem transformatora energetycznego dużej mocy, jest dwuzwojowy transformator z regulacją pod obciążeniem. Analizowane poniżej wyniki obliczeń dotyczą transformatora dwuzwojowego o dwóch przełącznikach zaczepek:

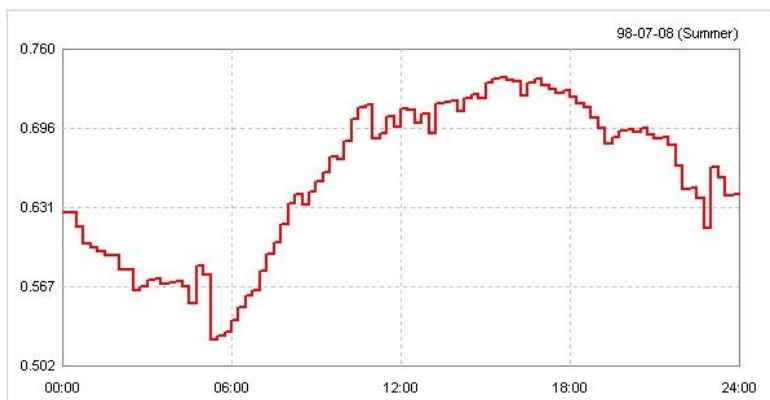
- regulacja bez obciążenia po stronie GN (H) w pięciu stopniach za pomocą uzwojenia regulacyjnego;
- regulacja podobciążeniowa za pomocą indukcyjnego przełącznika z uzwojeniem dodatkowym włączonym szeregowo.

Przykład wyników obliczeń zestawia tabela 2. Obliczenia wykonano dla okresu letniego, gdy w stacji transformatorowej rejestruje się maksymalnie 31°C, w godzinach południowych. Przykład obciążalności dobowej dla takiego dnia pokazano na rysunku 4.

Tabela 2. Przykład wybranych obliczeń obciążalności transformatora dwuzwojowego z regulacją *off-line* i *on-line*

Typ obciążenia	Pozycja przełącznika po stronie GN 110 kV	110,00	112,75	115,50	118,25	121,00
		↓	→			
STR 15 min	• Obciążalność prądowa [jw.]	1,43	1,44	1,46	1,47	1,48
	Hot-spot X [°C]	150	150	150	150	150
	Hot-spot H [°C]	138,3	135,5	132,8	130,2	127,7
	• Napięcie uzw. X [kV]	28,48	28,42	28,40	28,42	28,46
STR 480 min	• Obciążalność prądowa [jw.]	1,17	1,19	1,20	1,21	1,22
	Hot-spot X [°C]	130	130	130	130	130
	Hot-spot H [°C]	123,1	121,4	119,8	118,3	116,8
	• Napięcie uzw. X [kV]	28,38	28,68	28,66	28,68	28,37
LTR normal day	• Obciążalność prądowa [jw.]	0,76	0,77	0,78	0,79	0,80
	Hot-spot X [°C]	86,4	86,5	86,5	86,6	86,6
	Hot-spot H [°C]	82,9	82,1	81,3	80,5	79,7
	• Napięcie uzw. X [kV]	28,98	28,92	28,90	28,91	28,60
LTR 10 day	• Obciążalność prądowa [jw.]	1,07	1,08	1,09	1,10	1,11
	Hot-spot X [°C]	121,9	121,9	122,0	122,0	122,0
	Hot-spot H [°C]	115,8	114,4	113,0	111,7	110,4
	• Napięcie uzw. X [kV]	28,92	28,86	28,85	28,51	28,55

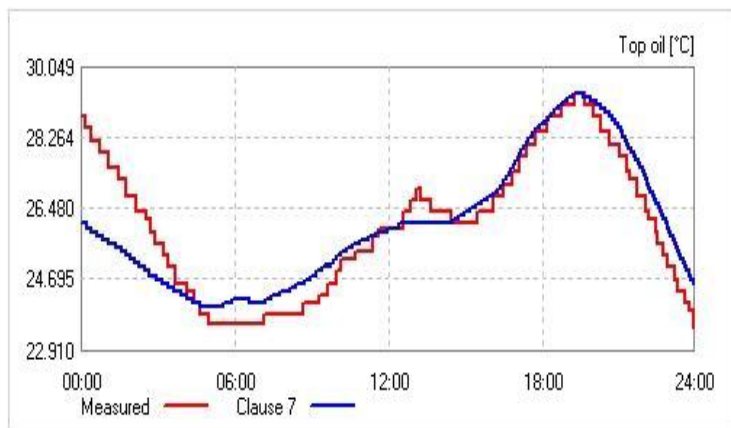
Obliczenia *LTR* dotyczą odpowiednio obciążalności nominalnej, czyli takiej, że jeden okres czasu (godzina, doba, rok) odpowiada starzeniu o takim samym czasie trwania (*LTR normal day*), lub w przypadku „*LTR 10 day*” obliczenie jest przeprowadzone przy założeniu, że w ciągu 10 dni pracy awaryjnej starzenie odpowiada okresowi 1 roku pracy normalnej (znamionowej).



