

Analiza wpływu rozkładu napięć na funkcjonowanie układu elektrycznego stacji prób wysokonapięciowych silników elektrycznych

Streszczenie. Przedmiotem analiz jest rozkład napięć w trójfazowym układzie elektrycznym stacji prób silników indukcyjnych, mającej służyć do badania obiektów o mocach znamionowych do 3 MW i napięciach znamionowych do 15 kV. W podstawowym układzie połączeń stacji prób badany silnik zasilany jest z transformatora, zasilanego przez falowniki, do których energia elektryczna jest dostarczana z obwodu napięcia stałego. Obwód napięcia stałego zasilony jest przez inne falowniki, współpracujące przez transformator z generatorem obciążającym badany silnik. Przy zbyt dużych spadkach napięcia na transformatorach występują problemy z uzyskaniem wymaganych napięć zasilania badanych silników i mocy ich obciążenia.

Abstract The subject of the analysis is the voltage distribution in the three-phase electrical system of the induction motor testing station, which is intended to be used for testing objects with rated power up to 3 MW and rated voltage up to 15 kV. In the basic circuit arrangement of the test station, the motor under test is supplied from a transformer. The transformer is powered by inverters to which electricity is supplied from the DC voltage circuit. Other inverters supply this DC voltage circuit. These cooperate via the transformer with the generator that loads the engine under test. If the voltage drops on the transformers are too high, there are problems with obtaining the required supply voltages for the motors under test and their load power. (**Analysis of the influence of voltages drops on the operation of the electrical system of high voltage electric motor test stand**).

Słowa kluczowe: stacja prób, regulacja napięcia, rozkład napięć, maszyna indukcyjna.

Keywords: test bench, voltage control, voltage drops, induction machine.

Wstęp

Elektryczne hamownie badawcze przeznaczone do próbnego obciążania silników indukcyjnych wykonywane są w różnych układach elektrycznych. Najstarszy stosowany w różnych układach elektrycznych. Najstarszy stosowany układ stanowi komutatorowy, obcowzbudny generator prądu stałego, sprzężony mechanicznie z maszyną badaną i obciążony rezystancyjnie [1]. Regulacja prądu wzbudzenia generatora umożliwia zmianę wielkości obciążenia, stwarzanego przez generator dla badanego silnika. Przy badaniach silnika indukcyjnego układ ten nie daje możliwości pracy silnika na niestabilnej części jego charakterystyki mechanicznej. Drugą wadą układu jest wydzielanie mocy obciążenia silnika w postaci ciepła na rezystancji obciążenia twornika generatora. Wariantem tego rozwiązania jest obciążanie badanego silnika hamulcem mechanicznym lub magnetycznym [2]. Wymienionych wad pozbawiony jest wielomaszynowy układ Leonarda, w którym przez regulację prądu wzbudzenia maszyn prądu stałego można sterować momentem obciążenia badanego silnika [1]. Rozwiązanie to wywodzi się z czasów, kiedy niedostępne były regulowane napędy prądu przemiennego. Jego zaletą jest prostota sterowania mocą układu oraz wynikająca z tego jego niezawodność, natomiast wadami są: wielomaszynowa struktura, a co za tym idzie niska sprawność i duże wymiary całej instalacji, pobór mocy biernej przez maszynę badaną i prądnicę AC, a także duże nakłady inwestycyjne. Tych mankamentów pozbawiony jest układ elektryczny generatora prądu stałego współpracującego z siecią prądu przemiennego przez odpowiedni przekształtnik energoelektroniczny, na ogół tyrystorowy, zastępujący układ Leonarda. Przekształtnik umożliwia zarówno wymuszenie niskiej prędkości generatora i badanego silnika, jak i zwrot mocy obciążenia do sieci prądu przemiennego. Moc zwracana jest do sieci prądu przemiennego przy prądach niesinusoidalnych, co wymusza zastosowanie odpowiedniej ich filtracji po stronie prądu przemiennego przekształtnika (np. przy użyciu filtrów rezonansowych). Pewnym mankamentem eksploatacyjnym jest również konieczność okresowej kontroli układu szczotki-komutator generatora. Wad tych pozbawiony jest układ hamowni oparty o klatkową maszynę indukcyjną,

