

Bogusław BOCHEŃSKI¹

PRZESUWNIKI FAZOWE DWURDZENIOWE Z REGULACJĄ FAZY I NAPIĘCIA W ASPEKCIE MOŻLIWOŚCI OBLICZEŃ TEMPERATUR I DOPUSZCZALNYCH OBCIĄŻEŃ AWARYJNYCH

W referacie przedstawiono zagadnienie opracowania programu numerycznego do wyznaczania temperatur oleju i uzwojeń oraz obciążalności przesuwników fazowych, które znajdują zastosowanie do regulacji przesyłu mocy w sieci elektroenergetycznej. Ponadto przedstawiono krótkie porównanie przesuwników dwurdzeniowych i transformatorów, schemat elektryczny i zależności wykorzystywane do obliczania prądów fazowych, które różnią się od analogicznych stosowanych dla transformatorów.

1 WPROWADZENIE

Uwzględniając ogólny stan wiedzy na temat nagrzewania transformatorów [1, 2] oraz własne rozwiązania [3] podjęta została próba opracowania programu do obliczania temperatur i wyznaczania obciążalności przesuwników fazowych z regulacją napięcia. Interfejs i działanie programu oparte jest na autorskim programie DTR [2] opracowanym dla transformatorów energetycznych, który umożliwia oszacowanie temperatury oleju, uzwojeń, najgorętszych punktów uzwojeń oraz urządzeń dodatkowych typu połączenia, przepusty, przełączniki zaczepów, przekładniki. Na podstawie temperatury szacowane jest zesterzenie izolacji celulozowej i wyznaczone jest dopuszczalne przeciążenie za względu na zesterzenie izolacji lub największą dopuszczalną temperaturę uzwojeń.

¹ Instytut Elektroenergetyki Politechniki Łódzkiej, Stefanowskiego 18/22 90-924 Łódź, tel.: 426312678, e-mail: boguslaw.bochenski@p.lodz.pl

2 CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA TRANSFORMATORÓW I PRZESUWNIKÓW

2.1 Transformatory energetyczne z regulacją napięcia

Transformatory energetyczne stanowią liczną grupę urządzeń elektroenergetycznych o znaczeniu strategicznym. W grupie tej znajdują się jednostki o zróżnicowanej budowie zależnie od przeznaczenia i wysokości napięcia:

- a) transformatory rozdzielcze w sieciach średniego napięcia (SN) i wysokiego napięcia (WN) do 110 kV,
- b) transformatory przesyłowe w sieciach $WN > 110$ kV.

Transformatory rozdzielcze to zazwyczaj jednostki trójzwojeniowe lub dwuzwojeniowe, często z regulacją napięcia z zastosowaniem różnorodnych przełączników zaczepów i różnych schematów regulacji. Szczególnym przypadkiem są transformatory trójzwojeniowe, właśnie ze względu na mnogość możliwych wariantów regulacji oraz skomplikowanie obliczeń prądów w uzwojeniach.

W sieciach rozdzielczych raczej nie stosuje się autotransformatorów, które jednak znajdują zastosowanie w sieciach WN. Autotransformatory posiadają zazwyczaj uzwojenie kompensujące składową zerową prądu, a więc posiadają trzy uzwojenia podobnie do transformatorów trójzwojeniowych, z tym wyjątkiem, że obowiązują inne zależności na obliczanie prądów w uzwojeniach.

Pomimo wymienionych różnic między jednostkami mają one również kilka cech wspólnych. Są nimi m.in. budowa jednordzeniowa (w pojedynczej kadzi), przypadek ten dotyczy również ławy transformatorów jednofazowych, gdzie zakłada się, że wszystkie trzy jednostki są identyczne i rozpatrywane są globalnie jako jednostka trójfazowa. Inną wspólną cechą transformatorów jest zgodnie z nazwą, transformacja napięcia i prądu.

Wymienione cechy transformatorów wymusiły odpowiednie rozbudowanie programu DTR, aby uwzględnić wszystkie możliwe przypadki rodzaje transformatorów (autotransformatory, transformatory dwu- i trójzwojeniowe) oraz mnogość rozwiązań regulacji napięcia (przełączniki podobciążeniowe i/lub bezobciążeniowe, po stronie dolnego lub górnego napięcia, rezystancyjne lub indukcyjne, regulacja przy stałym strumieniu lub przy stałej mocy).

