

Praca i sterowanie stacji prób wysokonapięciowych silników elektrycznych

Streszczenie. Przedmiotem artykułu jest analiza pracy i synteza sterowania stacji prób silników indukcyjnych, mającej służyć do badania silników o mocach znamionowych do 3 MW i napięciach znamionowych do 15 kV. Badany silnik i obciążający go generator indukcyjny są zasilone przez przemienniki częstotliwości realizujące sterowanie skalarnie obu maszyn, umożliwiające płynną regulację zasilania silnika i jego obciążenia. Algorytm sterowania obciążeniem umożliwia jego automatyczną zmianę w zadanym zakresie, co w połączeniu z automatyzacją pomiarów redukuje zaangażowanie personelu technicznego w prowadzone badania. Jednakże, współpraca obu maszyn z falownikami rodzi określone problemy techniczne, związane ze stabilnością pracy całego układu, zwłaszcza w sytuacji małych obciążeń badanego silnika. W artykule przedstawiono rozwiązania tych problemów oraz odpowiedni algorytm sterowania generatorem obciążającym wraz z wynikami badań symulacyjnych całego układu stacji prób.

Abstract The paper's subject is the analysis of the operation and synthesis of the control of an induction motor test bench, which is to be used to test motors with rated powers up to 3 MW and rated voltages up to 15 kV. The tested motor and the loading induction generator are powered by inverters implementing the scalar control of both machines. The inverters enable smooth adjustment of the motor power supply and its load. The load control algorithm allows its automatic variation in the set range, which, combined with the automation of measurements, reduces the involvement of technical personnel in the tests. However, the cooperation of both machines with inverters raises specific technical problems related to the stability of the system, especially in the case of low loads of the tested motor. The paper presents solutions to these problems, an appropriate algorithm for controlling the load generator, and the results of simulation tests of the control system. (**Operation and control of the test bench for high-voltage electric motors**).

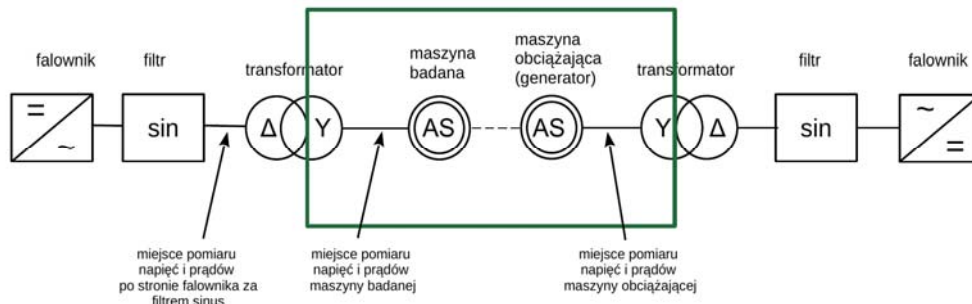
Słowa kluczowe: stacja prób, regulacja napięcia, rozkład napięć, maszyna indukcyjna.

