

Mapy rozwoju dyscypliny Elektrotechnika
Maszyny elektryczne i transformatory
aktualizacja listopad 2018

2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory	7	2.4.1.
<u>Maszyny elektryczne</u>	7	
<u>2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze</u>	8	
<u>2.4.1.2. Osiągnięcia badawcze w dziedzinie maszyn elektrycznych</u>	11	
<i>-WIELOFAZOWE MASZYNY SYNCHRONICZNE O UZWOJENIACH UŁAMKOWO-ŻŁOBKOWYCH</i>		
<i>-MASZYNY O WZBUDZENIU HYBRYDOWYM I BARIERAMI MAGNETYCZNYMI</i>		
<i>-MASZYNY SYNCHRONICZNE DUŻYCH MOCY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI (LSPMSM)</i>		
<i>-MATERIAŁY INTELIGENTNE W PRZETWORNIKACH I AKTUATORACH</i>		
<u>2.4.2. Transformatory energetyczne</u>	11	
<u>2.4.2.1 Aktualne zagadnienia badawcze</u>	16	
<u>2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów</u>	16	
<u>2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych</u>	17	
<u>2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów</u>	18	

2.4. Maszyny Elektryczne i Transformatory

prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka, Politechnika Śląska

<i>prof. dr hab. inż. Kazimierz Zakrzewski, Politechnika Łódzka</i>

prof. dr hab. inż. Lech Nowak, Politechnika Poznańska

Wprowadzenie.

Maszyny elektryczne (turbogeneratory i hydrogeneratory) i transformatory blokowe stanowią główne elementy systemu elektroenergetycznego w obszarze wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej. Transformatory rozdzielcze odgrywają rolę pośredniczącą w systemach przesyłowych i dystrybucyjnych. Silniki wykonawcze o różnych zasadach działania i właściwościach są powszechnie stosowane w napędach: maszyn roboczych, pojazdów trakcyjnych, urządzeń gospodarczych itp. Nic nie wskazuje na to, aby dotychczasowa rola maszyn elektrycznych i transformatorów mogła ulec zmniejszeniu.

2.4.1. Maszyny elektryczne. Wstęp.

Polska jest znaczącym producentem maszyn elektrycznych. Fabryki maszyn elektrycznych pomyślnie przeszły transformację gospodarczą w latach 90-ych XX wieku. Stało się tak, gdyż maszyny elektryczne produkowane w tych fabrykach spełniały standard światowy i mimo ograniczonej sprzedaży w Polsce i krajach Europy Wschodniej, to eksport maszyn elektrycznych do USA, Kanady i krajów Europy Zachodniej, zaowocował tym, że fabryki nie zbankrutowały. Maszyny elektryczne były projektowane w kraju i były produkowane według własnej technologii. Fabryki maszyn elektrycznych jako jedne z pierwszych zostały wszystkie sprywatyzowane.

Stan obecny jest następujący:

- generatory synchroniczne są produkowane i remontowane w fabryce EthosEnergy Poland SA. W Lublińcu (dawniej ENERGOSERWIS, a następnie TurboCare) i w firmie GE Power sp. z o.o. we Wrocławiu (dawniej DOLMEL),
- silniki indukcyjne w firmie Cantoni Motor S.A. do której należą fabryki: BESEL, INDUKTA, CELMA i EMIT oraz w fabryce TAMEL (BROOK CROMPTON ATB Technology in Motion. ATB Tamel S.A.).

W lipcu 2009 roku Komisja Europejska przyjęła Rozporządzenie Nr 640/2009 w sprawie wdrażania Dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady dotyczącej wymogów ekoprojektu dla silników elektrycznych. Oznacza to, że na terenie Unii Europejskiej wprowadzone zostały usankcjonowane prawnie wymogi dotyczące efektywności energetycznej 3-fazowych silników indukcyjnych 2, 4 i 6-biegunowych sprzedawanych na rynku unijnym. Klasyfikację i oznakowanie IE wprowadza norma IEC 60034-30. Nowy sposób klasyfikacji obowiązuje dla silników 2, 4 i 6-biegunowych o mocach od 0,75 do 375 kW i napięciu znamionowym do 1000 V. Od dnia 1 stycznia 2015 r. silniki indukcyjne (a od 01.01. 2017 r. wszystkie silniki) o mocy znamionowej w zakresie 7,5–375 kW muszą odpowiadać co najmniej klasie sprawności IE3 (najwyższy poziom sprawności - premium), lub odpowiadać klasie sprawności IE2 (silniki o podwyższonej sprawności - high efficiency), przy założeniu zastosowania ich w układzie napędowym o regulowanej prędkości obrotowej.

2.4.1.1. Aktualne zadania badawcze

Aktualne zagadnienia badawcze w zakresie generatorów synchronicznych powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w fabryce i zabezpieczenie niezawodnej eksploatacji oraz diagnostykę. Od lat 60-ych XX wieku prowadzono badania w koncernach światowych, a także w Polsce, nad wykorzystaniem nadprzewodnictwa w obwodzie wzbudzenia. Jak dotychczas nadprzewodnictwo nie jest szerzej wykorzystywane w konstrukcji generatorów synchronicznych, gdyż koszty z tym związane są za duże. Postęp w inżynierii magnesów trwałych stworzył warunki do budowy generatorów synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym. Obniży się w ten sposób straty mocy wzbudzenia, a więc uzyska się ten sam efekt, który oczekiwano uzyskać stosując nadprzewodnikowy układ wzbudzenia. Hybryda mogła by mieć około (80 – 90)% wzbudzenia magnesami trwałymi i około (20 – 10)% wzbudzenia elektromagnetycznego, które zapewniłoby wymagany zakres regulacji strumienia wzbudzenia.

Aktualne zagadnienia badawcze w silnikach i napędach elektrycznych powinny koncentrować się na energooszczędności [2], a więc na budowie maszyn o zmniejszonych stratach mocy, pracujących niezawodnie i niewymagających częstych przeglądów i remontu. Z wieloletniego doświadczenia przemysłowego wiemy, że znaczna część pracujących w Polsce napędów jest zaprojektowana nieekonomicznie, maszyny elektryczne nie są poprawnie dobrane do wymagań układu napędowego. Dotyczy to przede wszystkim silników indukcyjnych wysokiego napięcia zasilanych bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej. Na przykład pompy chłodzące w hutach są uruchamiane kilkadziesiąt razy na dobę, a zastosowane silniki wytrzymują 3000 – 5000 rozruchów, wentylatory na szybach wentylacyjnych w kopalniach mają czasy rozruchu dochodzące do kilkadziesiątu sekund, a silniki mają dopuszczalny czas rozruch 20 sekund. W większości napędów stosuje się silniki przewymiarowane, co zmniejsza sprawność energetyczną napędu. W świetle tych przykładów podwyższona sprawność energetyczna silników elektrycznych nie determinuje kosztów eksploatacyjnych napędu, gdyż oszczędność energii w kosztach całkowitych eksploatowanego napędu stanowi znikomy procent. Jednak trendy światowe są takie, aby produkować maszyny elektryczne o coraz wyższej sprawności. Na przykład w USA i Kanadzie, już od roku 1997, jest prawnie zakazana sprzedaż silników indukcyjnych niespełniających warunku sprawności podanych w standardzie NEMA. W sposób znaczący można zwiększyć sprawności maszyn elektrycznych poprzez stosowanie w ich konstrukcji magnesów trwałych. Ponadto magnesy trwałe pozwalają zmniejszyć masę maszyny w stosunku do obecnie powszechnie stosowanych maszyn indukcyjnych [1]:

- w maszynach małej mocy (o mocy znamionowej do 10kW) sprawność można podwyższyć o około 8% i masę zmniejszyć o około 30%,
- w maszynach średniej mocy (o mocy znamionowej do 100kW) sprawność można podwyższyć o około 4% i masę zmniejszyć o około 20%,

- w maszynach dużej mocy sprawność można podwyższyć o około 2% i masę zmniejszyć o około 10%,
- w prądnicach synchronicznych ze wzbudzeniem hybrydowym można zmniejszyć straty wzbudzenia o około 80%.

Do napędów pracujących przy stałej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki synchroniczne z rozruchem asynchronicznym (LSPMSM - Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor), które w wirniku mają uzwojenie klatkowe i przystosowane są do rozruchu bezpośredniego (przez bezpośrednie przyłączenie do napięcia zasilającego) oraz asynchroniczne silniki synchronizowane polem magnetycznym magnesów trwałych zasilane bezpośrednio z sieci elektroenergetycznej.

Do napędów pracujących przy zmiennej prędkości obrotowej, mogą być stosowane silniki [2]:

bezszerotkowe prądu stałego BLDCPM, (Brush-Less Direct Current Motor) i BLSMPM (Brush-Less Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane napięciem stałym poprzez komutator energoelektroniczny (silniki BLDCPM mają jedną strefę regulacji prędkości obrotowej, przy stałym momencie, a regulacja prędkości obrotowej jest realizowana poprzez zmianę napięcia stałego, silniki BLSMPM mają dwie strefy regulacji prędkości obrotowej: przy stałym momencie poprzez zmianę napięcia stałego i przy stałej mocy poprzez odwzbudzenie smm twornika), synchroniczne PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor), które są zasilane z falowników, a regulacja prędkości obrotowej odbywa się poprzez zmianę częstotliwości napięcia falownika, synchroniczne reluktancyjne (SynRM), które, z uwagi na niski koszt wytwarzania (brak uzwojenia klatkowego oraz magnesów w wirniku), obniżenie kosztów przetwornic częstotliwości oraz wysoką sprawność (wyższą od silników klatkowych) stanowią atrakcyjną alternatywę dla klasycznych napędów asynchronicznych zasilanych z falowników. Obecnie firma ABB oferuje cały typoszereg maszyn i dedykowanych przemienników częstotliwości od mocy 5 do 200kW spełniających wymagania klasy sprawności IE4 [5]. Prowadzone są również intensywne prace badawcze nad wykorzystaniem tego typu maszyn do napędu pojazdów elektrycznych. Poza niskim kosztem wytwarzania tych maszyn, stymulatorem prowadzonych badań jest możliwość uzyskania wysokiej sprawności w szerokim zakresie zmian prędkości i zmian momentu obrotowego, co jest podstawowym wymogiem dla aplikacji trakcyjnych [4]. W nurcie tematyki badawczej związanej z silnikami reluktancyjnymi wyróżnić można prace nad wykorzystaniem magnesów trwałych do polepszenia parametrów funkcjonalnych; projektowane i badane są maszyny reluktancyjne wspomagane magnesami trwałymi - PMaSynRM (Permanent Magnet assisted Synchronous Reluctance Motor) [4, 6]. Prowadzone są także prace mające na celu umożliwienie wykorzystania maszyn SynRM bez konieczności zasilania ich z przemienników częstotliwości, poprzez zastosowanie uzwojenia klatkowego do zapewnienia rozruchu poprzez bezpośrednie włączenie do sieci LSSynRM.

synchroniczne o przełączalnym strumieniu - wyróżnia się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi (permanent magnet assisted flux switching machines - PMFSM), maszyny o wzbudzeniu elektromagnetycznym (field excitation flux switching machines - FEFSM) oraz maszyny o wzbudzeniu hybrydowym (hybrid excitation flux switching machines- HEFSM) [7].

Z kolei prądnice synchroniczne ze wzbudzeniem magnesami trwałymi współpracujące z falownikiem energoelektronicznym wydają się być ekonomicznym źródłem energii elektrycznej w elektrowniach wiatrowych i małych elektrowniach wodnych, umożliwiają bowiem prace turbiny wiatrowej i wodnej ze zmienną prędkością obrotową dostosowaną do aktualnej mocy wiatru bądź wody. Zwiększa to, o kilka procent wykorzystanie energii wiatru i wody. Prądnice ze wzbudzeniem hybrydowym, nie wymagają falownika i mogą być stosowane w spalinowych agregatach prądotwórczych pracujących przy stałej prędkości obrotowej.

Ponadto aktualne zadania badawcze w tematyce przetworników elektromechanicznych powinny obejmować:

- maszyny o nowych strukturach obwodu elektromagnetycznego, o rdzeniach proszkowych, wzbudzeniu hybrydowym itp.,
- maszyny elektryczne dostosowane do napędu pojazdów zasilane ze źródeł solarnych,
- maszyny o ruchu złożonym i wielu stopniach swobody,
- przetworniki o ruchu liniowym,
- łożyska magnetyczne i układy lewitacji,
- przetworniki z cieczą magnetyczną,
- przetworniki magnetostrykcyjne,
- przetworniki piezoelektryczne,
- przetworniki wykorzystujące zjawiska sprzężone termiczno-elektromagnetyczne, – siłowniki elektromagnetyczne nowej generacji do awioniki i motoryzacji,
- materiały inteligentne w przetwornikach i aktuatorach.

W zakresie pomiarów i diagnostyki maszyn elektrycznych celowym byłoby opracowanie zbioru zunifikowanych parametrów kryterialnych i opracowanie skali oceny stanu technicznego maszyn elektrycznych (dla każdego rodzaju maszyn):

- opracowanie skutecznych metod monitoringu dużych turbogeneratorów (drgania, przegrzania lokalne, prądy łożyskowe itp.).
- określenie metody, opracowanie nowych czujników (np. wyładowań niezupełnych) i pozyskiwanie sygnałów diagnostycznych.
- uproszczenie metod diagnostycznych on-line poprzez zidentyfikowanie zależności między np. drganiami węzłów łożyskowych i spektrum harmonicznym w prądzie i napięciu twornika,
- ocena stanu technicznego uzwojeń (np. klatki wirnika silnika indukcyjnego) i ocena stanu symetrii szczeliny powietrznej na podstawie przebiegu czasowego prądu maszyny [3],
- ocena on-line stanu technicznego izolacji głównej i zwojowej np. na podstawie analizy przebiegu składowej zerowej prądu, to jest prądu płynącego przez układ izolacyjny [3].

