

doi:10.15199/48.2021.06.18

Prądy łożyskowe i napięcia wałowe w maszynach elektrycznych – przyczyny i sposoby przeciwdziałania

Streszczenie. Artykuł dotyczy występowania napięć i prądów wałowych w maszynach elektrycznych wirujących. Przedstawiono w nim zestawienie potencjalnych przyczyn tych pasożytniczych zjawisk zarówno pod kątem konstrukcji maszyny, jak i charakteru zasilania. W artykule przedstawiono również przegląd znanych i wykorzystywanych metod eliminacji prądów wałowych oraz eliminacji skutków ich przepływu.

Abstract. This article deals with the occurrence of shaft voltages and currents in rotating electrical machines. It presents a list of potential causes of these parasitic phenomena, both in terms of machine design and nature of power supply. The article also presents an overview of known and used methods of eliminating shaft currents and reducing their effects. (**Shaft currents in electric machines – causes and countermeasures**).

Słowa kluczowe: maszyna elektryczna, napięcia wałowe, prądy łożyskowe, napięcie niezrównoważenia.

Keywords: electric machine, shaft voltages, shaft currents, common-mode voltage.

Wstęp

Maszyny elektryczne stanowią jeden z największych odbiorców energii elektrycznej. Znajdują szerokie zastosowanie w wielu dziedzinach przemysłu jako elementy układów napędowych całego spektrum mocy. W zależności od typu maszyny oraz jej zastosowania różna jest awaryjność, a także charakter i częstotliwość występowania uszkodzeń [1]. Dane o awaryjności maszyn nie są zbyt często i chętnie udostępniane przez producentów czy użytkowników, niemniej jednak w literaturze można znaleźć cytowane dane pochodzące np. od IEEE-IAS, a dotyczące maszyn indukcyjnych [2]. Wśród najczęstszych uszkodzeń maszyn elektrycznych wymienia się uszkodzenia łożysk (44%), izolacji (26%), wirnika (8%) i inne (22%). Z kolei na niwie krajowej częstotliwość zestawienia dla 290 silników indukcyjnych pracujących w kilku krajowych elektrowniach i elektrociepłowniach można znaleźć np. w [3]. Większość uszkodzeń (powyżej 80%) zlokalizowano tutaj w stojanach maszyn, należy jednak pamiętać, że o ile problem może uwidocznić się w stojanie, to pierwotna przyczyna może leżeć gdzie indziej (układ chłodzenia, łożyska, wirnik).

W maszynach elektrycznych, jak w każdym innym urządzeniu, występuje szereg negatywnych zjawisk o charakterze destrukcyjnym. Zadaniem konstruktorów maszyn elektrycznych oraz całych układów napędowych są działania mające na celu ograniczenie tych zjawisk i/lub minimalizowanie negatywnych ich skutków.

Jednym z takich zjawisk w maszynach elektrycznych są napięcia i prądy wałowe. Pierwsze publikacje naukowe na ten temat pojawiły się już w latach 20. XX wieku [4], czyli stosunkowo wcześnie, mając na uwadze fakt, że ogólna koncepcja i konstrukcja maszyn prądu przemiennego przypada na przełom wieków XIX i XX [5]. Destrukcyjny wpływ występowania prądów wałowych w maszynie elektrycznej ujawnia się przede wszystkim w łożyskach maszyny, ale również w innych podzespołach silnika i reszty układu napędowego. Łożyska toczne, mimo ich prostej budowy, są wrażliwe na uszkodzenia powierzchni bieżni oraz elementów tocznych. Nawet niewielkie ślady i niedoskonałości tych powierzchni (np. w postaci wżerów, prążków, wytarć, korozji itp.) mogą być przyczyną poważnej awarii i wyłączenia łożyska z dalszej eksploatacji [6,7]. Wżery są następstwem występowania wysokiej temperatury podczas punktowego iskrzenia pomiędzy bieżniami łożyska i elementami tocznymi [8]. Przyjmuje się, że gęstość prądu przepływającego przez łożysko większa niż $j_b \geq 0,7 \text{ A/mm}^2$ znacząco skraca żywotność łożyska i stanowi realne zagrożenie dla stanu technicznego całej maszyny [9]. Istnieją cztery różne rodzaje uszkodzeń spowodowanych prądami

łożyskowymi: szron, ślady isker, wżery oraz spawanie [10]. Napięcia wałowe i prądy łożyskowe występują w mniejszym lub większym stopniu prawie w każdej maszynie elektrycznej wirującej: zarówno w maszynach prądu przemiennego [11], jak i stałego [12].

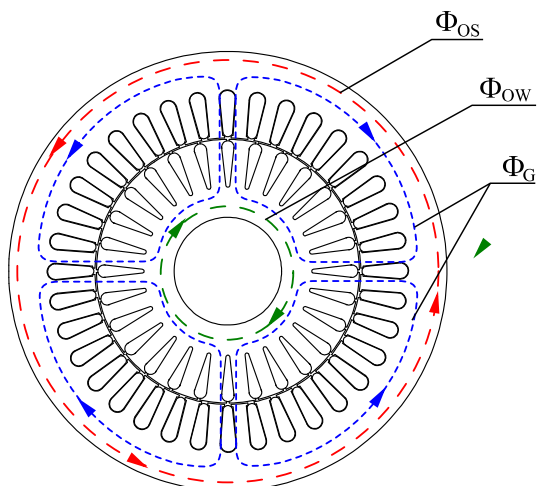
Napięcia wałowe i ich źródła w maszynach elektrycznych wirujących to złożone i skomplikowane zjawisko. Dostępne opracowania naukowo-techniczne dość szeroko opisują potencjalne przyczyny występowania napięć wałowych w maszynach elektrycznych kategoryzując ich charakter. Jedną z proponowanych kategoryzacji źródeł napięć wałowych jest ich częstotliwość. Można wyróżnić napięcia wałowe o niskiej, jak i wysokiej częstotliwości [12].