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

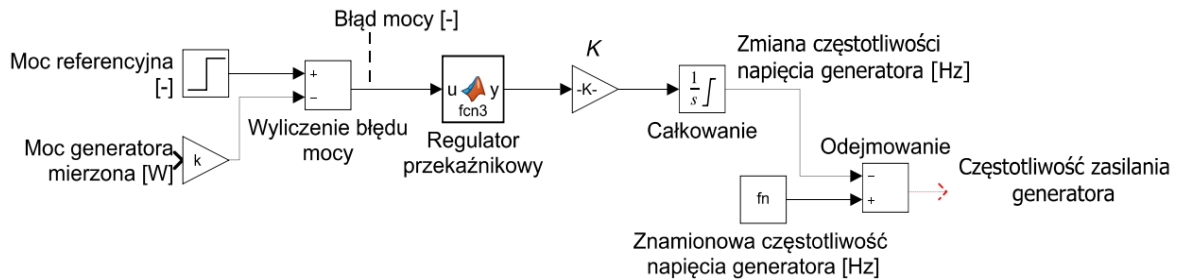
Wstęp

Obciążenie silnika indukcyjnego podczas normalnych badań nowych typów silników indukcyjnych realizowane jest w różnych układach elektrycznych i mechanicznych. Przy dużych mocach badanych silników problemem technicznym jest zarówno stworzenie możliwości regulowanego obciążania silnika, jak i zapewnienie możliwości zmiany wartości skutecznej trójfazowego, symetrycznego napięcia zasilającego silnik. Za najprostszy układ obciążenia silnika można uznać komutatorowy, obcowzbudny generator prądu stałego, obciążony rezystancją [1]. Regulacja wartości tej rezystancji lub prądu wzbudzenia generatora umożliwiającą zmianę wielkości obciążenia badanego silnika. Wadą energetyczną tego układu jest wydzielanie mocy obciążenia silnika w postaci ciepła na rezystancji obciążenia twornika generatora. Energia elektryczna pobrana przez badany silnik jest więc tracona bezpowrotnie, a suche rezystancje dużych mocy mają znaczne gabaryty, co fizycznie rozbudowuje układ hamowni. Kolejną poważną wadą tego rozwiązania jest brak możliwości pracy badanego silnika na niestabilnej części charakterystyki mechanicznej. Za inny wariant takiej hamowni można uznać obciążanie badanego silnika hamulcem mechanicznym lub magnetycznym [2]. Regulowanym źródłem zasilania silnika może być trójfazowy autotransformator lub regulator indukcyjny. Wymienionych wad układu obciążenia pozbawiony jest trójfazowy układ Leonarda, w którym przy regulacji prądów wzbudzenia maszyn prądu stałego można sterować momentem obciążenia silnika badanego [1]. Zaletami układu Leonarda są: możliwość zmuszenia badanego silnika do pracy na niestabilnej części charakterystyki mechanicznej oraz oddawanie do sieci większej części mocy obciążenia badanego silnika. Jako zalety należy też wymienić prostotę sterowania mocą obciążenia silnika oraz dużą niezawodność i trwałość układu. Wadami układu Leonarda są: niska sprawność i duże wymiary całej instalacji dla silników wysokich napięć ($U \geq 1$ kV). Wadą jest również pobór mocy biernej przez maszynę badaną i generator indukcyjny [1]. Negatywnie zwracają uwagę duże nakłady inwestycyjne związane z budową takiej hamowni dla silników wysokich napięć. Otwarty pozostaje problem zmiany wartości skutecznej napięcia zasilającego badany