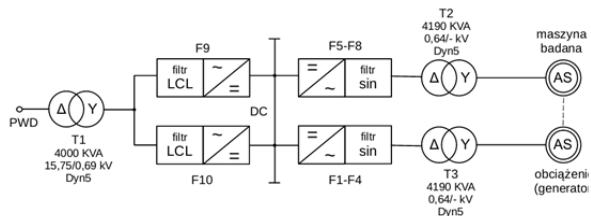
współpracującą z siecią prądu przemiennego przez przekształtnik tranzystorowy, zbudowany z dwóch falowników: maszynowego i sieciowego, połączonych przez obwód prądu stałego i sterowanych wektorowo [3]. Układ taki umożliwia pracę silnika badanego na niestabilnej części jego charakterystyki mechanicznej, a dzięki zastosowaniu w falowniku sieciowym modulacji PWM prądy sieciowe są praktycznie sinusoidalne. Stosowane są różne warianty tego rozwiązania [4,5,6,7]. Innym rozwiązaniem problemu obciążania badanego silnika jest użycie do tego celu maszyny dwustronnie zasilanej, czyli maszyny indukcyjnej pierścieniowej z falownikowo zasilanym wirnikiem [8,9]. Sterowanie prądami wirnika umożliwia regulację mocy obciążenia badanego silnika, a także regulację wydawanej do sieci mocy biernej. Moc czynna i bierna wydawane są do sieci przez stojan maszyny, a więc prądy sieciowe nie wymagają żadnej filtracji.

Ogólnie można zauważyć, że stosowane układy obciążania badanych silników indukcyjnych topologicznie przypominają układy generacyjne stosowane w elektrowniach wiatrowych [10].

Rozwinięciem układu hamowni przedstawionej w [3] jest układ będący przedmiotem artykułu. Przedmiotowa stacja prób wysokonapięciowych silników indukcyjnych przeznaczona jest do badania maszyn o mocach znamionowych do 3 MW przy napięciu znamionowym sięgającym 15 kV / 50 Hz. Hamownia przeznaczona jest do pracy w dwóch układach elektrycznych:

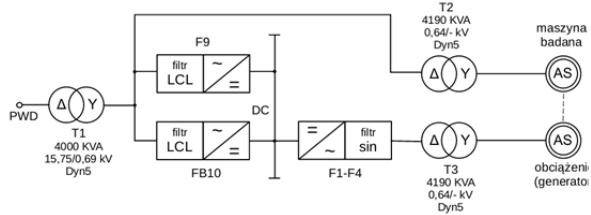
1. W układzie podstawowym (rys. 1) silnik badany zasilany jest z transformatora T2, zasilanego z czterech falowników F5-F8, zasilanych z obwodu napięcia stałego, wspólnego dla wszystkich dziesięciu falowników stacji prób. Falowniki F1-F4 transformują do postaci prądu i napięcia stałego moc czynną pochodzącą z maszyny indukcyjnej sprzęgniętej mechanicznie z silnikiem badanym, pracującej generatorowo, służącej do obciążania silnika. Maszyna ta współpracuje z falownikami poprzez transformator T3. Z szyną napięcia stałego współpracują również dwa pozostałe falowniki układu, F9 i F10, zasilone z transformatora T1, sprzęgającego cały układ stacji prób z systemem elektroenergetycznym napięcia trójfazowego

15 kV / 50 Hz. W układzie tym moc czynna pobierana przez silnik badany pochodzi z szyny napięcia stałego. Jest ona następnie wydawana przez generator hamowni na tą szynę, dzięki czemu z sieci 15 kV pobierana jest, *via* transformator T1 i falowniki F9 i F10, tylko moc czynna potrzebna do pokrycia strat mocy w całym układzie hamowni, tj. przede wszystkim strat mocy w obu maszynach wirujących i ich transformatorach. Moc bierna silnika badanego i generatora obciążającego pochodzi z obu grup falowników (odpowiednio, F5-F8 i F1-F4).



Rys.1. Stacja prób – układ 1

2. W alternatywnym układzie elektrycznym (rys. 2), przeznaczonym do badania silników największych mocy, badany silnik zasilany jest z transformatora T2, zasilanego bezpośrednio z transformatora T1. Układ obciążenia silnika badanego jest taki sam, jak w układzie 1 (generator indukcyjny, transformator T3, falowniki F1-F4, szyna napięcia stałego). Identyfikacyjny jest również układ sprzęgający stację prób z systemem elektroenergetycznym, złożony z transformatora T1 i falowników F9 i F10, pracujących na szynie napięcia stałego. W tym układzie moc czynna pobierana przez badany silnik pochodzi z szyny napięcia stałego i pobierana jest z generatora. Z sieci 15 kV pobierana jest, *via* transformator T1 i falowniki F9 i F10, moc czynna potrzebna do pokrycia strat mocy w całym układzie, tj. przede wszystkim strat mocy w obu maszynach wirujących i ich transformatorach. Moc bierna silnika badanego pobierana jest w całości z sieci 15 kV, *via* transformator T1, natomiast moc bierna generatora – z falowników F1-F4.