Przyczyny występowania prądów łożyskowych przy zasilaniu sieciowym

Do napięć wałowych o niskiej częstotliwości zalicza się przede wszystkim napięcia generowane przez asymetrię obwodu elektromagnetycznego maszyny. Wynikać może ona zarówno z tolerancji wykonania technologicznego maszyny, jak również uszkodzeń wynikłych podczas eksploatacji. Do najważniejszych przyczyn można zaliczyć [13]:

- asymetrię szczeliny powietrznej (dynamiczną lub statyczną),
- nierównomierną szczelinę powietrzną wzdłuż osi maszyny spowodowaną wygięciem wirnika (przyczyna pierwotna to np. nierównomierny naciąg magnetyczny wzdłuż wału),
- niedokładności w wykonaniu pakietu stojana i/lub wirnika,
- anizotropię blach pakietu stojana/wirnika,
- kanały wentylacyjne w pakiecie stojana i/lub wirnika [12],
- segmentowanie blach stojana [1],
- asymetrię spowodowaną zwarciami blach stojana lub wirnika.

Wyżej wymienione czynniki mogą być źródłem strumienia okrężnego w jarzmie stojana lub wirnika będącym efektem asymetrii strumienia głównego w obwodzie elektromagnetycznym [12,14,15,16]. Ten zmienny w czasie strumień magnetyczny (przedstawiony na rysunku 1) obejmujący wał maszyny indukuje w nim różnicę potencjałów, pod wpływem której w zamkniętym obwodzie: wał – łożysko od strony napędowej – tarcza łożyskowa od strony napędowej – kadłub maszyny – tarcza od strony przeciwnapędowej – łożysko od strony przeciwnapędowej – płynię prąd.



Rys. 1. Obwód elektromagnetyczny maszyny indukcyjnej, Φ_G – strumień główny, Φ_{OS} – strumień okrężny w jarmie stojana, Φ_{OW} – strumień okrężny w jarmie wirnika

Warunkiem zamknięcia obwodu elektrycznego jest przebicie bariery filmu olejowego znajdującego się w łożyskach. Film ten ma grubość zawierającą się w przedziale od kilku do kilkunastu mikrometrów. Grubość filmu olejowego w dużej mierze jest uzależniona od temperatury pracy łożysk. Wraz ze wzrostem ich temperatury maleje grubość filmu olejowego powodująca zwiększenie ryzyka szybszego uszkodzenia łożysk. Warto dodać, że w większości maszyn elektrycznych napięcia wałowe nie przekraczają wartości kilku woltów. Pomiędzy wałem i łożyskiem powstają naprężenia filmu olejowego. W przypadku przebicia tej warstwy występują wyładowania elektryczne skutkujące pojawieniem się wżerów na bieżniach łożysk tocznych. Z uwagi na niewielkie wartości impedancji obwodu składającego się z wału, kadłuba i łożyska może popłynąć znaczny prąd uszkodzający elementy stykające się z wałem.

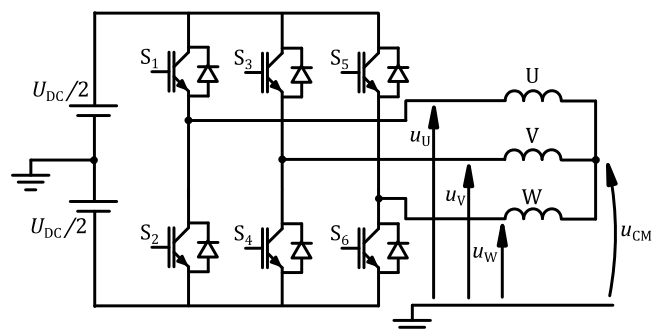
Przyczyną napięć i prądów wałowych o niskiej częstotliwości może być również homopolarny strumień magnetyczny będący skutkiem magnetyzmu resztkowego wału, miejscowych nasyczeń lub asymetrii uzwojenia wirnika. Strumień ten może zamykać się poprzez wał, tarcze łożyskowe oraz kadłub. Wyindukowane przez ten strumień napięcie wzdłuż łożyska jest źródłem miejscowych prądów łożyskowych, które zamykają się w niewielkiej przestrzeni w okolicach łożysk [4].

Innym źródłem pojawiania się napięcia wałowego są napięcia pochodzące od gromadzonego ładunku elektrostatycznego na wale. Przyczyna generowania się tych napięć nie leży w samej konstrukcji obwodu elektromagnetycznego maszyny, a zależy od układu napędowego w jakim ona pracuje. Na skutek tarcia pasów transmisyjnych, rolek i lin lub wskutek tarcia łopatek turbiny o suchą parę wodną powstają napięcia osiągające wartości kilkuset woltów [12]. Napięcie pochodzące od ładunku elektrostatycznego może spowodować przebicie izolacji i doprowadzić do uszkodzenia powierzchni bieżni łożysk wskutek przepływu krótkotrwałego prądu o charakterze impulsowym. W celu minimalizacji zagrożeń pochodzących od zjawisk elektrostatycznych uziemia się wał poprzez zastosowanie szczotek uziemiających. Powyższe rozwiązanie jest często stosowane w przypadku maszyn elektrycznych o dużych mocach znamionowych.