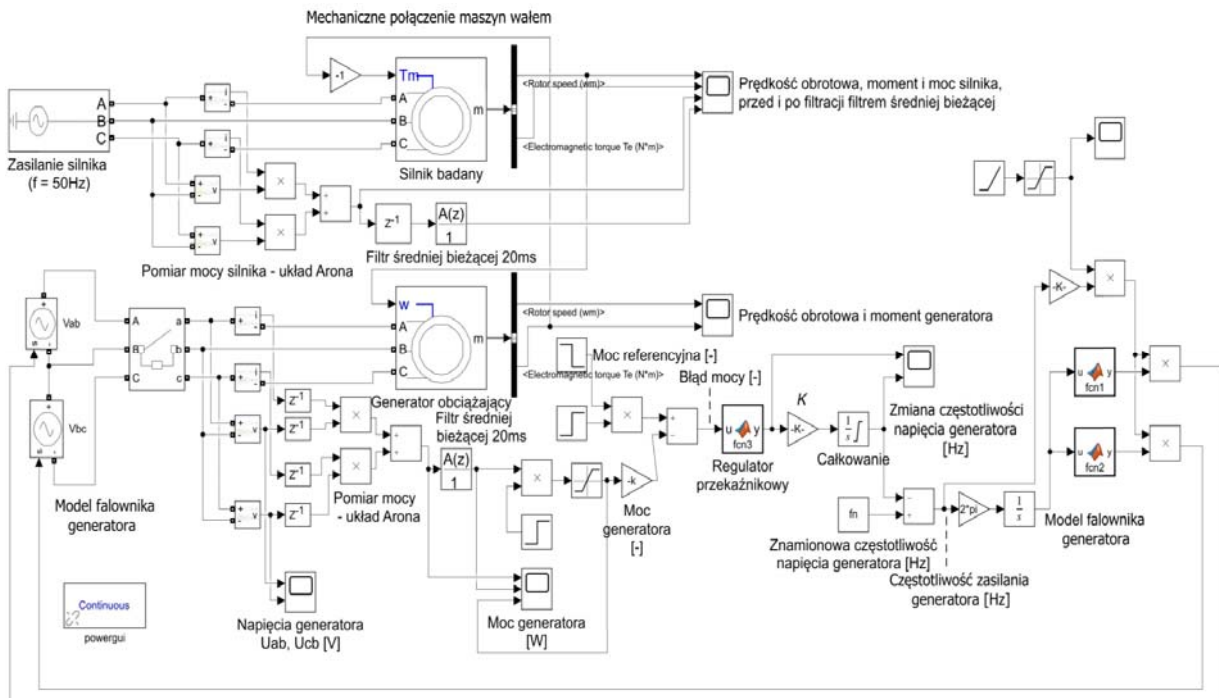
silnik. Wymienionych mankamentów układu Leonarda pozbawiony jest układ obciążenia w postaci generatora prądu stałego współpracującego bezpośrednio z siecią prądu przemiennego przez odpowiedni przekształtnik energoelektroniczny. Przekształtnik umożliwia zarówno zwrot mocy obciążenia silnika do sieci prądu przemiennego z wyższą sprawnością niż układ Leonarda, jak i wymuszenie pracy badanego silnika na niestabilnej części charakterystyki mechanicznej. Jeżeli energia jest zwracana do sieci prądu przemiennego za pomocą prądów niesinusoidalnych (np. przy użyciu typowego przekształtnika tyrystorowego), to niezbędne jest zastosowanie odpowiedniej ich filtracji po stronie prądu przemiennego przekształtnika. Pewnym mankamentem eksploatacyjnym jest konieczność okresowej kontroli układu szczotki-komutator generatora. Ograniczenie tego układu leży w ograniczonych mocy dostępnych rynkowo maszyn prądu stałego. Wymienionych wad pozbawiony jest układ hamowni oparty o generator indukcyjny, współpracujący z siecią prądu przemiennego przez przekształtnik zbudowany z dwóch falowników tranzystorowych: maszynowego i sieciowego, połączonych przez obwód prądu stałego i sterowanych wektorowo [3]. Układ taki umożliwia pracę silnika badanego na niestabilnej części charakterystyki mechanicznej, a dzięki zastosowaniu w falowniku sieciowym modulacji PWM prądy sieciowe są praktycznie sinusoidalne. Sprawność układy jest wyraźnie wyższa niż układu Leonarda. Stosowane są różne warianty tego rozwiązania [4-9]. Innym rozwiązaniem problemu obciążania badanego silnika jest użycie do tego celu maszyny dwustronnie zasilanej, czyli maszyny indukcyjnej pierścieniowej z falownikowo zasilanym wirnikiem [10,11]. Sterowanie prądami wirnika umożliwia regulację mocy obciążenia badanego silnika, a także wydawanie do sieci mocy biernej. Moc bierna w całości, a czynna w większej części, wydawane są do sieci przez stojan maszyny, w postaci prądów sinusoidalnych, a więc nie jest potrzebna ich filtracja. Wadą tego rozwiązania jest konieczność posiadania przekładni mechanicznej, dostosowującej prędkość silnika do prędkości generatora MDZ przy różnych liczbach par biegunów obu maszyn.



Rys.1. Schemat blokowy układu elektrycznego stacji prób silników indukcyjnych



Rys.2. Regulator mocy czynnej generatora obciążającego silnik badany



Rys. 3. Symulacyjny modelu układu regulacji mocy obciążenia badanego silnika; w prawej części rysunku, pomiędzy pionowymi liniami przerywanymi, znajduje się regulator mocy czynnej generatora z rysunku 2.

Praktycznie nie ma też możliwości pracy silnika badanego na niestabilnej części jego charakterystyki mechanicznej.