Rys.2. Stacja prób – układ 2

Opis problemu

Na etapie projektowym pojawiły się trzy problemy, dotyczące obu układów elektrycznych hamowni:

1. Spadki napięć w układach, a szczególnie na transformatorach T1 i T2, mogą spowodować, że niemożliwe będzie utrzymanie napięcia znamionowego badanego silnika. Problem narasta ze wzrostem prądu silnika, co powoduje wzrost spadków napięć na transformatorach układu, w mniejszym stopniu na falownikach. Odbiorca stacji przewidywał obciążanie badanych silników do 1,6 mocy znamionowej silnika, przy prądach dochodzących nawet do 1,7 kA (dla napięcia zasilania silnika 400 V / 50 Hz). W pierwszym układzie elektrycznym hamowni na obniżenie napięcia zasilania silnika wpływa również efektywny spadek napięcia na pośredniczących grupach falowników: F9-F10 oraz F5-F8. Spadki napięć występują nie tylko na falownikach, ale

również na filtrach wejściowych (LCL) falowników F9-F10 i filtrach wyjściowych (sinus) falowników F1-F8. W drugim układzie elektrycznym hamowni nie ma falowników F5-F8, ale rośnie spadek napięcia na impedancji zwarcia transformatora T1, z powodu poboru z niego mocy biernej badanego silnika. Należy zaznaczyć, że transformator T1 nie był doborany projektowo, ponieważ znajduje się on u odbiorcy stacji prób i pochodzi z jej poprzedniego układu elektrycznego.

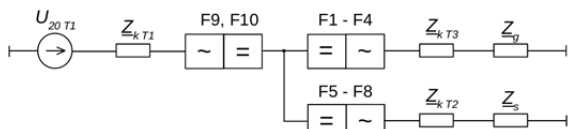
2. Dla prawidłowego funkcjonowania pierwszego układu elektrycznego hamowni niezbędne jest, aby napięcie zasilania falowników F9 i F10 było wyższe od postulowanego napięcia wyjściowego falowników F5-F8, o wartości wynikającej z napięcia znamionowego badanego silnika, przekładni napięciowej transformatora T2 i spadku napięcia na jego impedancji zwarcia i na filtrach sinusowych falowników F5-F8. Analogiczny warunek dotyczy falowników F1-F4. Pożądana wartość ich napięcia wyjściowego wynika z napięcia znamionowego generatora obciążającego silnik, przekładni napięciowej transformatora T3 i spadku napięcia na impedancji zwarcia transformatora i na filtrach sinusowych tych falowników. Warunek zachowania napięcia znamionowego generatora przy różnych jego prądach nie ma takiego znaczenia, jak w przypadku badanego silnika, lecz ze spadkiem wartości tego napięcia maleje moment i moc czynna generatora (z kwadratem napięcia).

3. Dla prawidłowego funkcjonowania drugiego układu elektrycznego hamowni niezbędne jest, aby napięcie zasilania falowników F9 i F10 było wyższe od postulowanego napięcia wyjściowego falowników F1-F4. Warunek ten jest taki sam, jak w układzie pierwszym, ale trudniejszy do spełnienia, z powodu poboru mocy biernej przez badany silnik z transformatora T1 – napięcie wyjściowe tego transformatora zawsze będzie mniejsze, niż w układzie pierwszym. Z tego samego powodu kłopotliwe może być utrzymanie napięcia znamionowego zarówno badanego silnika, jak i generatora obciążającego.