Tworzenie centrów diagnostycznych i archiwizacji danych eksploatacyjnych dla maszyn strategicznych (np. generatorów synchronicznych i transformatorów w elektrowniach), w tym:

- zdalna kontrola maszyn elektrycznych powierzonych nadzorowi,
- powiadamianie służb odpowiedzialnych za eksploatację maszyn o symptomach wystąpienia awarii,
- gromadzenie, archiwizacja danych pomiarowych w celu przeprowadzania analiz poawaryjnych i w celach poznawczych.

Literatura

- [1] BERNATT J.: *Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi*, Wyd. BOBRME Komel. 2010r.
- [2] DE ALMEIDA A. T., FONSECA P.: *Characterisation of EU Motor Use Energy Efficiency Improvements on Electric Motors and Drives*, Springer 2000.
- [3] DRAK B., GLINKA T., KAPINOS J., MIKSIEWICZ R., ZIENTEK P.: *Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce*, Wyd. przez Instytut Napędów i Maszyn Elektr. KOMEL. 2013r.
- [4] HUYNH, T. A., HSIEH M.: "Comparative Study of PM-Assisted SynRM and IPMSM on Constant Power Speed Range for EV Applications," in IEEE Transactions on Magnetics, vol. 53, no. 11, pp. 1-6, Nov. 2017, Art no. 8211006. doi: 10.1109/TMAG.2017.2707125
- [5] *IE4 SynRM motor-drive packages, Super premium efficiency for industry*, ABB Brochure, 2018, <https://searchext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3AUA0000132610&LanguageCode=en>

&DocumentPartId=&Action=Launch, dostęp z dnia 8.11.2018r.

- [6] MOGHADDAM, R.R.: *Synchronous Reluctance Machine (SynRM) in Variable Speed Drives (VSD) Applications*, 2011, Stockholm, PhD Thesis KTH Royal Institute of Technology, 2011, p. xviii, 260, Series TRITA-EE, ISSN 1653-5146 ; 2011 r
- [7] SULAIMAN E., SOOMRO, H. A., Omar M.: Magnetic flux distribution analysis of various flux switching motors using segmental rotor, 2015 IEEE International Magnetics Conference (INTERMAG), Beijing, 2015, pp. 1-1. doi: 10.1109/INTMAG.2015.7157227

2.4.1.2. Osiągnięcia badawcze w dziedzinie maszyn elektrycznych

WIELOFAZOWE MASZyny SYNCHRONICZNE O UZWOJENIACH UŁAMKOWO-ŻŁÓBKOWYCH

Redakcja naukowa:

prof. dr hab. inż. Wojciech Szelaąg, Politechnika Poznańska

W ostatnich latach magnetoelektryczne maszyny synchroniczne z uzwojeniami ułamkowo-żłobkowymi o cewkach skupionych są w centrum zainteresowań wielu zespołów badawczych i projektowych na świecie. Maszyny tego typu wyróżnia niższy koszt uzwojenia, krótsze połączenia czołowe, mniejsza rezystancja uzwojeń oraz mniejsze wartości indukcyjności rozproszenia i indukcyjności wzajemnej niż w klasycznych silnikach magnetoelektrycznych o cewkach rozłożonych. W rezultacie możliwe jest uzyskanie lepszych parametrów funkcjonalnych, w tym większej sprawności niż w maszynach o klasycznym uzwojeniu rozłożonym. Zalety maszyn z uzwojeniami ułamkowo-żłobkowymi o cewkach skupionych są szczególnie widoczne w maszynach wolnobieżnych o małej smukłości i dużych momentach obrotowych, stosowanych w przemysłowych napędach bezpośrednich, robotach, windach, napędach statków czy na generatory turbin wiatrowych. Wadą tego typu maszyn są stosunkowo duże tętnienia momentu elektromagnetycznego. Ponadto obserwuje się w nich wzrost strat dodatkowych. Jest on spowodowany obecnością w rozkładzie przestrzennym przepływu wytwarzanego przez uzwojenie, oprócz harmonicznej podstawowej, zarówno wyższych harmonicznych jak i subharmonicznych. Wytworzone przez te harmoniczne pola wirują względem wirnika z prędkością różną od synchronicznej generując dodatkowe straty mocy w magnesach, w elementach litych przewodzących oraz w rdzeniu wirnika. W celu minimalizacji wpływu tych negatywnych czynników na właściwości maszyny proponuje się stosować liczbę faz większą od 3. Z badań literaturowych i doświadczeń wynika, że maszyny wielofazowe mają wiele zalet w porównaniu z maszynami trójfazowymi. Można do nich zaliczyć mniejsze pulsacje momentu, niższe straty dodatkowe w magnesach i elementach litych obwodu wirnika oraz większy współczynnik uzwojenia. Z drugiej strony, zasilanie i sterowanie maszynami o 5, 7 czy 10 fazach wymaga opracowania specjalnych przekształtników i nowych strategii sterowania tego typu napędami. W celu minimalizowania kosztów opracowania nowych układów przekształtnikowych, proponuje się stosować maszyny wielofazowe o liczbie faz m równej wielokrotności liczby 3. Do zasilania takich maszyn można użyć $k=m/3$ przekształtników wykorzystujących typowe trójfazowe inteligentne moduły mocy (IPM ang. *intelligent power modules*). Trzeba zapewnić zadane przesunięcie fazowe pomiędzy trójfazowymi układami (gwiazdami) napięć/prądów na wyjściu przekształtników. Przy takim rozwiązaniu nie jest wymagane galwaniczne połączenie składowych układów trójfazowych. Wykorzystanie wieloprzekształtnikowego źródła zasilania ma wiele zalet. Wzrasta niezawodność napędu, zmniejsza się jego wrażliwość na zwarcia w układach składowych i pojawia się możliwość elastycznego dostosowania parametrów źródła zasilania do mocy silnika. Na przykład, jeśli potrzebny jest napęd o tak dużej mocy, że do jego zasilania konieczne jest zbudowanie dedykowanego przekształtnika, to można zastosować o tej samej mocy silnik wielofazowy i zasilic go z układu k dostępnych modułowych przekształtników trójfazowych o mniejszej mocy. Takie rozwiązanie jest wielokrotnie tańsze niż opracowanie i zbudowanie nowego przekształtnika trójfazowego o odpowiednio dużej mocy. Oczywiście taki k modułowy układ przekształtnikowy można także wykorzystać do zasilania klasycznych silników trójfazowych o uzwojeniach fazowych złożonych z k gałęzi równoległych. Jednakże, z powodu dużych

wartości indukcyjności wzajemnych między gałęziami równoległymi oraz między uzwojeniami fazowymi, układy napędowe z tego typu klasycznymi silnikami są bardziej wrażliwe na zwarcia niż układy z maszynami wielofazowymi.