W artykule zaprezentowano układ sterowania obciążeniem badanego silnika, w postaci generatora indukcyjnego współpracującego z siecią elektryczną poprzez przemiennik częstotliwości. Przemiennik ten umożliwia zwrot mocy obciążenia silnika do sieci. Badany silnik zasilony jest z drugiego przemiennika częstotliwości, który umożliwia zmianę wartości skutecznej napięcia zasilającego silnik. Układ zbudowany jest w topologii „mocy krążącej”. Dodatkowo przekształtniki sieciowe, podczas pracy układu na "by-pass" mają możliwość kompensowania mocy biernej. Taki układ hamowni do badania silników indukcyjnych jest stosowany także do budowy hamowni

silników samochodowych [12,13]. Artykuł przedstawia również problemy techniczne występujące podczas współpracy silnika z przemiennikiem przy regulacji wartości skutecznej napięcia zasilania silnika.

Układ regulacji obciążenia badanego silnika

Układ elektryczny hamowni przedstawiono blokowo na rysunku 1. Badany silnik indukcyjny zasilany jest z przemiennika częstotliwości lub bezpośrednio z sieci. Posiada on wyjściowy filtr sinusowy. Z silnikiem współpracuje poprzez transformator z odczepami o różnych wartościach napięcia wyjściowego. Analogiczny układ towarzyszy generatorowi indukcyjnemu, obciążającemu badany silnik. Falownik silnika badanego ma zapewnić możliwość zmiany wartości skutecznej napięcia zasilania

silnika. Falownik generatora ma umożliwiać zmianę mocy czynnej generatora i w ten sposób zmianę obciążenia silnika. Oba falowniki umożliwiają przepływ energii w obu kierunkach. Zmiana obciążenia silnika wymaga zmiany zarówno wartości skutecznej napięcia generatora, jak i jego częstotliwości. Obniżenie prędkości wirującego pola magnetycznego w generatorze poniżej prędkości silnika skutkuje wydawaniem mocy czynnej przez generator do jego falownika. Moc ta obciąża silnik napędzający generator. Układ ma tą zaletę, że można badać maszyny o różnej liczbie biegunów.

Do układu z rysunku 1 opracowano układ automatycznej regulacji obciążenia badanego silnika, który wykorzystuje dedykowany regulator mocy generatora obciążającego. Finalnym celem działania regulatora jest wymuszenie zadanego prądu silnika. Simulink-owy model tego regulatora przedstawia rysunek 2. Regulator realizuje kontrolę mocy czynnej wydawanej przez generator do falownika, poprzez obniżenie częstotliwości napięcia zasilającego generator. Spadek częstotliwości powoduje spadek prędkości synchronicznej generatora poniżej prędkości synchronicznej silnika, co skutkuje pojawieniem się momentu obciążenia silnika. Iloczyn tego momentu i podsynchronicznej prędkości całego zespołu jest mocą czynną dostarczaną generatorowi przez badany silnik. Zależność mocy obciążenia silnika od spadku prędkości synchronicznej generatora jest monotoniczna, pod warunkiem, że silnik pracuje na stabilnej części swojej charakterystyki mechanicznej. Sterowanie generatora od strony falownika jest sterowaniem skalarnym, w którym obniżeniu częstotliwości napięcia trójfazowego towarzyszy proporcjonalne obniżenie jego wartości skutecznej. Regulacja mocy czynnej generatora może być realizowana przez odpowiednio wolną zmianę częstotliwości zasilania generatora. Odpowiednio wolna zmiana tej częstotliwości zachowuje statyzm i w ten sposób stabilność pracy układu silnik-generator.