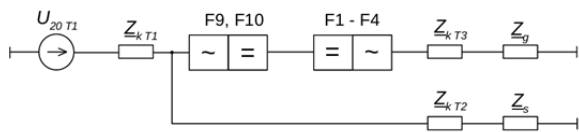
Metodyka badań

Przeprowadzono badania obliczeniowe wyszczególnionych problemów, modelując oba układy elektryczne hamowni za pomocą zastępczych obwodów elektrycznych, dla stanów ustalonych, sinusoidalnych, symetrycznych. Obliczenia przeprowadzono dla składowej symetrycznej zgodnej prądów i napięć fazowych, przy przyjęciu zastępczego skojarzenia gwiazdowego wszystkich urządzeń elektrycznych hamowni. W ten sposób obliczenia prowadzono *de facto* jako obliczenia obwodów jednofazowych w stanach ustalonych, z użyciem metody symbolicznej. Transformatory zamodelowano jako ich zespolone impedancje zwarcia, a badany silnik i generator obciążający jako zespolone impedancje o wartościach wynikających z wartości napięcia na zaciskach maszyny i jej prądu. Grupy falowników wraz z ich filtrami wejściowymi (LCL) lub wyjściowymi (sinus) uwzględniono w obliczeniach przez wartości spadków napięcia na nich, częściowo zależne liniowo od wartości ich prądów wejściowych (F9, F10) lub wyjściowych (F1-F8). Schematy elektryczne obwodów zastępczych obu układów hamowni przedstawiają rysunki 3 i 4. Do obliczeń przyjęto silnik o największej przewidzianej mocy znamionowej, tj. 3 MW, przy napięciu znamionowym 6 kV / 50 Hz, $\cos\phi = 0,85$ i sprawności $\eta = 0,95$. Założono, że generator obciążający jest taką samą maszyną i pracuje z takimi samymi prądami, zapewniając moc czynną identyczną z mocą czynną silnika. To uproszczenie przyjęto celem symetryzacji wartości mocy czynnej i biernej obu maszyn. Przyjęto, że z transformatora T1 zawsze, w obu układach,

poberana jest pewna moc czynna, pokrywająca straty mocy czynnej w całym układzie hamowni, o wielkości 20% mocy znamionowej silnika, tj. 600 kW. Dla uproszczenia obliczeń przyjęto, że prąd czynny transformatora T1 stanowi 20% znamionowego prądu czynnego silnika (przeliczonego na poziom napięcia wyjściowego transformatora T1).



Rys.3. Schemat elektrycznego obwodu zastępczego układu 1



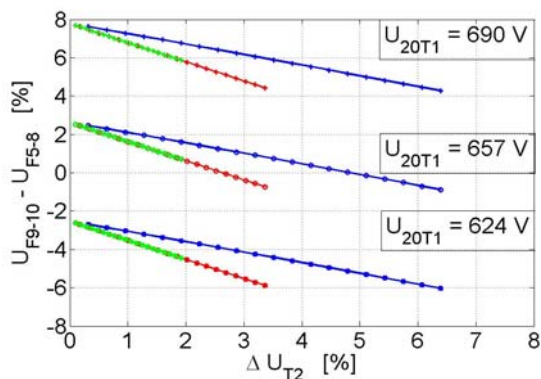
Rys.4. Schemat elektrycznego obwodu zastępczego układu 2

Obliczeniowo wyznaczono statyczne charakterystyki robocze obu układów, dla trzech wartości prądów badanego silnika: znamionowej przy znamionowym $\cos\phi$ silnika, znamionowego prądu biernego silnika przy znamionowym prądzie czynnego i prądu biernego o wartości 30% prądu znamionowego, przy braku prądu czynnego. Celem praktycznym badań było określenie dopuszczalnych wartości napięć zwarcia transformatorów T2 i T3, umożliwiających poprawną pracę obu układów hamowni, a także wyznaczenie ewentualnie wymaganej korekty wartości jałowego napięcia wyjściowego transformatora T1. Podawane dalej wartości procentowe napięć odnoszą się do napięcia 640 V strony nn transformatorów T2 i T3.

Wyniki badań

Wyniki badań obliczeniowych przedstawiają charakterystyki na rysunkach 5-8 dla układu 1 i 9-11 dla układu 2.

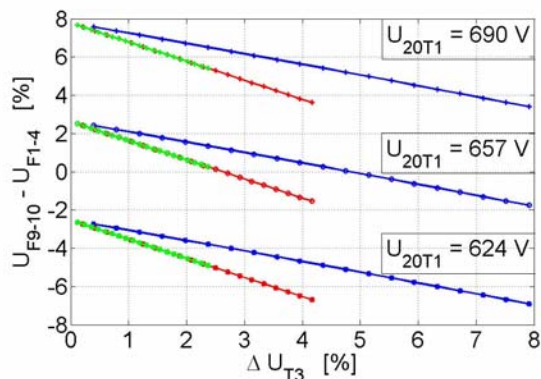
Rysunek 5 przedstawia zależność różnicy wartości skutecznych napięć wejściowych falowników F9, F10 i napięć wyjściowych falowników F5-F8, od spadku napięcia na transformatorze T2.