Teoria uzwojeń maszyn wielofazowych o uzwojeniach ułamkowych skupionych jest w początkowej fazie rozwoju. Nie ma jeszcze algorytmów projektowania obwodów magnetycznych i uzwojeń tych maszyn w pełni uwzględniających stawiane przed nimi wymagania. W prowadzonych pracach, dąży się m.in. do określenia takiej liczby żłobków w rdzeniu stojana, struktury uzwojenia oraz liczby par biegunów i rozłożenia magnesów w wirniku, dla których uzyskuje się małe pulsacje momentu, małą zawartość wyższych harmonicznych w indukowanych siłach elektromotorycznych, równomierny rozkład sił promieniowych działających na wirnik, czy dużą wartość współczynnika uzwojenia. Prezentowane z tego zakresu w literaturze badania mają charakter przyczynkowy. Dotyczą zazwyczaj analizy maszyn o zadanej liczbie żłobków i zadanej strukturze uzwojenia. Brak jest ujęć umożliwiających w prosty sposób dobrać optymalną, przy danych wymaganiach i ograniczeniach, liczbę żłobków stojana oraz biegunów wirnika wielofazowej maszyny synchronicznej magnetoelektrycznej z uzwojeniem ułamkowym o cewkach skupionych. Literatura

- [1] EL-Refaie A.M. (2010), "Fractional-Slot Concentrated-Windings Synchronous Permanent Magnet Machines: Opportunities and Challenges", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, VOL. 57, NO. 1, pp. 107-121, Jan. 2010, doi: 10.1109/TIE.2009.2030211.
- [2] Fan Wu, Ping Zheng, Yi Sui, Bin Yu, Pengfei Wang, (2014), "Design and Experimental Verification of a Short-Circuit Proof Six-Phase Permanent Magnet Machine for Safety Critical Applications", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 50, NO.11, NOV. 2014 pp.1-4, doi: 10.1109/TMAG.2014.2320902.
- [3] Valavi M., Nysveen A., Nilssen R., Robert D. Lorenz R.D., (2014), Rølvåg T., "Influence of Pole and Slot Combinations on Magnetic Forces and Vibration in Low-Speed PM Wind Generators", *IEEE Transactions on Magnetics*, VOL. 50, NO. 5, MAY 2014.
- [4] Jędrzycka C., Szeląg W., J. Piech, Multiphase permanent magnet synchronous motors with fractional slot windings. The future of low speed drives? COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, Vol. 35 No. 6, 2016, pp. 1937-1948.

MASZYNY O WZBUDZENIU HYBRYDOWYM I BARIERAMI MAGNETYCZNYMI Redakcja naukowa

prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny

Dynamiczny rozwój rynku samochodów hybrydowych i czysto elektrycznych pociąga za sobą konieczność poszukiwania nowych, wysokosprawnych napędów dla tych pojazdów. Obecnie większość producentów samochodów posiada w swojej ofercie sprzedażowej samochody hybrydowe lub elektryczne, ale pomimo niezaprzeczalnych zalet tych rozwiązań (mniejsze zużycie energii pierwotnej i mniejsze koszty użytkowania), poziom sprzedaży jest wciąż marginalny. Wg Gazety Wyborczej z 20. lutego 2017. „w 2016 r. w Polsce zarejestrowano

114 sztuk samochodów całkowicie elektrycznych (dane od ACEA). Jednocześnie w zeszłym roku do Polski wwieziono ponad 1 mln używanych samochodów spalinowych”. Jak zamienić te proporcje i jak zwiększyć, zgodnie z planami rządowymi, liczbę aut elektrycznych w Polsce z około 500 sztuk dzisiaj do 1 mln sztuk już w 2025 r.?

Realizacja tego planu wymaga m.in. stworzenia nowej generacji wysokosprawnych i niezawodnych układów napędowych dla samochodów elektrycznych. Na sprawność i niezawodność pracy systemu napędowego mają wpływ wszystkie jego elementy składowe, najważniejszym jednak elementem tego systemu są maszyny elektryczne. Na niezawodność ich pracy wpływa prawidłowość konstrukcji, technologia produkcji, jakość zastosowanych materiałów itd. Współcześnie widoczny jest szybki rozwój niekonwencjonalnych maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi typu NdFeB, posiadających istotne

zalety tj.: wysoką sprawność, dużą gęstość mocy, bezproblemowe sterowanie i regulację w szerokim zakresie prędkości obrotowej oraz duży moment obrotowy. Maszyny te są stale rozwijane oraz ulepszone, dzięki innowacyjnym technologiom w zakresie materiałów, obliczeń, projektowania, nowoczesnych układów sterowania czy zasilania. Specjalną grupę maszyn dedykowanych do napędu pojazdów elektrycznych stanowią maszyny o wzbudzeniu hybrydowym [1-4]. Cechą charakterystyczną tych maszyn jest możliwość osłabienia pola magnetycznego magnesów trwałych przy wysokich prędkościach obrotowych. Możliwość tę daje dodatkowy, umieszczony na stojanie maszyny, system cewek sterowanych prądem stałym. Cewki te zasilane są w ten sposób, że pole wzbudzenia w maszynie może zmieniać się od zera do wartości maksymalnej, limitowanej wyłącznie nasyceniem obwodu magnetycznego. Badania eksperymentalne potwierdziły korzystny wpływ dodatkowej cewki na stan wzbudzenia takich maszyn.

Przez zmianę wartości i kierunku prądu cewki dodatkowej, możliwa jest regulacja momentu rozruchowego i napięć fazowych w szerokim zakresie oraz widoczna jest poprawa ich sprawności. Badania przeprowadzono zarówno dla maszyn z magnesami ułożonymi powierzchniowo na wirniku, jak również z magnesami zagnieżdżonymi. To drugie rozwiązanie daje dodatkową możliwość zastosowania w wirniku barier magnetycznych, co pozwala na konstrukcję maszyn o dużym stosunku indukcyjności w osi q do indukcyjności w osi d , niskiej wartości momentu zaczepowego oraz małych pulsacjach napięcia indukowanego i momentu elektromagnetycznego. Duża wartość stosunku indukcyjności w osi q i d silnika elektrycznym oznacza, że posiada on możliwość regulacji prędkości obrotowej w szerokim zakresie, za pomocą prądu w osi d , co jest bardzo istotne w napędach trakcyjnych. Na podstawie analizy porównawczej wyników badań na modelach 3D, wykazano możliwość znacznego zmniejszenia momentu zaczepowego, masy magnesów trwałych oraz poziomu wyższych harmonicznych w napięciu indukowanym w uzwojeniach twornika takich maszyn. Opracowane już silniki charakteryzują się jednocześnie wysoką sprawnością (w szerokim zakresie prędkości obrotowej i momentu obciążenia), wysokim współczynnikiem mocy, dużą przeciążalnością momentem, a także możliwością pracy przy wysokich prędkościach obrotowych (w tym, z osłabianiem pola). Dzięki unikatowej konstrukcji silnika, osiągnąć można w nim większy moment obrotowy w zakresie niskich prędkości obrotowych oraz zwiększenie prędkości maksymalnej, bez użycia tradycyjnych (obniżających sprawność układu napędowego) technik osłabiania pola. Cechy te powodują, że może on być z powodzeniem zastosowany jako ekonomiczny napęd samochodów elektrycznych.