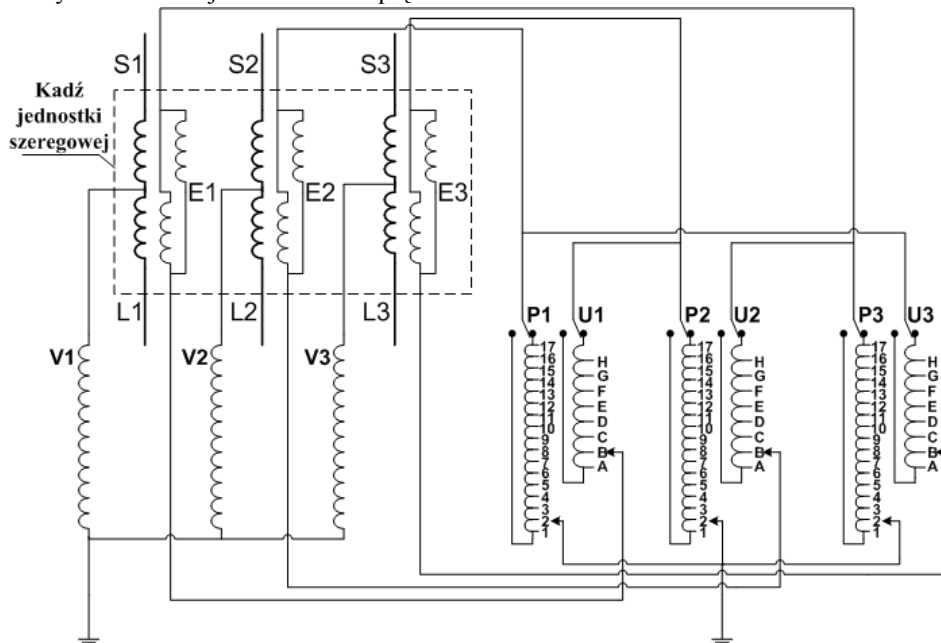
2.2 Przesuwniki fazowe

Budowa przesuwników fazowych jest zróżnicowana i charakteryzuje się skomplikowanym układem połączeń. Poniżej przedstawione zostały ich najważniejsze cechy:

- a) w przeciwieństwie do transformatorów włączane są do sieci o jednym poziomie napięcia,
- b) wykonane są jako jednostki jednordzeniowe lub dwurdzeniowe zamknięte w jednej lub dwóch kadziach,
- c) posiadają możliwość regulacji kąta fazowego i/lub wartości napięcia, a więc pozwalają na regulację przepływu mocy czynnej i/lub biernej w sieci,

- d) do analizy pracy konieczne jest użycie komputera m.in. ze względu na skomplikowane zależności między prądami w uzwojeniach oraz w algorytmie regulacji przepływów mocy i prądów w sieci elektroenergetycznej.

Efektom przepływu prądu przez uzwojenia są straty obciążeniowe wydzielane w postaci ciepła, które wraz ze stratami dodatkowymi w uzwojeniach odpowiedzialne są za przyrost temperatury uzwojeń. Za nagrzewanie oleju odpowiedzialne są całkowite straty obciążeniowe oraz straty jałowe powstające w rdzeniu. Straty jałowe w transformatorach zależą głównie od wartości napięcia zasilania – im wyższe napięcie tym większe straty jałowe. Ponadto w pewnych konstrukcjach przesuwników wielkość strat jałowych zależy zarówno od wartości napięcia zasilania jak również od kąta fazowego. Na rysunku 1 przedstawiono schemat przesuwnika z regulacją napięcia o mocy znamionowej 300 MVA i napięciu 240 kV.



Rys. 1 Schemat połączeń przesuwnika fazowego z regulacją napięcia; S, L – zaciski i uzwojenia szeregowe, E – uzwojenie dodatkowe jednostki szeregowej, V – uzwojenie wzbudzające jednostki wzbudzającej, P – uzwojenie regulacyjne (kąta fazowego), U – uzwojenie regulacyjne (napięcia).