Rys.5. Zależność różnicy wartości skutecznych napięć wejściowych falowników F9-F10 i napięć wyjściowych falowników F5-F8 od spadku napięcia na transformatorze T2; kolor niebieski – znamionowy prąd silnika, czerwony – znamionowy prąd bierny silnika, zielony – prąd bierny silnika równy 30%

Spadek ten zależy zarówno od napięcia zwarcia transformatora, jak i od wielkości prądu badanego silnika. W obliczeniach przyjmowano stały prąd silnika, a zmieniano napięcie zwarcia transformatora, w zakresie od 0 do 7,2% (wartość napięcia zwarcia transformatora T2 ma wynosić ok. 3,6% wg wstępnej deklaracji producenta). Różnica napięć falowników powinna być większa od naturalnego spadku napięcia na obu grupach falowników i towarzyszących im filtrach (LCL, sinus), który znamionowo wynosi ok. 1,5% napięcia 640 V. Wartość różnicy mniejsza od tej wartości oznacza spadek napięcia wyjściowego falowników F5-F8, skutkujący spadkiem napięcia zasilania silnika poniżej jego wartości znamionowej. Widoczne trzy charakterystyki wyznaczono dla trzech różnych wartości napięcia znamionowego strony nn transformatora T1: 102,7% (wartość obecna), 107,8% i 97,5%¹. Z charakterystyk wynika, że przy napięciu 97,5% falowniki F5-F8 w ogóle nie są w stanie wytworzyć napięcia znamionowego badanego silnika 6 kV – różnica napięć falowników jest ujemna. Z kolei napięcie 107,8% gwarantuje spełnienie tego wymogu praktycznie niezależnie od wielkości spadku napięcia na transformatorze T2. Obciążenie układu prądem wyłącznie biernym (silnik na biegu jałowym) skutkuje szybszym wzrostem wartości spadków napięć z wartością prądu, niż przy znamionowym $\cos\phi = 0.85$. Jest to efekt indukcyjnego charakteru impedancji zwarciovych wszystkich transformatorów układu.

Rysunek 6 przedstawia zależność różnicy wartości skutecznych napięć wejściowych falowników F9, F10 i napięć wyjściowych falowników F1-F4, od spadku napięcia na transformatorze T3. Spadek ten zależy zarówno od napięcia zwarcia transformatora, jak i od wielkości prądu generatora. W obliczeniach przyjmowano stały prąd generatora, a zmieniano napięcie zwarcia transformatora, w zakresie od 0 do 9% (wartość napięcia zwarcia transformatora T3 ma wynosić ok. 4,5% wg wstępnej deklaracji jego producenta – nie jest to taki sam transformator, jak T2). Widoczne trzy charakterystyki wyznaczono dla trzech różnych wartości napięcia znamionowego strony nn transformatora T1.



Rys.6. Zależność różnicy wartości skutecznych napięć wejściowych falowników F9-F10 i napięć wyjściowych falowników F1-F4 od spadku napięcia na transformatorze T3; znaczenie kolorów jak na rysunku 5

Wyniki obliczeń są podobne do przedstawionych na rysunku 5. Z charakterystyk wynika, że przy napięciu

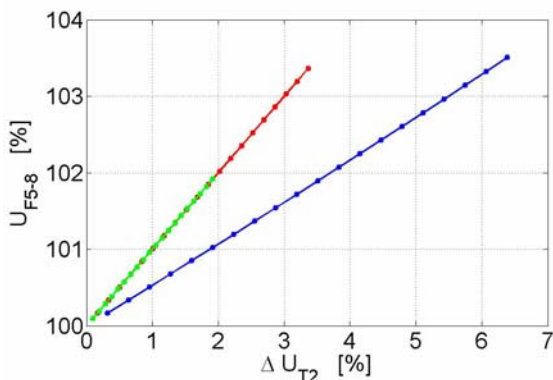
¹ Są to wartości stanowiące, odpowiednio, 100%, 105% i 95% obecnego napięcia jałowego strony nn transformatora T1, tutaj podane w odniesieniu do wartości 640 V, czyli są to wartości 657, 690 i 624 V.

jałowym transformatora T1 wynoszącym 97,5% falowniki F1-F4 w ogóle nie są w stanie wytworzyć napięcia znamionowego generatora 6 kV, co oznacza spadek zdolności generatora do rozwijania momentu obciążającego silnik. Z kolei napięcie 107,8% (690 V) gwarantuje spełnienie tego wymogu praktycznie niezależnie od wielkości spadku napięcia na transformatorze T3. Praca generatora z prądem wyłącznie biernym (generator w stanie jałowym) skutkuje szybszym wzrostem wartości spadków napięć z wartością prądu, niż przy znamionowym $\cos\varphi = 0,85$. Jest to skutek indukcyjnego charakteru impedancji zwarciovych wszystkich transformatorów układu.