Przyczyny występowania prądów łożyskowych przy zasilaniu falownikowym

Rozwój energoelektroniki umożliwił współpracę maszyn elektrycznych z przemiennikami częstotliwości tworząc

układy napędowe umożliwiające pracę maszyny w szerokim zakresie zmian prędkości obrotowej. Większość przemienników częstotliwości współpracujących z maszynami asynchronicznymi oraz synchronicznymi z magnesami trwałymi pracuje przy wykorzystaniu metody modulacji wektora przestrzennego (*ang.* SVM: Space Vector Modulation), umożliwiając niezależną regulację prędkości i momentu elektromagnetycznego. W odróżnieniu od maszyn zasilanych z sieci, półprzewodnikowe układy napędowe charakteryzują się niezerowym napięciem w punkcie neutralnym uzwojenia maszyny odniesionym do potencjału ziemi (przewodu ochronnego). Napięcie to, zwane napięciem niezrównoważenia jest uśrednioną sumą napięć chwilowych (asymetrycznych, prostokątnych przebiegów napięcia) na wyjściu przemiennika wynikających z wykorzystania modulacji szerokości impulsów. Napięcie niezrównoważenia zostało przedstawione na przykładzie układu energoelektronicznego na rysunku 2.



Rys. 2. Schemat ideowy dwupoziomowego trójfazowego przemiennika częstotliwości z wyszczególnionym napięciem niezrównoważenia u_{CM}

Napięcie niezrównoważenia u_{CM} można wyrazić równaniem (1):

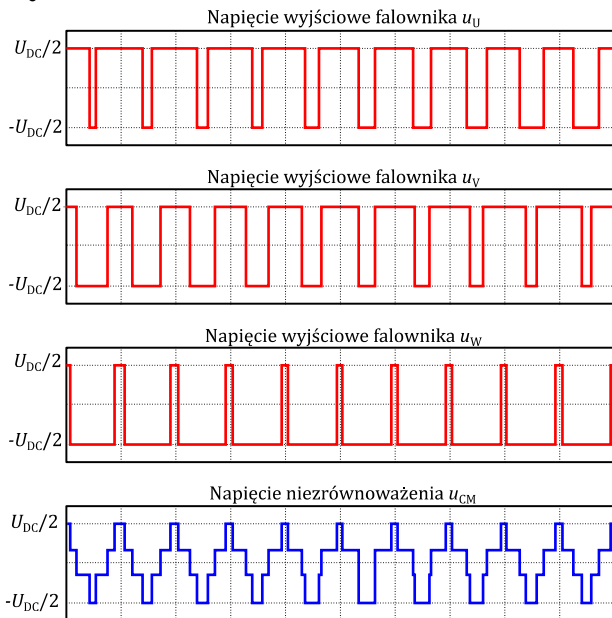
$$(1) \quad u_{CM} = \frac{u_U + u_V + u_W}{3}$$

Podstawowy algorytm sterowania dwupoziomowym przekształtnikiem energoelektronicznym polega na odpowiednim wyzwalaniu sześciu zaworów energoelektronicznych (S1-S6), co prowadzi do ukształtowania wektora przestrzennego napięcia wyjściowego. Spośród wszystkich użytecznych kombinacji załączonych zaworów można wyróżnić 6 wektorów aktywnych (100, 110, 010, 011, 001 i 101) oraz dwa wektory zerowe (111 i 000). Przykładowe napięcia na wyjściu przekształtnika u_U , u_V i u_W a także przebieg wypadkowego napięcia u_{CM} przedstawiono na rysunku 3. Napięcie niezrównoważenia ma charakter przemienny o częstotliwości uzależnionej od częstotliwości przełączeń tranzystorów, a jego amplituda jest równa połowie wartości napięcia zasilania U_{DC} dla wektorów zerowych. Zastosowanie zaworów o krótkich czasach przełączeń (np. tranzystorów IGBT) skutkuje dużymi stromościami zmian napięć wyjściowych falownika oraz napięcia niezrównoważenia.

Występowanie niezerowego napięcia w punkcie neutralnym uzwojenia maszyny elektrycznej odgrywa znaczącą rolę w mechanizmie generowania prądów łożyskowych. Uzwojenie stojana maszyny jest odizolowane od pakietu blach stojana i kadłuba oraz od wirnika wraz z wałem maszyny. W konsekwencji pomiędzy tymi elementami występują pojemności wewnętrzne maszyny. Mają one znaczenie, gdy powstałe w punkcie neutralnym napięcie u_{CM} charakteryzuje się dużą stromością narastania

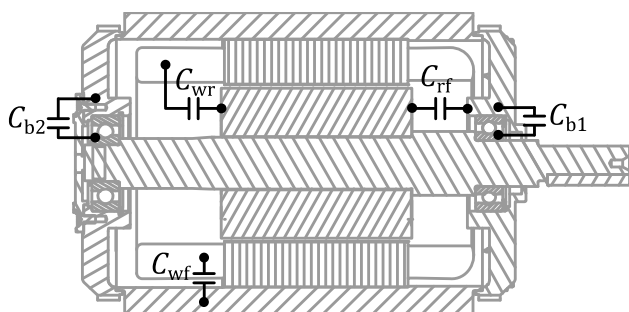
napięcia, rzędu np. 1500V/ μ s. W uproszczonym modelu maszyny elektrycznej można wyróżnić pojemności:

- C_{wf} – pojemność pomiędzy uzwojeniem stojana a obudową,
- C_{wr} – pojemność pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem,
- C_{rf} – pojemność pomiędzy wirnikiem a obudową,
- C_{b1} , C_{b2} – pojemności filmu olejowego łożysk od strony napędowej i przeciwnapędowej.