Przedstawiona na rysunku 1 jednostka posiada dwa rdzenie zamknięte w oddzielnych kadziach (na rysunku 1 zaznaczono tylko każd szeregową, pozostałe uzwojenia zamknięte są w oddzielnej kadzi jako jednostka wzbudzająca). Pod względem elektrycznym jednostki są sprzężone, lecz są niezależne pod względem cieplnym dzięki oddzielnym systemom chłodzenia. Układ elektryczny składa się z 6 uzwojeń, trzy w jednostce szeregowej (S, L, E) i trzy w jednostce wzbudzającej (V, P, U). Prądy znamionowe poszczególnych uzwojeń przedstawiają się następująco:

2.3 Jednostka szeregowo

Prądy znamionowe uzwojeń S oraz L mają wartość:

$$I_{SN} = I_{LN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{300000}{\sqrt{3} \cdot 240} = 722,4 \quad (1)$$

Gdzie: I_{SN} , I_{LN} – prądy znamionowe uzwojeń S i L; S_N – moc znamionowa; U_N – napięcie znamionowe.

Prądy znamionowe uzwojenia E przedstawia wzór:

$$I_{EN} = I_{LN} \cdot \frac{2}{\sqrt{3} \cdot N_{PV}} \cdot \sin\left(\frac{D}{2}\right) \quad (2)$$

Gdzie: I_{EN} – prąd znamionowy uzwojenia E; N_{PV} – przekładnia zwojowa uzwojeń P/V; D – przesunięcie fazowe (tablica 1).

Tablica 1. Kąt fazowy D (stopnie kątowne) w funkcji położenia przełącznika zaczepów K

K	D	K	D
1	-39,77 °	17	0,00 °
2	-37,46 °	16	2,59 °
3	-35,12 °	15	5,18 °
4	-32,75 °	14	7,76 °
5	-30,35 °	13	10,33 °
6	-27,93 °	12	12,90 °
7	-25,48 °	11	15,45 °
8	-23,00 °	10	17,98 °
9	-20,50 °	9	20,50 °
10	-17,98 °	8	23,00 °
11	-15,45 °	7	25,48 °
12	-12,90 °	6	27,93 °
13	-10,33 °	5	30,35 °
14	-7,76 °	4	32,75 °
15	-5,18 °	3	35,12 °
16	-2,59 °	2	37,46 °
17	0,00 °	1	39,77 °

Tablica 2. Napięcie w funkcji położenia przełącznika zaczepów K

K	U	K	U
1	207,06 k	17	240,00 kV
2	209,00 k	16	241,94 kV
3	210,94 k	15	243,88 kV
4	213,26 k	14	245,81 kV
5	215,20 k	13	248,14 kV
6	217,52 k	12	250,08 kV
7	219,46 k	11	252,40 kV
8	221,40 k	10	254,34 kV
9	223,34 k	9	256,66 kV
10	225,66 k	8	258,60 kV
11	227,60 k	7	260,54 kV
12	229,92 k	6	262,48 kV
13	231,86 k	5	264,80 kV
14	234,19 k	4	266,74 kV
15	236,12 k	3	269,06 kV
16	238,06 k	2	271,00 kV
17	240,00 k	1	272,94 kV

Jednostka wzbudzająca

Prąd znamionowy uzwojenia U:

$$I_{UN} = I_{EN} \quad (3)$$

Gdzie: I_{UN} , I_{EN} – prądy znamionowe uzwojeń U i E.

Prąd uzwojenia P przedstawia wzór:

$$I_{PN} = I_{LN} \cdot \frac{2}{N_{PV}} \cdot \sin\left(\frac{D}{2}\right) \quad (4)$$

Gdzie: I_{PN} – prąd znamionowy uzwojenia P,
Prąd uzwojenia V przedstawia wzór:

$$I_{VN} = I_{LN} \cdot 2 \cdot \sin\left(\frac{D}{2}\right) + I_{UN} \cdot N_{UV} \quad (5)$$

Gdzie: I_{VN} – prąd znamionowy uzwojenia V; N_{UV} – przekładnia zwojowa uzwojeń U/V.