Podsumowując można stwierdzić, że możliwe jest otrzymanie lepszych parametrów trakcyjnych układów z wykorzystaniem proponowanych struktur maszyn ze wzbudzeniem hybrydowym oraz barierami magnetycznymi w stosunku do obecnych rozwiązań technicznych. Uzyskane wyniki pozwalają na wyznaczenie nowych kierunków badawczych rozwoju maszyn elektrycznych, spełniających wysokie wymagania techniczne i ekonomiczne. Przebadanie różnych geometrii maszyn hybrydowych oraz sformułowanie rekomendacji projektowych przyczynią się do obniżenia ceny samochodów z napędem elektrycznym (wysoka cena jest główną barierą podczas zakupu), a przez to do powszechnego stosowania samochodów elektrycznych, a także do zwiększenia ich niezawodności, bezpieczeństwa użytkowania i bardziej efektywnego wykorzystania energii z akumulatorów, czyli w konsekwencji do zwiększenia ich zasięgu. Literatura

- [1] Di Barba P., Mognaschi M. E., Pałka R., Paplicki P., Szkolny S.: Design optimization of a permanentmagnet excited synchronous machine for electrical automobiles. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, Volume 39, No 1-4/2012, pp. 889-895, DOI: 10.3233/JAE-2012-1556
- [2] Di Barba P., Bonisławski M., Pałka R., Paplicki P., and Wardach M.: Design of Hybrid Excited Synchronous Machine for Electrical Vehicles. IEEE Transactions on Magnetics, Jun. 2015, DOI: 10.1109/TMAG.2015.2424392

- [3] Paplicki P., Wardach M., Bonisławski M., Pałka R.: Simulation and experimental results of hybrid electric machine with a novel flux control strategy. Archives of Electrical Engineering, VOL. 64(1), pp. 3751 (2015), DOI 10.1515/ae-2015-0005
- [4] Di Barba P., Mognaschi M.E., Bonisławski M., Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Hybrid excited synchronous machine with flux control possibility. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics 52 (2016) 1615–1622, DOI 10.3233/JAE-162190

MASZYNY SYNCHRONICZNE DUŻYCH MOCY Z MAGNESAMI TRWAŁYMI (LSPMSM)

Redakcja naukowa prof. dr hab. inż. Jan Zawilak

Politechnika Wrocławska

Nieustająca tendencja do poszukiwania energooszczędnych rozwiązań przejawia się także w dziedzinie maszyn elektrycznych. Alternatywą stają się maszyny wzbudzone magnesami trwałymi [1 - 3], w tym te z możliwością uruchamiania przez bezpośrednie przyłączenie do sieci zasilającej (Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor) [4]. Przez wiele lat konstrukcje tego typu ograniczały się do mocy kilkunastu kilowatów.

Z inicjatywy prof. dr hab. inż. Andrzeja Demenko powołano konsorcjum, które podjęło się wykonania badań oraz opracowania zagadnień nt. „Nowa generacja energooszczędnych napędów elektrycznych do pomp i wentylatorów dla górnictwa”.

Coraz lepsze rozpoznanie charakterystycznych zjawisk zachodzących w tego typu maszynach (szczególnie rozruchu i synchronizacji), umożliwiło zbudowanie maszyn o mocach większych od 1MW. Opracowane nowe struktury silników synchronicznych z magnesami trwałymi pozwalają na budowę energooszczędnych napędów o sprawności i niezawodności większej niż obecnie stosowane silniki indukcyjne, przystosowane do różnych warunków pracy pozwalające na racjonalizację zużycia energii. W silnikach tych przewidziano zastosowanie nowoczesnych materiałów magnetycznych (np. magnesów trwałych o zmiennych właściwościach). Opracowane struktury wysokosprawnych konstrukcji silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi przeznaczonych do rozruchu bezpośredniego wentylatorów i pomp o odpowiednich dla tych urządzeń charakterystykach rozruchowych i eksploatacyjnych zweryfikowano obliczeniowo (metodą polowo-obwodową) oraz eksperymentalnie. Opracowano konstrukcje dwubiegowych silników o przełączalnych uzwojeniach stojana, z magnesami trwałymi: silników jedno- i trójfazowych, oraz silników przełączanych z pracy trójfazowej na pracę jednofazową, które zapewniają dużą sprawność i odpowiedni moment rozruchowy dla obu prędkości obrotowych. Opracowano konstrukcje silników z magnesami trwałymi do zasilania z przekształtników energoelektronicznych. Opracowane rozwiązania konstrukcyjne i materiałowe zapewniają łagodny rozruch i płynną regulację prędkości obrotowej. W opracowywanych konstrukcjach ograniczano straty mocy w silniku o regulowanej płynnie prędkości by z przekształtnikiem miał największą sprawność. Na podstawie wyników z polowych obliczeń projektowych i optymalizacyjnych opracowano technologie silników do napędu wentylatorów i pomp. Technologia ich wykonania uwzględnia specyficzne właściwości materiałów użytych do budowy i zapewnia, że właściwości materiałów (magnesów trwałych i blach elektrotechnicznych) nie ulegną pogorszeniu na skutek procesów technologicznych (laserowego wykrawania blach, odlewania aluminiowego uzwojenia klatkowego). Konstrukcja mechaniczna tych silników pozwala na instalowanie w miejsce silników indukcyjnych bez potrzeby zmiany płyty fundamentowej.

Opracowano konstrukcje silników synchronicznych wzbudzanych magnesami trwałymi dla pełnego zakresu mocy znamionowych o bardzo dużej sprawności (ok. 88 % dla mocy ułamkowej do ok. 98,4 % dla mocy megawatowej) w pełni skompensowane (współczynnik mocy ok. 1). Zmniejszenie prądu pobieranego przez te silniki umożliwia również zmniejszenie strat energii elektrycznej w układach zasilających (linie przesyłowe, transformatory).

Prowadzone są także prace badawcze dotyczące konstrukcji pierścieniowych silników asynchronicznych

synchronizowanych za pomocą umieszczonych w wirniku magnesów trwałych [5].

Literatura:

- [1]Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Silniki synchroniczne wzbudzane magnesami trwałymi w napędach dużej mocy*. Przegląd Elektrotechniczny. 2017, R. 93, nr 2, s. 173-176.
- [2]Zawilak Tomasz, Zawilak Jan: *Silnik synchroniczny wzbudzany magnesami trwałymi w napędzie młyna kulowego*. Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe. 2016, nr 3, s. 169-173.
- [3]Zawilak Jan, Zawilak Tomasz: *Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o dużej sprawności*. Przegląd Elektrotechniczny. 2014, R. 90, nr 1, s. 224-226.
- [4]Zawilak Tomasz: *Utilizing the deep bar effect in direct on line start of permanent magnet machines*. Przegląd Elektrotechniczny. 2013, R. 89, nr 2b, s. 177-179
- [5]Glinka T., Bernatt J: Asynchronous Slip-Ring Motor Synchronized with Permanent Magnet. Archives of Electrical Engineering. ISSN 1427-4221. Nr 1/2017. Str. 199-206.
- [6]T. Glinka, J. Bernatt, S. Gawron, K. Staszewski, E. Pacholski: Wirnik silnika elektrycznego z magnesami trwałymi. Patent Nr PL 226639 z dnia 09.03.2017 r.