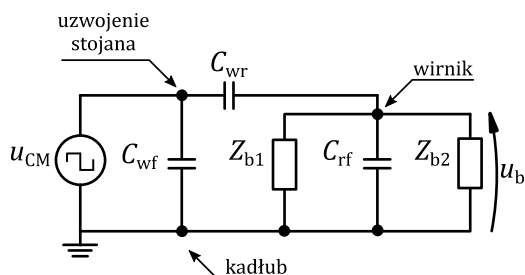


Rys. 3. Przykładowe przebiegi napięć wyjściowych dwupoziomowego przemiennika częstotliwości oraz napięcia niezrównoważenia

Przestrzenne umiejscowienie wyżej wymienionych pojemności zilustrowano poglądowo w przekroju poprzecznym maszyny elektrycznej na rysunku 4. Topologię i połączenie tych pojemności w postaci schematu zastępczego o parametrach skupionych przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 4. Pojemności wewnętrzne występujące w konstrukcji maszyny elektrycznej



Rys. 5. Schemat zastępczy obwodu dla przepływu prądu łożyskowego; u_{CM} – napięcie niezrównoważenia, u_b – napięcie łożyskowe, opis pozostałych parametrów w tekście

Element C_{wf} uwzględnia pojemność pomiędzy uzwojeniem (zarówno ułożonym w izolowanym żłobku, jak i połączeń czołowych) a uziemionym kadłubem (pakiet blach stojana i kadłub mają ten sam potencjał). Jej wartość uzależniona jest od wymiarów geometrycznych maszyny i ukształtowania uzwojeń, a także od parametrów dielektrycznych zastosowanej izolacji żłobkowej stojana. Parametr C_{wr} odzwierciedla sprzężenie pojemnościowe pomiędzy uzwojeniem stojana a wirnikiem. Z kolei C_{rf} to pojemność pomiędzy wirnikiem (wraz z wałem) a uziemionym kadłubem i zębami pakietu stojana (pojemność szczeliny powietrznej). Dwa ostatnie parametry schematu zastępczego to impedancje zastępcze łożysk Z_{b1} oraz Z_{b2} . Wartość oraz charakter tych impedancji są wielkościami dynamicznymi. W ogólnej analizie obwodu przyjmuje się, że na impedancje łożyska składają się równolegle połączone ze sobą: zmienna rezystancja R_b oraz zmienna pojemność C_b . Wartości tych parametrów zależą od konstrukcji łożyska, temperatury, a także od stanu pracy maszyny. Podczas normalnej pracy maszyny, pomiędzy elementami tocznymi i bieżniami łożyska występuje film olejowy tworzący dielektryczną izolację. W przypadku braku lub złej jakości środka smarowego, oraz przy pojawieniu się napięcia u_b większego od napięcia przebicia następuje zwarcie impedancji Z_b . W przypadku zatrzymanego wirnika bieżnie łożyska są zwarte ze sobą poprzez elementy toczne (filtr olejowy nie występuje), co powoduje znaczący spadek rezystancji R_b . Taki stan jest szczególnie niebezpieczny dla łożyska w momencie rozruchu silnika. W chwili zwarcia impedancji Z_b , pod wpływem napięcia łożyskowego u_b płynie prąd łożyskowy i_b . Wartości parametrów schematu zastępczego można wyznaczyć pomiarowo, analitycznie [17,18] lub przy wykorzystaniu metody elementów skończonych [19,20].

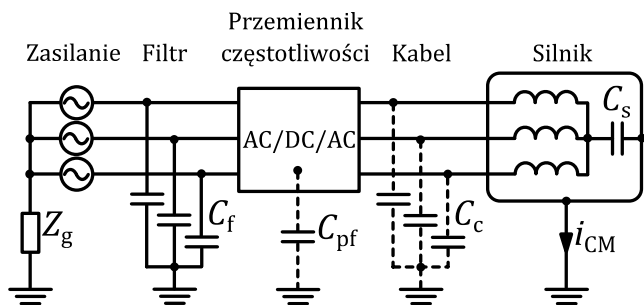
Na podstawie opisanej topologii pojemności wewnętrznych można skonstruować schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 5. Wynika z niego, że źródłem napięcia występującego pomiędzy bieżniami łożyska u_b jest napięcie niezrównoważenia u_{CM} . Stosunek tych napięć (*ang.* BVR - Bearing Voltage Ratio) określa równanie (2):

$$(2) \quad BVR = \frac{u_b}{u_{CM}} = \frac{C_{wr}}{C_{b1} + C_{b2} + C_{rf} + C_{wr}}$$