3 WYNIKI PRAC

Krótką analizą wyników równań 1 – 5 z rysunku 1 pozwala wyciągnąć wniosek, że temperatury najgorętszych punktów uzwojeń (tzw. hot spots) dla uzwojeń S i L zawsze będą rosły z zwiększeniem prądu obciążenia, chociażby ze względu na zwiększone straty obciążeniowe (I^2R). Nie jest to oczywiste w przypadku pozostałych uzwojeń, lecz sytuacja będzie podobna dla większości przypadków położenia przełączników zaczepów. Jeżeli natomiast zostanie wybrana skrajna pozycja przełącznika zaczepów w uzwojeniu P2, przy której przesunięcie kąta fazowego jest równe 0° , to prądy w pozostałych uzwojeniach będą równe 0 A zgodnie z przytoczonymi wcześniej wzorami, a więc i straty obciążeniowe będą równe 0 W. W jednostce wzbudzającej wówczas nie będą generowane straty obciążeniowe, a temperatura najgorętszych punktów uzwojeń powinna być równa temperaturze oleju. Stąd wniosek, że dla przesunięcia fazowego 0° jednostka szeregowa powinna wykazać zmniejszoną wrażliwość na przeciążenia ze względu na brak strat obciążeniowych w uzwojeniu E.

Uwzględniając powyższe zależności, dokumentację i własne doświadczenia opracowywany jest program numeryczny dla przesuwników fazowych o funkcjonalności programu DTR. W obecnej chwili umożliwia wykonanie obliczeń dla dwóch rodzajów przesuwników: jednordzeniowego oraz dwurdzeniowego o budowie przedstawionej w referacie.

4 PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zagadnienie opracowania programu numerycznego dla przesuwników fazowych pod kątem zależności wykorzystywanych do obliczeń prądów. Zależności te są bardziej skomplikowane niż analogiczne dla transformatorów, głównie ze względu na konieczność uwzględnienia funkcji trygonometrycznych.

Innym ważnym zagadnieniem jest zmiana mocy strat jałowych wraz ze zmianami kąta przesunięcia fazowego w pewnych typach przesuwników.

Ponadto, w jednostkach dwurdzeniowych, w których jednostki posiadają niezależne systemy chłodzenia, należy uwzględnić ten fakt w obliczeniach. Pod względem elektrycznym jednostki muszą być traktowane jako jedna całość, jednak temperatury oleju będą różne dla obu jednostek.

Przy projektowaniu przedstawionego oprogramowania należało rozwiązać dodatkowy problem, który również nie występował przy transformatorach. Próba grzania przesuwników fazowych jest bardzo skomplikowana, gdyż w przeciwieństwie

do transformatorów, które mają przeprowadzaną zazwyczaj jedną próbę grzania, przesuwniki przechodzą kilka prób nagrzewania, oddzielne dla różnych konfiguracji przełączników zaczepów. Przyczyną takiego postępowania jest fakt, że są to pojedyncze jednostki i skomplikowana budowa nie pozwala dokładnie przewidzieć ich wszystkich zachowań.

Na koniec dodać należy, że etap testowania programu DTR w wersji dla transformatorów już został zakończony, natomiast wersja dla przesuwników fazowych jest wersją wczesno-rozwojową.

5 LITERATURA

1. IEEE Std C57.91-1995 and C57.91-1995/Cor 1-2002 "IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Transformers"
2. PN-IEC 60354, Przewodnik obciążania transformatorów olejowych, (1999)
3. Mosinski F., Bochenski B., Piotrowski T.: *Power transformer rating – an example of a numerical programme application*, Proc. of the Int. Conference of Power Transformer TRANSFORMER'05, Pieczyska, May 17-19 2005, pp. 77-82.

TWO-CORE PHASE SHIFTING BOOST TRANSFORMERS IN AN ASPECT OF MAKING COMPUTATIONS OF TEMPERATURES AND ALLOWABLE EMERGENCY LOADING CURRENTS

The problem of working out of the numerical program to estimate oil and copper windings temperatures and load ability of phase shifting transformers (PST) is considered in this paper. Moreover, a short comparison of power transformers and PSTs, the electrical diagram and equations used to calculate winding currents are also presented.

The calculations of temperatures and load ability of PSTs are more complicated than for power transformers, mainly because the estimation of winding currents is impossible without using trigonometric functions. Additionally, some of PSTs are designed as a two-tank unit with common cooling system or independent one. In case of independent cooling systems of two-tank PST, the unit should be considered as one unit for electrical calculations and separate units for thermal calculations.