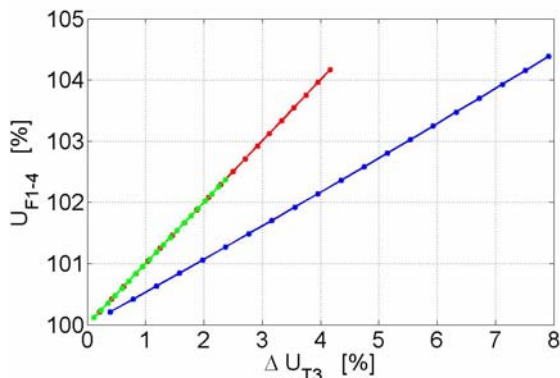
Rysunek 7 przedstawia zależność wymaganego napięcia wyjściowego falowników F5-F8 (za filtrami wyjściowymi) od spadku napięcia na transformatorze T2. Napięcie to musi być podnoszone wraz ze wzrostem prądu silnika, celem utrzymania jego napięcia znamionowego.

Analogiczna zależność dla falowników F1-F4 przedstawiona jest na rysunku 8. Wymagany wzrost wartości skutecznej napięć wyjściowych falowników F1-F8 skutkuje spadkiem wartości różnic napięć, przedstawionym na rysunkach 5 i 6.

Należy zaznaczyć, że przy obciążeniu transformatora T1 prądem wyłącznie czynnym, o stałej wartości skutecznej 20% znamionowego prądu czynnego silnika, jego napięcie wyjściowe jest praktycznie stałe. Za wszystkie zmienności napięć w układzie 1 odpowiadają transformatory T2 i T3 oraz falowniki z ich filtrami.

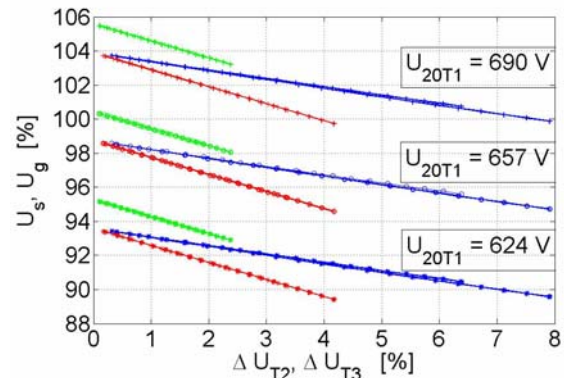


Rys.7. Zależność wymaganego napięcia wyjściowego falowników F5-F8 od spadku napięcia na transformatorze T2; znaczenie kolorów jak na rysunku 5



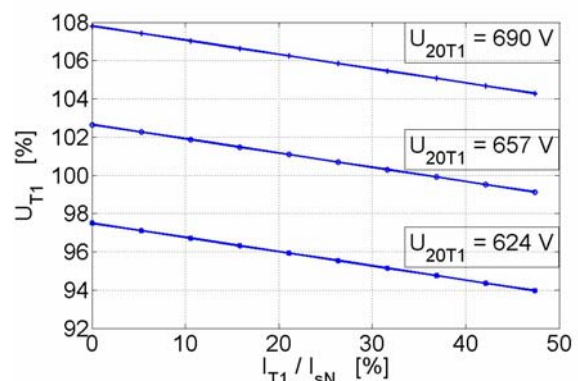
Rys.8. Zależność wymaganego napięcia wyjściowego falowników F1-F4 od spadku napięcia na transformatorze T3; znaczenie kolorów jak na rysunku 5

Rysunek 9 przedstawia zależności napięcia silnika i generatora w układzie 2, od spadków napięcia, odpowiednio, na transformatorze T2 i T3. Spadki te zależą zarówno od napięcia zwarcia danego transformatora, jak i od wielkości prądu danej maszyny.