Duża stromość napięcia niezrównoważenia może powodować przepływ prądu doziemnego i_{CM} spowodowanego przepływem prądów zaburzeń wspólnych [21]. Główną przyczynę przepływu tych prądów należy upatrywać w pojemnościach pasożytniczych występujących w układzie napędowym. Największe znaczenie mają pojemności wewnętrzne maszyny oraz pojemności doziemne kabli zasilających. Na rysunku 6 przedstawiono, w sposób poglądowy, schemat zasilania maszyny z falownika wraz z pojemnościami doziemnymi. Z uwagi na niezerową rezystancję i indukcyjność przewodów prąd doziemny i_{CM} zwykle ma charakter oscylacyjny tłumiony o częstotliwości zawartej w przedziale od kilku kiloherców do kilku megaherców. Amplitudy tych prądów mogą osiągać wartości kilku amperów, z kolei prądy łożyskowe w takim układzie są na poziomie kilku miliamperów i w konsekwencji nie wywołują negatywnych skutków na pracę łożysk. Warto dodać, że występowanie prądów zaburzeń wspólnych utrudnia możliwość zastosowania zabezpieczeń różnicowo-prądowych maszyn elektrycznych.

Warto w tym miejscu podkreślić, że przy zasilaniu uzwojeń stojana symetrycznym, trójfazowym układem napięć, suma ich wartości chwilowych wynosi zero. Dodatkowo, impedancje wewnętrzne przy niskich

częstotliwościach $f = 50$ Hz mają duże wartości i nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla pracy łożysk.



Rys. 6. Schemat zasilania maszyny z falownika wraz z pojemnościami wewnętrznymi; Z_g – impedancja uziemienia zasilania, C_f – pojemność filtra sieciowego, C_{pf} – pojemność doziemna przeмиennika częstotliwości, C_c – pojemność doziemna kabla, C_s – pojemność doziemna silnika.

Sposoby przeciwdziałania prądom łożyskowym

Realność zagrożenia oraz konsekwencje przepływu prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych oraz wieloletnie analizy problemu przyczyniły się do opracowania wielu sposobów przeciwdziałania temu destrukcyjnemu zjawisku. Metody te stopniowo ewoluowały. Idea i zasada funkcjonowania danej metody zależna jest od charakteru i źródła prądu łożyskowego.

Uogólniając, podstawą każdej z opracowanych i stosowanych metod eliminacji lub ograniczania prądów łożyskowych w maszynach elektrycznych jest co najmniej jeden z następujących sposobów działania:

- ograniczenie źródła napięcia/prądu łożyskowego,
- zwiększenie impedancji drogi, przez którą prąd łożyskowy może się zamykać,
- umożliwienie przepływu prądu w sposób kontrolowany i bezpieczny.

Jak przedstawiono wcześniej, jakakolwiek asymetria obwodu może przyczynić się do występowania okrężnego strumienia magnetycznego w maszynie, który jest jednym ze źródeł prądów wałowych. Zacząć należy zatem od przemyślanej i zoptymalizowanej budowy obwodu elektromagnetycznego. Przykładem jest praca [22] podejmująca analizę wpływu współczynnika rozpiętości magnesu na biegunie (*ang.* pole-arc coefficient) na poziom napięcia wałowego w maszynie synchronicznej z magnesami trwałymi.

Przy współpracy maszyny elektrycznej z przekształtnikiem energoelektronicznym, kluczowe znaczenie w ograniczaniu prądów łożyskowych odgrywają działania modyfikujące napięcie nierównoważenia u_{CM} . Stosowane środki zaradcze mają na celu ograniczenie amplitudy oraz stromości narastania tego napięcia. Wśród najczęściej stosowanych metod należy wyróżnić m.in. instalowanie filtrów zarówno pasywnych [23,24], jak i aktywnych [25] w obwodzie pomiędzy przekształtnikiem i maszyną elektryczną. Bardzo ważną rolę w ograniczaniu napięcia nierównoważenia i prądów łożyskowych odgrywa stosowanie ekranowanych kabli zasilających pomiędzy przekształtnikiem i silnikiem [26].

Ograniczanie napięcia nierównoważenia u_{CM} może być również realizowane poprzez zastosowanie zmodyfikowanych algorytmów sterowania przekształtnikiem. Jak przedstawiono na rysunku 3, w dwupoziomym przekształtniku najwyższe napięcie u_{CM} występuje dla wektorów zerowych. Usunięcie ich ze strategii sterowania znacząco wpływa na ograniczenie napięcia u_{CM} . Niestety, brak wektorów zerowych musi zostać zastąpiony innymi wektorami aktywnymi, co wpływa na wzrost zawartości wyż-

szych harmonicznym w prądzie przekształtnika komplikując wewnętrzny pomiar prądu w przekształtniku. Zastosowanie wielopoziomowego przekształtnika znacznie ogranicza napięcie u_{CM} . Trójpoziomowy przekształtnik charakteryzuje się 24 wektorami aktywnymi oraz 3 wektorami zerowymi, z czego 1 nie generuje na wyjściu napięcia u_{CM} [27].