Wielkością wejściową do regulatora z rysunku 2 jest błąd mocy podany jako liczba niemianowana. Jest nią błąd mocy [W] podzielony przez czynną moc znamionową generatora [W]. Błąd mocy [W] jest różnicą wartości mocy referencyjnej i mierzonej w układzie Arona moc wydawanej przez generator do falownika. Mierzona moc generatora przechodzi przez filtr dolnoprzepustowy, celem usunięcia zakłóceń pomiarowych. W symulacjach był to filtr średniej bieżącej o oknie filtracyjnym szerokości 20 ms. Błąd mocy wchodzi na wejście regulatora przekątnikowego, ze strefą nieczułości o szerokości 2% mocy znamionowej generatora. Sygnał wyjściowy regulatora przyjmuje wartości:

- 1, gdy błąd mocy jest większy niż 1% mocy znamionowej generatora, tj. moc zmierzona jest mniejsza od referencyjnej więcej niż o 1% mocy znamionowej,
- (-1), gdy błąd mocy jest mniejszy niż (-1)% mocy znamionowej czynnej generatora, tj. moc zmierzona jest większa od referencyjnej więcej niż o 1% mocy znamionowej,
- 0, gdy błąd mocy zawiera się w przedziale od (-1)% do 1% mocy znamionowej generatora.

Sygnał wyjściowy y z regulatora ($y = 1, 0, -1$) trafia do integratora, całkującego w dziedzinie czasu, którego celem działania jest naliczenie zmiany częstotliwości [Hz] napięcia zasilania generatora. Tempo całkowania integratora ustala współczynnik wzmocnienia K [$1/s^2$] sygnału y , wyrażony wzorem:

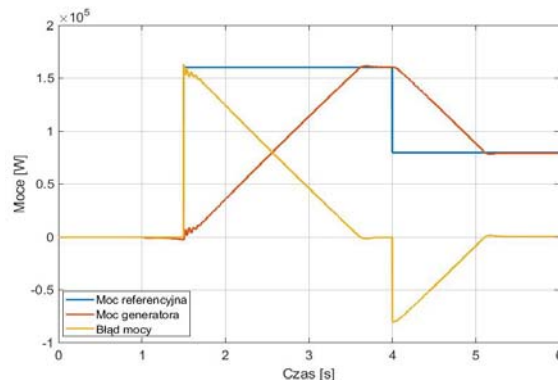
$$(1) \quad K = \frac{s_N \cdot f_N}{t_{rN}}$$

gdzie: s_N – poślizg znamionowy generatora, jako liczba dodatnia: $s_N = |(n_0 - n_N) / n_0|$, n_0 – prędkość synchroniczna generatora, n_N – znamionowa prędkość generatora, f_N – znamionowa częstotliwość napięcia stojana generatora, t_{rN} – zadawany czas zmiany mocy czynnej generatora od wartości 0 do wartości jego czynnej mocy znamionowej.

Wartość wyjściowa z integratora [Hz] jest odejmowana od wartości tej częstotliwości zasilania generatora [Hz], która gwarantuje bieg jałowy jego i badanego silnika. Typowo jest to 50 Hz. Uzyskana różnica to częstotliwość napięcia generatora, gwarantująca uzyskanie referencyjnej wartości jego mocy czynnej. Moc obciążenia badanego silnika jest nieco większa, z powodu strat mocy w generatorze i strat mechanicznych generatora i silnika.

Rysunek 3 przedstawia model symulacyjny całego układu regulacji, z obiema maszynami indukcyjnymi (tutaj identycznymi) i przedstawionym sterowaniem mocy generatora. Rysunek 4 przedstawia symulacyjny przebieg czasowy mocy generatora. Rysunek 5 zawiera towarzyszące tej regulacji przebiegi prędkości i momentu generatora. Użyty w symulacji niskonapięciowy (400 V, 50 Hz) generator klatkowy o mocy znamionowej 160 kW i dwóch parach biegunów ma poślizg znamionowy $s_N = 0,016$ i częstotliwość znamionową $f_N = 50$ Hz. Czas t_{rN} nastawiano w granicach od 2 do 8 sekund. Zmniejszenie tego czasu poniżej 2 sekund skutkowało utratą stabilności całego układu – pojawiały się narastające oscylacje prędkości zespołu silnik-generator. Jest to spowodowane tym, że przy zbyt dynamicznych zmianach częstotliwości napięcia generatora, jego prędkość i moc czynna przestają na nie odpowiadać wg transmitancji obiektu II rzędu. Możliwość zastosowania regulatora z rysunku 2 wynika z możliwości przybliżenia dynamiki obu maszyn podczas regulacji dynamiką obiektu II rzędu. Przebiegi z rysunków 4 i 5 dotyczą minimalnego czasu $t_{rN} = 2$ s. Współczynnik wzmocnienia K ma wówczas wartość:

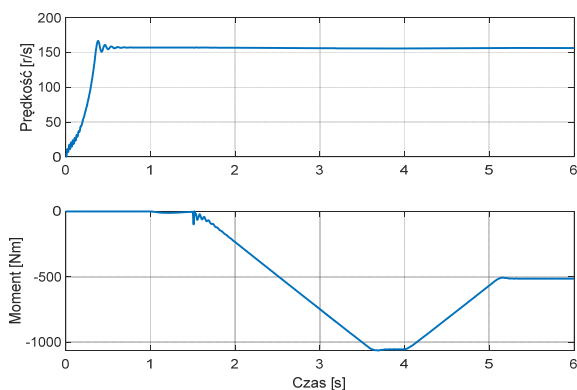
$$(2) \quad K = \frac{s_N \cdot f_N}{t_{rN}} = \frac{0,016 \cdot 50}{2} = 0,4 \left[\frac{1}{s^2} \right]$$



Rys.4. Przebieg regulowanej mocy czynnej generatora: najpierw (od $t = 1,5$ s) z biegu jałowego do 160 kW ($t = 3,6$ s), potem (od $t = 4$ s) do 80 kW ($t = 5,2$ s)

Przedstawiony układ regulacji mocy generatora działa prawidłowo przy pracy silnika na stabilnej części jego charakterystyki mechanicznej. Przy pracy na części niestabilnej konieczna jest zmiana układu regulacji mocy. Wielkością bezpośrednio zadawaną pozostaje częstotliwość napięcia generatora. Jednakże założenie o monotonicznym wzroście mocy czynnej generatora ze spadkiem częstotliwości jego zasilania przestaje być prawdziwe. Spadek prędkości synchronicznej generatora wywołuje spadek jego mocy. Dlatego odejmowanie częstotliwości obecne w końcowej części algorytmu z

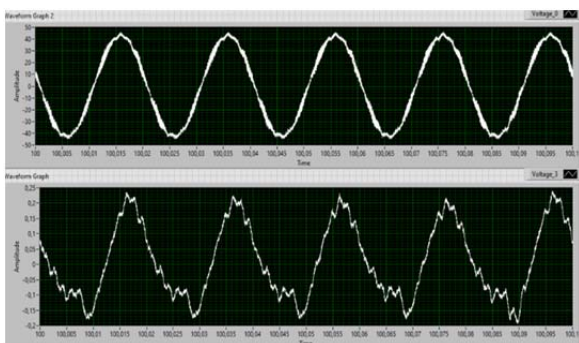
rysunku 2 przestaje być potrzebne – moc zależy monotonicznie od częstotliwości zasilania generatora naliczonej przez integrator regulatora.



Rys. 5. Przebieg prędkości zespołu i momentu generatora podczas symulacji jak na rysunku 4. Najpierw silnik wykonuje rozruch naturalny do prędkości synchronicznej (generator nie jest zasilony), następnie ($t = 1$ s) jest załączane napięcie na generator z jego falownika, a regulacja mocy generatora rozpoczyna się w chwili czasowej $t = 1,5$ s

Współpraca silnika z przemiennikiem częstotliwości

Przy falownikowym zasilaniu silnika stwierdzono występowanie odkształceń prądu silnika od sinusoidy. Pojawiały się one w stanie biegu jałowego lub małego obciążenia silnika, zwłaszcza przy wartościach skutecznych napięcia zasilającego (50 Hz) wyraźnie mniejszych od napięcia znamionowego silnika. Przykładowe przebiegi napięcia i prądu silnika w takiej sytuacji przedstawia rysunek 6.