MATERIAŁY INTELIGENTNE W PRZETWORNIKACH I AKTUATORACH

Redakcja naukowa:

prof. dr hab. inż. Wojciech Szląg, Politechnika Poznańska

Układy wykonawcze i przetworniki z materiałami inteligentnymi są coraz częściej stosowane w wielu dziedzinach techniki. Spowodowane jest to z jednej strony trudnościami w uzyskaniu postulowanych właściwości funkcjonalnych przy wykorzystaniu znanych struktur maszyn elektrycznych i przetworników elektromagnetycznych oraz zastosowaniu klasycznych materiałów elektrycznie i magnetycznie czynnych. Z drugiej natomiast dynamicznym rozwojem inżynierii materiałowej, opracowaniem efektywnych i tanich technologii produkcji materiałów inteligentnych oraz wzrastającym zapotrzebowaniem na złożone systemy mechatroniczne wykorzystujące przetworniki i układy o nietypowych właściwościach użytkowych.

Materiały inteligentne (*intelligent material, smart material*) zmieniają w sposób kontrolowany swoje własności fizyczne w odpowiedzi na bodziec zewnętrzny. Materiały tego typu są jednocześnie czujnikiem i aktuatorem. Takie właściwości mają m.in. materiały: piezoelektryczne, magnetokaloryczne, magnetostrykcyjne, termoelektryczne, polimery przewodzące, elastomery dielektryczne, materiały zmieniające swoją lepkość (ciecze magnetyczne, ciecze elektoreologiczne) oraz materiały z pamięcią kształtu (*thermal and magnetic shape-memory alloys*). W zależności od rodzaju materiału, czynnikiem aktywującym może być pole magnetyczne, pole elektryczne, temperatura lub naprężenia mechaniczne.

Na świecie i w Polsce prowadzone są intensywne badania nad wykorzystaniem materiałów inteligentnych w aktuatorach oraz w mikroukładach wytwarzania energii elektrycznej z łatwo dostępnych źródeł energii (wiatr, fale elektromagnetyczne, odpadowa energia cieplna, wibracje, strumień wody). Problematyka badawcza dotycząca systemów z materiałami inteligentnymi powinna obejmować:

- układy z cieczami magnetycznymi, tj. elektrycznie sterowane hamulce, sprzęgła, tłumiki drgań, absorbery energii mechanicznej, układy przenoszenia mocy, zawory bez mechanicznych elementów ruchomych;
- ekologiczne, wysokosprawne agregaty chłodnicze lodówek bazujące na materiałach magnetokalorycznych;
- układy chłodzenia, nagrzewania i wytwarzania energii elektrycznej z ogniwami Peltiera;

- akulatory i generatory energii elektrycznej z materiałami piezoelektrycznymi i magnetostrykcyjnymi;
- silowniki, głośniki, pompy, zawory, „sztuczne mięśnie” zbudowane przy wykorzystaniu elastomerów elektroaktywnych i polimerów przewodzących.

Ponadto, dla potrzeb projektowania układów z materiałami inteligentnymi należy opracować wiarygodne obwodowo-polowe oraz polowe modele i algorytmy analizy zjawisk sprzężonych. Celowe jest również opracowanie i wyznaczenie parametrów modeli opisujących właściwości materiałów inteligentnych.

Literatura

- [1] Yanju Liu, Haiyang Du, Liwu Liu, Jinsong Leng, Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review, *Smart Mater. Struct.* 23 (2014), pp. 23.
- [2] Khaled S. Ramadan, D. Sameoto, S. Evoy, A review of piezoelectric polymers as functional materials for electromechanical transducers, pp. 26.
- [3] Szeląg W.: Przetworniki elektromagnetyczne z cieczą magnetoreologiczną, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2010.
- [4] Houssein Rafik, El-Hana Bouchekara, Mouaaz Nahas, Magnetic Refrigeration Technology at Room Temperature, Trends in Electromagnetism - From Fundamentals to Applications, Dr. Victor Barsan (Ed.), ISBN: 978-953-510267-0, InTech, 2012, Available from: <http://www.intechopen.com/books/trends-in-electromagnetism-fromfundamentals-to-applications/magnetic-refrigeration-technology-at-room-temperature>.
- [5] Twaha S., Zhu J., Yan Y., Li B., A comprehensive review of thermoelectric technology: Materials, applications, modelling and performance improvement, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* - Elsevier, Vol. 65, November 2016, p. 698–726
- [6] Glinka T. Ryndzionek R., Sienkiewicz Ł.: Piezoelektryczne przetworniki elektromechaniczne. E-pismo: WWW.EPISMO-AEZ PL. Automatyka, Elektryka, Zakłócenia. INNS 2082-4149. Kwartalnik Vol.6, nr 2 (20)2015.

2.4.2. Transformatory energetyczne

Wstęp.

W Polskim systemie przesyłowym pracuje ok. 200 sztuk transformatorów sieciowych o mocy 160 MVA i większej, górnym napięciu przewodowym 220 kV i 400 kV. Transformatory dużych mocy (grupy I i II) zainstalowane w energetyce krajowej zostały wyprodukowane przez fabryki w Żychlinie, Łodzi (ELTA, ABB), dawne Zakłady remontowe Energetyki w Lublińcu (obecnie EthosEnergy Poland S.A.), a transformatory mniejszej mocy w Łodzi-Janowie (POLIMEX, MOSTOSTAL ZREW). Pojedyncze jednostki blokowe i sieciowe pochodzą z Austrii (ELIN), Japonii (HITACHI), Ukrainy (ZAPOROŻTRANSFORMATOR), a ostatnio z Korei Południowej (HYUNDAI). Duża liczba transformatorów ma staż, po zainstalowaniu, dłuższy niż 30 lat. Polska ma dobre tradycje w produkcji transformatorów [2].

2.4.2.1 Aktualne zagadnienia badawcze

Aktualne zagadnienia badawcze, które dotyczą transformatorów powinny obejmować sferę projektowania, technologii, badań w wytwórni i niezwykle istotnej gospodarczo sfery eksploatacji. Podstawowe wymagania, które musi spełniać transformator w czasie pracy dotyczą wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej i termicznej [4]. Na czoło wysuwają się zatem zjawiska elektromagnetyczne, będące przyczyną powstawania strat podstawowych i dodatkowych, sił zwarciovych w wyniku ewentualnych awarii, zagadnienia wytrzymałości dielektrycznej, związane z rozkładem pól potencjalnych i rozkładów powstających w wyniku elektryzacji strumieniowej, a także zjawiska związane z wyladowaniami niezupełnymi. Zagadnienia nagrzewania i skutecznego chłodzenia transformatorów, a zwłaszcza właściwej obciążalności w różnych warunkach klimatycznych są przedmiotem ciągłych badań.