Do drugiej grupy rozwiązań, bazujących na zwiększeniu impedancji drogi przepływu prądu łożyskowego, zaliczyć należy przede wszystkim różne rodzaje izolacji i ekrany. Przykładem są szeroko stosowane łożyska ceramiczne (w których zarówno bieżnie jak i elementy toczne są ceramiczne) lub hybrydowe (tylko elementy toczne są wykonane z materiału ceramicznego). W łożyskach takich uzyskujemy dużą barierę dielektryczną na drodze wał – łożyska – tarcze łożyskowe – kadłub [28]. Co ważne, izolacja łożyska chroni przed skutkami prądów łożyskowych jedynie maszynę, w której to rozwiązanie zastosowano, zaś inne elementy układu napędowego nie są objęte zabezpieczeniem.

Modyfikację prądu łożyskowego można uzyskać poprzez zastosowanie smaru elektroprzewodzącego w łożyskach. Smar taki zapobiega iskrzeniu. Autorzy publikacji [29] wykazali, że przy użyciu smarów przewodzących płynące prądy zawierają dominującą składową czynną - składowa pojemnościowa prądu jest w znacznym stopniu zredukowana.

Kolejnym rozwiązaniem mającym na celu ograniczanie prądów łożyskowych przy zasilaniu z przeмиenników częstotliwości jest zastosowanie ekranów elektrostatycznych. W światowej literaturze przedstawiono rozwiązania bazujące na analizie wpływu rozlokowania ekranów w miejscu otwarcia żłobka [30], na powierzchni zębów [31], a także wokół połączeń czołowych uzwojenia stojana [20,31]. Zastosowanie ekranów w pobliżu zębów stojana oraz połączeń czołowych niesie niestety za sobą ryzyko występowania w nich prądów wirowych [31].

W analizie napięć wałowych szczególnym przypadkiem jest maszyna elektryczna dwustronnie zasilana (np. DFIG – prądnica indukcyjna zasilana od strony wirnika, rozpowszechniona w elektrowniach wiatrowych). Wynika to z faktu, że uzwojenie wirnika takiej maszyny jest bezpośrednio zasilane poprzez pierścienie ślizgowe z przekształtnika energoelektronicznego. Autorzy publikacji [25] przeanalizowali różne metody minimalizacji napięcia nierównoważenia w takiej maszynie, w tym eliminację wektora zerowego w konwencjonalnym falowniku dwupoziomowym, użycie przekształtnika wielopoziomowego, użycie filtrów i zmniejszenie napięcia stałego w obwodzie pośredniczącym. Proponuje się też zmianę strategii sterowania przekształtnika, co w pewnych warunkach pozwala na niemal kompletną eliminację napięcia nierównoważenia [32].

Zaproponowana przez autorów publikacji [24] metoda redukcji szybkości narastania napięcia wyjściowego falownika i tym samym korzystna modyfikacja (zmniejszenie) napięcia nierównoważenia polega na takiej zmianie konfiguracji i sterowania falownika, by napięcie wyjściowe było pięciopoziomowe zamiast trójpoziomowego.

Trzecią opisywaną grupą sposobów radzenia sobie ze zjawiskiem prądów wałowych, przy zasilaniu maszyny z falownika, są rozwiązania mające na celu wyrównanie potencjałów wirnika i kadłuba. Realizowane jest to m.in. poprzez zamontowanie specjalnych pierścieni zwierających, szczerok lub pasów miedzianych. Takie rozwiązanie wymusza przepływ prądów omijających niewalgciczne elementy, do których zaliczają się przede wszystkim łożyska. Powyższe środki zaradcze mogą mieć zastosowanie w nielicznych układach napędowych. Maszyny elektryczne organów urabiających kombajnów ścianowych w kopalniach węgla kamiennego często pracują

w obszarach narażonych wybuchem gazu. W takich przypadkach wykorzystanie dodatkowych szczotek, pierścieni czy pasów miedzianych zakładanych w obrębie wału maszyny jest ze względów bezpieczeństwa obsługi niestosowane.

Warto odnotować, że w przypadku maszyn indukcyjnych zasilanych z sieci trójfazowej autorzy pracy [33] dzięki wprowadzeniu zmian konstrukcyjnych w wirniku polegających na zmianie liczby prętów wirnika przy jednoczesnym wprowadzeniu skosu równego jednej podziałce żłobkowej wirnika uzyskali znaczne zmniejszenie wartości napięć wałowych indukowanych wzdłuż wału. Niemniej z uwagi na jednoczesną zmianę obu tych parametrów nie dowiedziono, która ze wspomnianych zmian konstrukcyjnych wywiera istotny wpływ na wartości napięć wałowych. Problem ten wymaga dalszych badań, nie tylko w odniesieniu do maszyn indukcyjnych, ale również w odniesieniu do maszyn synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi.

Wykorzystanie napięć wałowych do celów diagnostycznych

Obecność napięcia wałowego może być jednym z symptomów defektu lub niedoskonałości maszyny elektrycznej. Obserwacja tego napięcia może przyczynić się do szybkiego określenia postępującego pogorszenia się stanu technicznego maszyny. Co ważne, kontrola ta może być prowadzona w trybie ciągłym podczas pracy maszyny. Interesujące wnioski przedstawiono w artykułach [28, 34], gdzie zdaniem autorów pomiar napięcia wałowego oraz wyznaczenie jego widma częstotliwościowego może służyć ocenie stanu ekscentryczności maszyny indukcyjnej. Kolejnymi przykładami wykorzystania napięcia wałowego jako sygnału diagnostycznego jest opisana metoda detekcji uszkodzeń klatki wirnika maszyny asynchronicznej [35], a także zastosowanie sygnału napięcia wałowego do diagnostyki uszkodzeń rdzenia stojana [13].