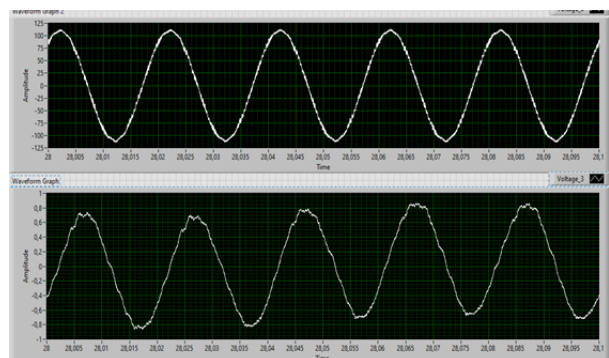
Rys. 6. Przebiegi czasowe napięcia i prądu jednej linii zasilania silnika w stanie biegu jałowego, przy napięciu zasilania silnika wynoszącym $0,4U_N$ ($f = 50$ Hz)

Zastąpienie falownika z filtrem sinusowym napięciem sieciowym powodowało zniknięcie zaburzeń kształtu prądów silnika. Jednoznacznie wskazuje to, że źródłem tych zaburzeń był falownik z filtrem.

Wskazano dwa powody występowania odkształceń prądów silnika. Pierwszym powodem były zjawiska rezonansu nieliniowego, występujące w układzie elektrycznym pomiędzy nieliniowymi indukcyjnościami silnika badanego i zasilającego go transformatora a pojemnościami wyjściowego filtra sinusowego (rezonansowego typu LC) falownika. Bezpośrednio za występowanie tych zjawisk odpowiadają trzy pojemności filtra. Są to relatywnie duże wartości – moc bierna dla częstotliwości 50 Hz wydawana przez kondensatory filtra jest większa od znamionowej mocy biernej maszyny 160 kW (rysunek 3). Z powodu nieliniowych charakterystyk magnesowania silnika (głównie) i transformatora pośredniczącego (w mniejszym stopniu) kondensatory powodują wzbudzenie drgań niestacjonarnych w prądach

układu i deformację kształtu ich przebiegów czasowych. Dociążenie silnika mocą czynną zmienia tę sytuację, likwidując odkształcenia prądów silnika.

Drugim powodem odkształceń prądów silnika na biegu jałowym jest współpraca silnika z kondensatorami filtra w całości pokrywającymi jego zapotrzebowanie na moc bierną. Prowadzi ona do zjawiska generatorowego samowzbudzenia się maszyny indukcyjnej i próby ustalenia się na jej zaciskach napięcia o wartości skutecznej i częstotliwości odbiegających od wartości narzucanych przez falownik. Z powodu dużych wartości pojemności filtra samowzbudzenie się napięcia na zaciskach silnika następuje do wartości skutecznej zbliżonej do napięcia znamionowego silnika i nieco wyższej. Jednocześnie falownik narzuca swoje napięcie sinusoidalne o zadanej wartości skutecznej, często dużo niższej od napięcia wzbudzanego. Powoduje to przepływ biernych prądów wyrównawczych przede wszystkim pomiędzy silnikiem z kondensatorami a falownikiem. Prądy takie nie muszą być ani symetryczne, ani sinusoidalne, ani stacjonarne [14]. Należy zauważyć, że wg dokonanych rejestracji zaburzenia kształtu prądów prawie nie występują przy napięciach zasilania silników zbliżonych do ich wartości znamionowych. Prądy silników są wówczas praktycznie sinusoidalne, choć występują niewielkie amplitudowo i wolnozmiennie wahania ich przebiegów – rysunek 7. Jest to spowodowane brakiem prądów wyrównawczych w sytuacji, gdy napięcie z falownika jest zbliżone do napięcia samowzbudzenia [15].



Rys. 7. Przebiegi czasowe napięcia i prądu jednej linii zasilania silnika w stanie biegu jałowego, przy napięciu zasilania silnika wynoszącym $1,1U_N$ ($f = 50$ Hz)