Rys.4. Obciążalność dobowa w okresie letnim do przykładu obliczeń transformatora dwuuzwojeniowego.

Korekcja wykładników w równaniach cieplnych transformatora

Wyniki próby grzania transformatora wykonywanej u producenta są punktem wyjścia dla wszelkich obliczeń cieplnych transformatora w eksploatacji. Próba ta wykonywana jest dla ściśle zdefiniowanych warunków chłodzenia. Zwykle dla maksymalnego chłodzenia w warunkach zbliżonych do znamionowego obciążenia transformatora. Warunki takie, jak przy próbie grzania, występują w eksploatacji rzadko (lub nie występują nigdy), gdyż normą jest zmienność obciążenia transformatora, narzucenie napięcia na jednym z uzwojeń przez warunki stanu pracy systemu energetycznego, permanentny stan cieplnie nieustalony itd. Z próby grzania można również uzyskać wartości wykładników w równaniach cieplnych, które nie koniecznie muszą pokrywać się z podanymi w normach [2, 3]. Program *DTR* pozwala wybrać pomiędzy wartościami wykładników z normy lub podanymi przez producenta. Doświadczenie uczy, że wykładniki podane przez producenta dają wyniki dokładniejsze.



Rys.5. Przykład wyników obliczeń dla uzyskania skorygowanych wykładników w równaniach cieplnych transformatora: wykładniki m i n według normy 0,9 i 0,8 dla chłodzenia OFAF, wykładnik dla uzwojeń po korekcji $m=0,8685$

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe uwarunkowania, należy stwierdzić, że dokładność obliczeń cieplnych według przewodników [2, 3] musi być obciążona dużym stopniem niepewności. Aby ten stopień niepewności zmniejszyć niektórzy użytkownicy transformatorów podejmują działania

zmierzające do zwiększenia dokładności obliczeń. Jeśli zainstalować na transformatorze czujniki pomiaru temperatury oleju w górnej warstwie *TOT* (*Top Oil Temperature*), co nie jest zabiegiem ani specjalnie drogim ani skomplikowanym, to można ten pomiar wykorzystać do zwiększenia dokładności obliczeń cieplnych dla uzwojeń.

Opcję takich obliczeń posiada program *DTR*. Do programu wczytuje się dane (w funkcji czasu dla jednej doby) z pulpitu operatora takie jak: moce i napięcia poszczególnych uzwojeń, pozycje przełączników zaczepek, temperaturę otoczenia i oleju w górnej warstwie oraz stopień chłodzenia (zdefiniowany liczbą pracujących wentylatorów i pomp). W oparciu o te dane program dokonuje obliczeń temperatur oleju i uzwojeń i poprzez minimalizację błędu kwadratowego dla pomierzonych i obliczonych wartości *TOT* poszukuje wykładników w równaniach cieplnych dających najlepszą zgodność. Wynik takich obliczeń prezentuje rysunek 5.

Tak uzyskane nowe, skorygowane wykładniki, wykorzystuje się następnie do rutynowych obliczeń cieplnych transformatora. Dla każdego transformatora można wypracować tablicę wykładników dostosowaną do przewidywanych stopni chłodzenia transformatora.

Wnioski

Program *DTR*, którego niektóre tylko właściwości i wyniki zaprezentowano w referacie, służy do zarządzania obciążalnością transformatora, w systemie *on-line* i pozwala prognozować obciążenia awaryjne przy zdefiniowanych ograniczeniach prądowych, temperaturowych (*hot-spot*) lub starzeniowych.

Zaprezentowane wyniki obciążalności krótkotrwałej i długotrwałej w funkcji temperatury otoczenia wykazują zależność liniową.

Opcja programu wykorzystująca znajomość (wyniki pomiaru) maksymalnej temperatury oleju, poprzez korekcję wykładników w równaniach cieplnych, służy do zwiększenia dokładności obliczeń temperatur uzwojeń (*hot-spots*).

LITERATURA

- [1] Mosiński F., Piotrowski T., Bocheński B.: Power transformer rating – an example of a numerical programme application, Proc. of the Int. Conf. of Power Transformer TRANSFORMER'05, Piecyska, May 17-19 2005, pp. 77-82,
- [2] IEEE Std C57.91-1995 and C57.91-1995/Cor 1-2002 IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers
- [3] PN-IEC 60354 – Przewodnik obciążania transformatorów olejowych, 1999.
- [4] Xin Li, Mazur R.W., Allen Dan R., Swatek David R. – Specifying Transformer Winter and Summer Peak-Load Limits, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 20, No. 1, January 2005, p. 185

Autorzy: prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: mosinski@mail.p.lodz.pl;
dr inż. Tomasz Piotrowski, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: piotrtrm@mail.p.lodz.pl;
mgr inż. Bogusław Bocheński, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki, ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź, E-mail: bochensk@mail.p.lodz.pl;