Rys.9. Zależności napięcia silnika i generatora od spadku napięcia na transformatorze T2 i T3; znaczenie kolorów jak na rysunku 5

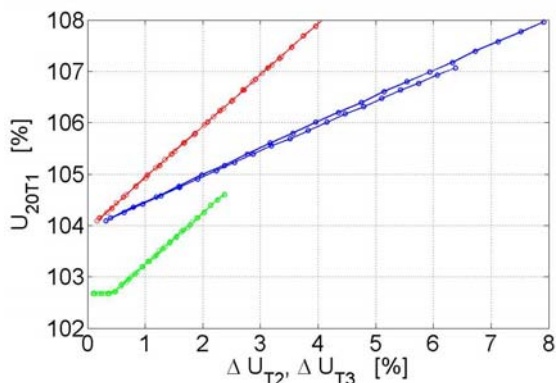
W obliczeniach przyjmowano stały prąd obu maszyn, a zmieniano napięcie zwarcia transformatora, w zakresie od 0 do 7.2% dla T2 i od 0 do 9% dla T3. Charakterystyki obwodu silnikowego i obwodu generatora praktycznie pokrywają się i dlatego zamieszczono je razem. Podobnie jak na rysunkach 5 i 6, charakterystyki te wyznaczono dla trzech różnych wartości napięcia znamionowego strony nn transformatora T1: 97,5%, 102,7%, 107,8% (tj. 624, 657, 690 V). Widoczne jest, że przy napięciach 97.5% i 102.7% nie jest możliwe utrzymanie napięcia znamionowego ani silnika badanego, ani generatora obciążającego. Podobnie jak w układzie 1, obciążenie układu prądem wyłącznie biernym (silnik na biegu jałowym) skutkuje szybszym wzrostem wartości spadków napięć z wartością prądu, niż przy znamionowym $\cos\varphi = 0,85$. Jest to efekt indukcyjnego charakteru impedancji zwarciovych wszystkich transformatorów układu. Inaczej niż w układzie 1, transformator T1 jest obciążony nie tylko mocą czynną o wartości 20% mocy znamionowej silnika, ale także mocą bierną silnika. W konsekwencji napięcie wyjściowe transformatora T1 maleje ze wzrostem wartości mocy biernej silnika, co przedstawia rysunek 10.



Rys.10. Napięcie wyjściowe transformatora T1 w funkcji jego prądu obciążenia, podanego w odniesieniu do prądu znamionowego silnika przeliczonego na poziom napięcia 640 V

Z przedstawionymi charakterystykami korespondują zależności przedstawione na rysunku 11. Przedstawiają one wartości wymaganego znamionowego napięcia strony

nn transformatora T1 w funkcji spadku napięcia na transformatorze T2 i T3. Jak widać, obecne napięcie jałowe transformatora (102,7%, tj. 657 V) jest niewystarczające zarówno dla utrzymania znamionowego napięcia badanego silnika, jak i znamionowego napięcia obciążającego go generatora.



Rys.11. Zależności wymaganego znamionowego napięcia strony nn transformatora T1 od spadku napięcia na transformatorze T2 lub T3; znaczenie kolorów jak na rysunku 5

Wnioski

1. W układzie 1 zachowanie wymaganej nadwyżki napięcia wyjściowego falowników F9 i F10 nad napięciem wyjściowym falowników F5-F8 i F1-F4 wymaga niewielkiego podwyższenia znamionowego napięcia strony nn transformatora T1, wg obliczeń do 102% jego wartości obecnej (z 657 V do 670 V), dla napięcia zwarcia transformatora T3 wynoszącego 4,5%. Przy obecnej wartości napięcia (657 V), napięcia zwarcia transformatorów T2 i T3 nie powinny przekraczać 2%. Jest to wartość nierealistycznie mała i dlatego podwyższenie znamionowego napięcia strony nn transformatora T1 jest niezbędne, w stopniu dyktowanym przez transformator o większym napięciu zwarcia, czyli T3. Jednakże, wymagana wartość skuteczna napięcia wyjściowego falowników F1-F4 może zostać obniżona, przez obniżenie wymaganej wartości skutecznej napięcia generatora. Biorąc pod uwagę, że moment maszyny indukcyjnej zależy od wartości skutecznej napięcia maszyny kwadratowo, można sobie pozwolić na jej obniżenie do 90% U_N . Skutkuje to obniżenie momentów maszyny w stosunku 0,81. Jeżeli katalogowa przeciążalność generatora momentem wynosi 2, to jego moment krytyczny przy tak obniżonym zasilaniu wynosi 1,62 momentu znamionowego, a więc jest wyraźnie większy od momentu znamionowego badanego silnika (o tych samych danych znamionowych) i odpowiada wymaganiom zamawiającego. Wówczas wymagane, podwyższone znamionowe napięcie strony nn transformatora T1 może wynosić tylko 101% napięcia obecnego, tj. 664 V.