Podsumowanie

Przedstawione w skróty i przeglądowy sposób informacje dotyczące występowania prądów i napięć wałowych w maszynach elektrycznych wirujących nakreślają ogólny obraz tego zjawiska. Zrozumienie tych zjawisk oraz znajomość układu napędowego, w którym maszyna będzie docelowo pracować pozwalają na odpowiednie przeciwdziałanie ewentualnym skutkom już na etapie projektowania układu napędowego, jak również w trakcie eksploatacji. Istnieje wiele metod ograniczania negatywnych skutków wywołanych przepływem prądów łożyskowych. Wybór metody w dużej mierze jest uzależniony od sposobu zasilania uzwojeń (zasilanie z falownika, zasilanie z sieci), rodzaju maszyny elektrycznej i jej mocy znamionowej. Na uwagę zasługuje możliwość wykorzystania napięcia wałowego w charakterze sygnału diagnostycznego zwiastującego symptomy uszkodzeń łożysk, zwiększonych drgań, a także niesymetrii pola magnetycznego w maszynie wywołanej różnymi przyczynami. Powyższe zagadnienia będą przedmiotem dalszych badań symulacyjnych i laboratoryjnych prowadzonych przez autorów.

Praca zrealizowana w ramach programu „doktorat wdrożeniowy” przy współpracy Politechniki Śląskiej i Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytutu Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL.

Autorzy: dr hab. inż. Barbara Kulesz prof. PŚ, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail: Barbara.Kulesz@polsl.pl; dr inż. Sebastian Berhausen, Politechnika Śląska, Katedra Elektrotechniki i Informatyki, ul. Akademicka 10, 44-100 Gliwice, E-mail:

Sebastian.Berhausen@polsl.pl; mgr inż. Tomasz Jarek, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, al. Rozdzieńskiego 188, 40-203 Katowice, E-mail: Tomasz.Jarek@komel.lukasiewicz.gov.pl;

LITERATURA

- [1] Glinka T., Szymaniec S., Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów, Wydawnictwo Naukowe PWN SA, Warszawa 2019, ISBN 978-83-01-20735-9.
- [2] Mustafa M.O., Nikolakopoulos G., Gustafsson T., Faults Classification Scheme for Three Phase Induction Motor, *International Journal of System Dynamics Applications* 3(1):1-20, Jan. 2014, DOI: 10.4018/ijdsda.2014010101.
- [3] Drak B., Zientek P., Analiza uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych, *Napędy i Sterowanie*, nr 2/2014, s. 74-78.
- [4] Alger P.L., Samson H.W., Shaft currents in electric machines, in *J. Am. Inst. Electr. Eng.*, Vol. 42, No. 12, pp. 1325–1334, Dec. 1923, doi: 10.1109/JoAIEE.1923.6593419.
- [5] Glinka T., Historia rozwoju maszyn elektrycznych, *Maszyny Elektryczne: Zeszyty Problemowe*, Nr 4/2016 (112), s. 109–120.
- [6] Upadhyay R.K., Kumaraswamidhas L. A., Azam Md. S., Rolling element bearing failure analysis: A case study, *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, Vol. 1, No.1, pp. 15–17, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.csefa.2012.11.003.
- [7] Bonnett A.H., Cause and analysis of bearing failures in electrical motors, *Record of Conference Papers Industry Applications Society 39th Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, San Antonio, TX, USA, 1992, pp. 87–95, doi: 10.1109/PCICON.1992.229322.
- [8] Stone G., Lloyd B., Sasic M., Monitoring of shaft voltages and grounding currents in rotating machines, *Conf. Proc. from 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Hangzhou, China, Oct. 2014, pp. 3361–3364, doi: 10.1109/ICEMS.2014.7014072.
- [9] Muetze A., Binder A., Vogel H., Hering J., What can bearings bear?, *IEEE Ind. Appl. Mag.*, Vol. 12, No. 6, pp. 57–64, Nov. 2006, doi: 10.1109/IA-M.2006.248014.
- [10] Costello M. J., Shaft voltages and rotating machinery, *IEEE Trans. on Ind. Applicat.*, Vol. 29, No. 2, pp. 419–426, Apr. 1993, doi: 10.1109/28.216553.
- [11] Zientek P., Prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy, *Przegląd Elektrotechniczny*, 9 (2013), 62-65.
- [12] Plazenet T., Boileau T., Caironi C., Nahid-Mobarakeh B., An overview of shaft voltages and bearing currents in rotating machines, *2016 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Portland, OR, USA, Oct. 2016, pp. 1–8, doi: 10.1109/IAS.2016.7731884.
- [13] Gołębiowski L., Gołębiowski M., Mazur D., Voltages in the Shaft of the Induction Motor in 3D FEM Formulation, *IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Cracow, Poland, Sept. 2007, pp. 142–145, doi: 10.1109/DEMPED.2007.4393085.
- [14] Hadden A. et al., A Review of Shaft Voltages and Bearing Currents in EV and HEV Motors, *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Florence, Italy, Oct. 2016, pp. 1578–1583, doi: 10.1109/IECON.2016.7793357.
- [15] Prashad H.[ed], Shaft voltages and their origin in rotating machines and flow of electric current through bearings, Chapter 2 of *Tribology in Electrical Environments*, Tribology and Interface Engineering Series, Vol. 49, Elsevier, 2006, pp. 15–23.
- [16] Motor Shaft Voltages and Bearing Currents under PWM Inverter Operation, Gambica/Beama Technical Guide, 2016.
- [17] Kim K.-T., Hur J., Reduction of shaft voltage by the flux-path design in IPM-type BLDC motor, *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Busan, Oct. 2013, pp. 803–806, doi: 10.1109/ICEMS.2013.6713158.
- [18] Schuster M., Springer J., Binder A., Comparison of a 1.1 kW-induction machine and a 1.5 kW-PMSM regarding common-mode bearing currents, *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM)*, Amalfi, June 2018, pp. 1–6, doi: 10.1109/SPEEDAM.2018.8445298.