Szczególną rolę odgrywa diagnostyka transformatorów stosowana w zakresie zarządzania eksploatacją transformatorów [3]. Ten kierunek badań jest intensywnie rozwijany w sensie metodologicznym i

narzędziowym. Należy podkreślić, że w Polsce zagadnienia monitoringu transformatorów, badań okresowych czystości i wytrzymałości oleju, łącznie z analizą chromatograficzną, badania przepustów wysokiego napięcia itp. są przedmiotem szczególnej troski [3]. Przytoczona w pracy literatura nie obejmuje wszystkich zagadnień, które zostały poruszone w tekście. W szczególności, przykładowe prace konferencyjne świadczą o aktualności naukowej i technicznej problematyki transformatorowej w Polsce.

2.4.2.2. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu transformatorów

Współczesna technika komputerowa pozwala na przedstawienie poszczególnych elementów transformatora, lub części jego układów, a także widoku zewnętrznego w konwencji trójwymiarowej z możliwością obrotu i specjalnego podświetlenia obiektu. Do tego służą, między innymi, programy komercyjne AUTOCAD i AUTODESK. Transformator składa się z uzbrojonego rdzenia, uzwojeń, przełącznika zaczepów, zbioru przewodów łączeniowych i wyprowadzeń, które można odwzorować z dość dużą dokładnością pod względem proporcji wymiarowych.

Rdzeń transformatora składa się z ogromnej ilości blach magnetycznych, przeplatanych w narożach i węzłach, najczęściej tworzących rdzenie jedno-, a niekiedy wieloramowe. Każda warstwa blach stanowi wydzielony obwód magnetyczny. Trójwymiarowa analiza pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem rozwiązań w poszczególnych warstwach przekracza możliwości obecnych programów obliczeniowych w rodzaju ANSYS, FLUXA, OPERY i innych. Modele traktujące rdzeń jako element jednolity, wymagają określenia zastępczych-równoważnych przenikalności i przewodności elektrycznych rdzenia, co jest obecnie przedmiotem prac badawczych. Szczególnym obszarem są naroża i węzły, w których zaplatane są blachy, gdzie zmiana kierunku strumienia powoduje zwiększone straty mocy.

Znacznie lepiej przedstawiają się możliwości obliczeniowe pól rozproszenia. Obszary rdzenia można traktować w przybliżeniu jako pozbawione prądów wirowych, o przenikalności magnetycznej dążącej do nieskończoności. Najczęściej wprowadza się do obliczeń fragmenty transformatora. Wynika to najczęściej z symetrii obiektu. Można także rozpatrywać węzły elektromagnetyczne w postaci wyizolowanej, zwłaszcza wtedy, gdy mają odmienne wyprowadzenia przewodów, inne odstępstwa od kadzi i pokrywy itp.

Spotyka się obecnie trójwymiarowe rozwiązania pól z wykorzystaniem pakietów komercyjnych dla potrzeb wyznaczania lokalnych strat w częściach konstrukcyjnych, ekranach, czy też określania rozkładu sił zwarciovych w uzwojeniach nieuszkodzonych i uszkodzonych [7].

Niezwykle ważne jest obliczenie na etapie projektowania rozkładów napięć i natężeń pola elektrycznego w układzie izolacyjnym transformatora, ze względu na kryteria wytrzymałości na przebicie. Obliczenia te, w konwencji trójwymiarowej, wykonuje się również dla istotnych fragmentów transformatora lub węzłów izolacyjnych w rodzaju wyprowadzeń z obszarów wysokiego napięcia. W wyniku obliczeń projektowych udaje się skonstruować uniwersalną izolację stałą, wyprowadzenia mocy na wysokim napięciu, czego przykładem może być modułowy układ izolacyjny odpływu 400 kV transformatora blokowego, czy też izolacja ceramiczna przekładnika kombinowanego. Należy zwrócić uwagę na potrzebę aplikacji metod polowych do rozwiązywania rozkładów pól w dielektrykach stałych i ciekłych, w warunkach pola przepływowego, wywołanego przykładowo w transformatorach HVDC.

Metody komputerowe powinny rozwijać się w kierunku badania nie tylko możliwych, ale także dopuszczalnych uproszczeń geometrycznych obiektów, bez większego uszczerbku na dokładności obliczeń parametrów całkowitych pola [7].

2.4.2.3. Diagnostyka eksploatacyjna transformatorów energetycznych

Transformatory stanowią jeden z droższych składników sieci elektroenergetycznych. Dbłość o ich zdolność eksploatacyjną wiąże się z nakładami finansowymi. Pod rozpowszechnionym pojęciem zarządzania eksploatacją transformatorów kryją się nowoczesne sposoby dyspozycji, nadzoru i sterowania tymi urządzeniami połączone z coraz doskonalszą diagnostyką techniczną.

W ramach Komitetu Studiów A2 CIGRE powołana została Grupa Robocza A2-20 "Aspekty ekonomiczne gospodarowania transformatorami". Doświadczenia polskie w tym zakresie są znaczące [3]. W wyniku prac wspomnianej Grupy powstał przewodnik przeznaczony dla personelu, który odpowiada za ekonomiczne aspekty zarządzania eksploatacją transformatorów. Obejmuje on cztery obszary:

- zarządzanie ryzykiem,
- wymagane warunki techniczne i zakupy,
- zagadnienia eksploatacyjne,
- procedury decyzyjne: naprawa, modernizacja, wymiana.

Zarządzanie eksploatacją w Polsce zasada się na przepisach zawartych w Ramowej Instrukcji Eksploatacji Transformatorów, modernizowanej co kilka lat. Chociaż nie jest ona dokumentem obligatoryjnym, to jest bardzo często wykorzystywana przy opracowaniu szczegółowych instrukcji eksploatacji.

Transformatory różnią się konstrukcją, wiekiem i stanem eksploatacji, dlatego trudno sporządzić dla nich instrukcję o charakterze uniwersalnym.

Transformatory w eksploatacji wykazują oznaki zestarzenia izolacji i tendencje do zawilgocenia. Jednakże, ze względu na przewymiarowaną izolację papierową i nie wykorzystanie ciepła, uzasadniona jest ich dalsza eksploatacja. W transformatorach projektowanych i wytwarzanych współcześnie najczęściej:

- rozwijają się uszkodzenia wewnętrzne z powodu przegrzań i wylądowań niezupełnych (wnz), a także zupełnych,
- ulegają uszkodzeniom przełączniki zaczepek pod obciążeniem,
- następują uszkodzenia izolatorów przepustowych w transformatorach najwyższych napięć, – powstają zagrożenia związane z obecnością cząstek stałych w oleju [5].