Wnioski

1. Regulator mocy czynnej generatora realizuje statyczną, a więc dość wolną, regulację mocy obciążającego, realizowaną przez jego falownik. Dzięki temu jest to regulacja gwarantująca brak oscylacji prędkości i mocy maszyn (przy odpowiednim dużym czasie t_N). Szybsza regulacja mocy wymagałaby zastosowania sterowania wektorowego generatora. Należy jednak nadmienić, że nie jest to praktycznie wymagane – opóźnienia rzędu sekund, a nawet kilkunastu sekund, przy wykonywaniu kolejnych pomiarów na stacji prób nie mają praktycznego znaczenia.
2. W układzie regulacji wielkością wymagającą indywidualnej nastawy jest czas t_N . Stanowi to kłopot dla obsługi stacji prób. Można ten kłopot rozwiązać przez sporządzenie tabeli „bezpiecznych”, tzn. gwarantujących brak oscylacji prędkości i mocy obu maszyn podczas pracy regulatora, czasów t_N , w zależności od mocy znamionowej i napięcia znamionowego generatora. Konieczność podania poślizgu znamionowego s_N i częstotliwości znamionowej f_N generatora nie jest kłopotliwa, ponieważ łatwo ustalić ich wartości na podstawie danych z tabliczki znamionowej generatora.

3. Obwód elektryczny złożony z magazynów energii w postaci nieliniowych indukcyjności faz badanego silnika i pośredniczącego transformatora oraz kondensatorów o znacznych pojemnościach, w sytuacji niewielkiego obciążenia obwodu mocą czynną ma naturalną tendencję do zachowywania się w sposób niestabilny. W takim obwodzie energia elektryczna swobodnie przepływa pomiędzy indukcyjnościami, pojemnościami i źródłem napięcia. Skutkuje to quasi-losowymi zmianami wartości prądów w różnych miejscach całego układu. Kres tym swobodnym przepływom kładzie dopiero zwiększenie rezystancji obwodu, czyli zwiększenie wielkości mocy czynnej odbieranej z obwodu. Powoduje to wzrost współczynnika tłumienia obwodu i w konsekwencji zanik odkształceń jego prądów.

4. Znaczący wpływ na omówione zjawiska miały parametry badanej maszyny, a przede wszystkim jej indukcyjności. Dla różnych maszyn wzbudzenia pojawiały się przy różnych poziomach napięć, nawet bliskich napięciu znamionowemu. Analiza tych zjawisk wymaga dalszych badań.

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. Sebastian Wilczyński, Elsta Sp. Z o.o. ul. Janińska 32, 32-020 Wieliczka, e-mail: sebastian.wilczynski@elsta.pl

LITERATURA

- [1] Błasiński 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., Decner A., Hamownie badawcze nowej generacji, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 111 (2016), nr 3, 175-179
- [4] Polak A., Decner A., Nowoczesne stanowiska badawcze i hamownie wyposażone w wirtualne i tradycyjne przyrządy pomiarowe, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 117 (2018), nr 1, 51-55
- [5] Biskup T., Cieniuch A., Jurkiewicz M., Kołodziej H., Sontowski J., Chmielewski W., Maźnio S., Przekształtnikowe stacje prób silników trakcyjnych, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, 113 (2017), nr 1, 129-134
- [6] Kroics K., Development of Induction Motor Based Test Bench for Supercapacitor Braking Energy Recovery System Testing, *IEEE 59th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON) 2018*
- [7] 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)*
- [8] 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*
- [9] Roncero C., Milanés M., Guerrero M., Romero E., Sterowane obciążenie elektroniczne z możliwością recyklingu energii, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 4, 154-159
- [10] Lerch T., Transient states of wind power plant with doubly fed induction generator, *Przegląd Elektrotechniczny*, 87 (2011), nr 6, 118-124
- [11] Lerch T., Energooszczędny układ obciążenia maszyny indukcyjnej na stacji prób, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), nr 6, 180-184
- [12] Adib M., Vahedi A., Robust industrial dynamic load emulation dynamometer for evaluating EVs machines based on sliding mode control, *Designs*, 6.2022
- [13] Lee K., Lee J., Back J., Lee Y., A Robust Emulation of Mechanical Loads Using a Disturbance-Observer, *Energies*, 12.2019
- [14] Bolkowski S., *Elektrotechnika, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne*, Warszawa 2021
- [15] Drabek T., Dybowski P., Mularz P., Wójciak Ł., Analiza wpływu rozkładu napięć na funkcjonowanie układu elektrycznego stacji prób wysokonapięciowych silników elektrycznych, *Przegląd Elektrotechniczny*, 98 (2022), nr 8, 174-178