- [19] Bubert A., Zhang J., De Doncker R. W., Modeling and measurement of capacitive and inductive bearing current in electrical machines, *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, Juiz de Fora, Nov. 2017, pp. 1–6, doi: 10.1109/COBEP.2017.8257251.
- [20] Magdun O., Gemeinder Y., Binder A., Prevention of harmful EDM currents in inverter-fed AC machines by use of electrostatic shields in the stator winding overhang, *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Glendale, AZ, USA, Nov. 2010, pp. 962–967, doi: 10.1109/IECON.2010.5675498.
- [21] Miloudi H., Bendaoud A., Miloudi M., Gourbi A., Slimani H., Common mode conducted electromagnetic interference in inverter fed-AC Motor, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), pp. 272-275.
- [22] Peng B., Zhao W., Wang X., The Method for Reducing Intrinsic Shaft Voltage by Suitable Selection of Pole-Arc Coefficient in Fractional-Slot Permanent-Magnet Synchronous Machines, *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 54, Iss. 11, pp. 1–5, Nov. 2018, doi: 10.1109/TMAG.2018.2834536.
- [23] Kalaiselvi J., Srinivas S., Design and development of a single CM filter for bearing current and ground current reduction in a dual two level inverter fed open end winding induction motor drive, *2016 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Trivandrum, India, Dec. 2016, pp. 1–6, doi: 10.1109/PEDES.2016.7914389.
- [24] Sunitha P. M., Banakara B., Reddy S., Modeling, simulation and analysis of common mode voltage, bearing voltage and bearing current in PWM multilevel inverter fed induction motor with long cable, *2017 2nd IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information & Communication Technology (RTEICT)*, Bangalore, May 2017, pp. 1161–1167, doi: 10.1109/RTEICT.2017.8256781.
- [25] Kellan G. Euerle, A Compact Active Filter to Eliminate Common-Mode Voltage in SVPWM Electric Motor Drives. Thesis, 2016, Retrieved from the University of Minnesota Digital Conservancy, <http://hdl.handle.net/11299/190604>.
- [26] Luszczyński J., Motor Cable Effect on the Converter-Fed AC Motor Common Mode Current, *Przegląd Elektrotechniczny*, 88 (2012), pp. 177–181.
- [27] Zare F., Adabi J., Ghosh A., Different Approaches to Reduce Shaft Voltages in AC Generators, *13th European Conference on Power Electronics and Applications*, Barcelona, Spain, Sept. 2010.
- [28] Gonda A., Capan R., Bechev D., Sauer B., The Influence of Lubricant Conductivity on Bearing Currents in the Case of Rolling Bearing Greases, *Lubricants* 2019, No. 12: 108, doi: 10.3390/lubricants7120108.
- [29] Muetze A., Binder A., Practical Rules for Assessment of Inverter-Induced Bearing Currents in Inverter-Fed AC pp. 1614–1622, June 2007, doi: 10.1109/TIE.2007.894698.
- [30] Ferreira F. J. T. E., Cistelecan M. V., de Almeida A. T., Slot-embedded partial electrostatic shield for high-frequency bearing current mitigation in inverter-fed induction motors, *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, Italy, Sept. 2010, pp. 1–6, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5607985.
- [31] Gerber S., Wangi R.-J., *Reduction of Inverter-Induced Shaft Voltages Using Electrostatic Shielding*, *Southern African Universities Power Engineering Conference/Robotics and Mechatronics/Pattern Recognition Association of South Africa (SAUPEC/RobMech/PRASA)*, Bloemfontein, South Africa, sty. 2019, pp. 310–315, doi: 10.1109/RoboMech.2019.8704702.
- [32] Garcia A., Holmes D. G., Lipo T. A., Reduction of Bearing Currents in Doubly Fed Induction Generators, *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, Tampa, FL, Oct. 2006, Vol. 1, pp. 84–89, doi: 10.1109/IAS.2006.256488.
- [33] Boboń A., Drak B., Niestrój R., Zientek P., *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy*. Monografia. BOBRME Komel, Katowice 2011.
- [34] Rogozin G.G., Osipov D. Y., Induction motor eccentricity diagnosis using impedance spectrum and shaft voltage, *The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010*, Rome, Italy, Sept. 2010, pp. 1–3, doi: 10.1109/ICELMACH.2010.5608239.
- [35] Miletic A., Cettolo M., Experimental research on rotor fault diagnosis using external coil voltage analysis and shaft voltage signal analysis, *5th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives*, Vienna, Austria, wrz. 2005, pp. 1–4, doi: 10.1109/DEMPED.2005.4662497.