W pracach [3] można znaleźć najbardziej znane techniki pomiarowe, konwencjonalne i będące w stadium rozwoju, stosowane w diagnostyce transformatorów, obejmujące skutki zakłóceń mechanicznych, termicznych i dielektrycznych.

W problematyce badań diagnostycznych istnieją także długoletnie doświadczenia polskie, prezentowane szczególnie na krajowych konferencjach transformatorowych.

2.4.2.4. Proponowana tematyka badań w zakresie transformatorów

Proponowana tematyka powinna uwzględniać krajowe możliwości badań.

1. W zakresie problematyki projektowej nasuwają się następujące propozycje dotyczące doskonalenia metod w zakresie obliczeń elektromagnetycznych, cieplnych i wytrzymałościowych struktur transformatorowych, obejmujących:
 - a) straty w rdzeniach zaplatanych jedno- i wieloramowych konwencjonalnych,
 - b) straty mocy w rdzeniach amorficznych,
 - c) straty mocy wskutek strumienia rozproszenia poza uzwojeniami,
 - d) obliczenia termiczne w warunkach chłodzenia naturalnego i wymuszonego,
 - e) przestrzenne naprężenia mechaniczne wskutek sił zwarciovych,
 - f) rozkłady pól stacjonarnych i udarowych w strukturach uzwojeń.
2. W zakresie technologii proponuje się:
 - a) nowe technologie wytwarzania izolacji elektrycznej twardej i miękkiej transformatorów,
 - b) rozwój technologii w zakresie regeneracji olejów izolacyjnych oraz suszenia i impregnowania (zalewania) olejem części aktywnych transformatorów,

- c) nowe technologie transformatorów żywiczych (mniejszej mocy),
- d) technologie transformatorów wysokich częstotliwości dla energoelektroniki.
- e) rozwój technologii związanej z transformatorami nadprzewodnikowym

Po opracowaniu 2004 roku technologii wytwarzania wysokotemperaturowych nadprzewodnikowych przewodów warstwowych nastąpił wyraźny postęp w rozwoju transformatorów nadprzewodnikowych. Obecnie transformatory są (obok układów lewitacji i separacji magnetycznej) jedną z bardziej obiecujących aplikacji nadprzewodników. Najużyteczniejszą własnością uzwojeń nadprzewodnikowych jest zdolność przewodzenia prądów o dużej gęstości przy bardzo małych stratach energetycznych. Głównym przedmiotem badań jest analiza zjawiska prądu włączania transformatorów nadprzewodnikowych. Podstawowa bowiem trudność w eksploatacji tych transformatorów wiąże się z koniecznością utrzymania uzwojeń w stanie nadprzewodzenia. Konsekwencją utraty stanu nadprzewodzenia może być wzrost temperatury uzwojeń transformatora do wartości, przy której nastąpi ich termiczne uszkodzenie.

3. Proponowana problematyka eksploatacyjna nakierowana na monitoring:

- a) identyfikacja miejsc wyładowań niezupełnych,
- b) szybkie metody lokalizacji przegrzań rdzenia, uzwojeń i części konstrukcyjnych,
- c) skuteczne metody monitoringu izolatorów przepustowych najwyższych napięć,
- d) metody określenia dopuszczalnego zużycia elementów przełączników zaczepów,
- e) monitoring drgań i hałasów wskazujących na uszkodzenia wewnętrzne transformatora,
- f) doskonalenie metod FRA (Frequency Response Analysis) pod względem czułości w badaniu wpływu zwarć na deformację uzwojeń,
- g) metody archiwizacji danych i korelacji zmian parametrów z poszczególnymi uszkodzeniami elementów transformatorów.

4. Problematyka eksploatacyjna dotycząca regulacji napięcia transformatorów

W transformatorach energetycznych rozdzielczych i stacyjnych standardowo wymagana jest regulacja napięcia. Obecnie energetyka wymagania te stawia także nowo instalowanym bądź modernizowanym transformatorom blokowym. Jest to poważny problem konstrukcyjny i technologiczny w budowie transformatorów. Regulację napięcia pod obciążeniem realizuje się skokowo w ten sposób, że na końcach jednego z uzwojeń wyprowadzane są zaczepy, które są połączone z przełącznikami. Przełączniki zaczepów mają budowę złożoną, gdyż przełączenie z jednego zaczepu na drugi musi być wykonane tak aby:

- nie było zaburzenia w napięciu i prądzie wyjściowym,
- nie powstał łuk elektryczny,
- nie było chwilowych zwarć zwojowych w uzwojeniu.

Standardowy przełącznik zaczepów składa się z dwóch przełączników połączonych szeregowo, przy czym przełącznik zewnętrzny jest wyposażony w rezystory [1]. Tak więc przełącznik zaczepów ma podwójny sprężynowy kontakt stykowy oraz układ napędowy przełączania styków. Jest to najbardziej zawodne urządzenie w transformatorach.

Prace badawcze w transformatorach powinny koncentrować się na rozwiązaniu płynnej regulacji napięcia pod obciążeniem poprzez zastosowanie falowników energoelektronicznych AC/DC/AC [5,6]. Należy rozwiązać kilka problemów:

- opracowanie falowników na odpowiednio dużą moc, w tym napięcie i prąd, oraz ich połączenie z uzwojeniem transformatora,
- kompatybilność elektromagnetyczną: THD (ang. Total Harmonic Distortion) i zakłócenia elektromagnetyczne,

- trwałość izolacji, w szczególności zwojowej, na pochodną napięcia przy komutacji zaworów energoelektronicznych o dużej częstotliwości przełączana.

Literatura

- [1] Glinka T.: *Maszyny elektryczne i transformatory*. PWN, 2018 r.
- [2] JEZIEŃSKI E., *Polskie osiągnięcia naukowo-techniczne w dziedzinie transformatorów w latach 1945-1963*, Przegląd Elektrotechniczny, Rok XL (1964), nr 10, ss.421-425
- [3] KAŻMIERSKI M., OLECH W.: *Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów*. Wydawnictwo: Energopomiar-Elektryka Sp. z o. o., Gliwice 2013r.
- [4] METHA S. i inni, *Power transformers technology review and assessments*, Electra CIGRE February 2008 (tłumaczenie na język polski w czasopiśmie Urządzenia dla energetyki Nr 4/2008, ss. 24-29)
- [5] Strzelecki R., Zymmer K., Pawlak P., Konieczny P.: *Dystrybucyjny transformator hybrydowy jako aktywny element nowoczesnych systemów „Smart Grid”*. Materiały XI Konferencji naukowo-technicznej „Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów”. Energopomiar-Elektryka 2018 r.
- [6] *Układ regulacji napięcia transformatora*. Zgłoszenie patentowe P.426587 i P.426589,
- [7] ZAKRZEWSKI K., TOMCZUK B., KOTERAS D., *Simulation of forces and 3D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding*, IEEE Transactions on magnetics, New York, USA, vol.38 No 2, March 2002, pp.1153-1156.