2. W układzie 2 zachowanie wymaganej nadwyżki napięcia wyjściowego falowników F9 i F10 nad napięciem wyjściowym falowników F1-F4 nie jest możliwe nawet przy 2% napięciu zwarcia transformatora T3. Podobnie, nawet przy 2% napięciu zwarcia transformatora T2 nie jest możliwe zachowanie wartości napięcia znamionowego silnika. Jest to spowodowane spadkiem napięcia na impedancji zwarcia transformatora T1, praktycznie nie obecnym w układzie 1. Dlatego niezbędne jest, większe niż w układzie 1, podwyższenie napięcia strony nn transformatora T1. Biorąc pod uwagę możliwość obniżenia wartości napięcia generatora, wymagana wartość napięcia transformatora T1 jest dyktowana tylko przez obwód

zasilania silnika i powinna zostać podwyższona do 106% jego obecnej wartości, tj. do 697 V.

3. W układzie 2 istnieje ograniczenie mocy czynnej obciążenia, związane z ograniczeniem wartości skutecznej prądu falowników F9 i F10. Trwale dopuszczalny, sumaryczny prąd skuteczny tych falowników wynosi 3400 A, co limituje ich moc pozorną na poziomie 3,76 MVA (dla $U = 640$ V). Jest to wartość zbyt mała, aby przy mocy znamionowej badanego silnika 3 MW umożliwić jego obciążenie mocą równą $1.6P_N$, tj. 4,8 MW.

4. Przy blokowym sterowaniu tranzystorów falownika (bez modulacji PWM) możliwe jest uzyskanie wartości szczytowej 1. harmonicznej napięcia wyjściowego falownika większej od wartości wejściowego napięcia stałego. Można to wykorzystać w falownikach generatorowych F1-F4, do uzyskania znamionowego (w sensie wartości skutecznej 1. harmonicznej napięcia) zasilania generatorów. Analogiczne rozwiązanie dla falowników silnikowych F5-F8 nie jest możliwe, z uwagi na wymaganą przepisami sinusoidalność zasilania badanego silnika. Warunkiem *sine qua non* zastosowania takiego rozwiązania jest udostępnianie przez sterowniki falowników F1-F4 takiej opcji ich pracy.

Autorzy: dr inż. Tomasz Drabek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: drabek@agh.edu.pl; dr inż. Paweł Dybowski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: dybowski@agh.edu; mgr inż. Paweł Mularz, e-mail: mularz.pawel@gmail.com; mgr inż. Łukasz Wójciak, Elsta Sp. z o.o. ul. Janińska 32, 32-020 Wieliczka, e-mail: lukasz.wojciak@elsta.pl

LITERATURA

- [1] Błaśński W., Nowacki Z., Układ hamowania elektrycznego do badania napędów, *Zeszyty Naukowe Politechniki Łódzkiej - Elektryka*, z. 123 (2011), nr 1108, 17-26
- [2] Wang-Zhiwei, Li-Zhongli, Guo-Zhijun, Wu-Jingbo, Sun-Zhengwei, The Drive System Design for Magnetorheological Fluid Brake Test Bench, *Proceedings of the 2013 International Conference on Advanced Mechatronic Systems*, Luoyang, China, 2013
- [3] Polak A., Decker A., Hamownie badawcze nowej generacji, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 111 (2016), nr 3, 175-179
- [4] Kroics K., Development of Induction Motor Based Test Bench for Supercapacitor Braking Energy Recovery System Testing, *IEEE 59st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) 2018*
- [5] Rozhentsova N., Ivanova V., Fetisov L., Yarmuhametov I., Development of a stand construction concept for safe and efficient after-repair tests of induction motors up to 1 kV, *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*
- [6] Burenin V., Zarembo J., Žiravecka A., Ribickis L., Model of Laboratory Test Bench Setup for Testing Electrical Machines, *IEEE 61st International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) 2020*
- [7] Roncero C., Milanés M., Guerrero M., Romero E., Sterowane obciążenie elektroniczne z możliwością recyklingu energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 4, 154-159
- [8] Lerch T., Transient states of wind power plant with doubly fed induction generator, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 6, 118-124
- [9] Lerch T., Energooszczędny układ obciążenia maszyny indukcyjnej na stacji prób, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 6, 180-184
- [10] Glinka T., Glinka M., Warianty rozwiązania elektrowni wiatrowej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), nr 1b, 239-245