

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

POMIARY ON-LINE STANU IZOLACJI UZWOJEŃ SILNIKÓW INDUKCYJNYCH WYSOKONAPIĘCIOWYCH

ON-LINE MEASUREMENT OF THE CONDITION OF WINDING INSULATION OF HIGH-VOLTAGE INDUCTION MOTORS

Abstract: The article presents an industrial application of high voltage induction motor on-line measurement. The paper contains an analysis of different diagnostics methods. The results indicate that these on-line methods are both useful. Partial Discharge (PD) on-line measurement is a recognized testing method for identification of deterioration of stator winding insulation of high voltage rotating machines such as hydraulic generators, high-speed turbine generators and large motors.

1. Wstęp

Prowadząc badania diagnostyczne off-line stanu izolacji silników autor gromadził elementy uzwojenia silników elektrycznych WN, które w trakcie ich remontów można było pozyskać. Gromadzono również w miarę możliwości tzw. cewki zapasowe – to znaczy cewki, które w trakcie produkcji danego silnika WN są cewkami rezerwowymi, wykorzystywanymi w wyjątkowych sytuacjach. Wszystkie zgromadzone elementy uzwojenia poddawano oględzinom, dokumentowano fotograficznie ich wygląd, kojarzono w miarę możliwości z zewnętrznymi objawami uszkodzenia danego silnika. Do najciekawszych etapów archiwizowania elementów uzwojenia autor zalicza możliwość oglądnięcia przekrojów części czołowych uzwojenia; tuż za wyjściem ze żłobka, wykorbienia oraz tzw. główek.

2. Badania własne

Prowadząc badania jakości uzwojeń silników opracowano technologię przecinania uzwojenia. Technologia ta nie deformuje zastanego układu: miedz uzwojenia-izolacja. Można powiedzieć, że w przeciętym miejscu sposób cięcia nie zniekształca faktycznego stanu w uzwojeniu. Na rys. 1a÷c pokazano dla przykładowych silników, których izolacja była wykonana zarówno w technologii VPI jak i Resin-Rich przekroje przeciętych części czołowych uzwojenia. Zwraca uwagę fakt licznych szczelin w izolacji uzwojenia, widać obszary gdzie warstwa izolacji uległa deformacji, jej grubość wyraźnie zmieniła się – wzrosła, a poszczególne warstwy stały się luźne. Obszary zdeformowanej izolacji występują przede wszystkim w izolacji wykonanej

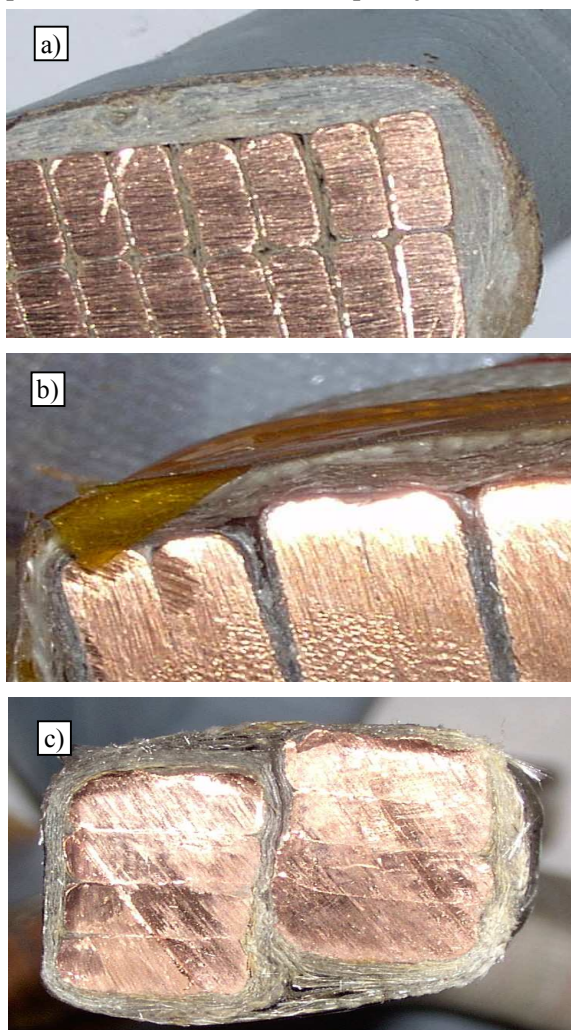
w technologii Resin-Rich mieszanej. W ocenie własnej powodów deformacji izolacji w szczególności w obszarze wykorbień i główek uzwojeń jest kilka:

- końcowe formowanie części czołowej uzwojenia, które sprowadza się nawet do użycia siły fizycznej i prostych narzędzi aby „dopasować” kształt cewek do geometrii stojana [15],
- działanie wszystkich czynników narażenia izolacji) [6, 15],
- w szczególności efekt działania sił elektrodynamicznych w czasie eksploatacji silników powoduje drgania uzwojeń, ich odkształcanie się i deformacje układu izolacyjnego [4].

Występujące deformacje w układzie izolacyjnym uzwojeń silników, powstające szczeliny powietrzne (wyraźnie widoczne na rys. 1a÷c) w izolacji, są przyczyną występowania wnz w szczególności w obszarze części czołowej uzwojeń. Szczeliny powietrzne, rozwarstwienia, stwierdzono zarówno w układach izolacyjnych uzwojeń silników, które uległy uszkodzeniom, jak również w cewkach nowych – zapasowych. W cewkach rezerwowych, co oczywiste szczelin powietrznych było mniej [15].

Autor stwierdził również, że rozwarstwienia i szczeliny powietrzne występują przede wszystkim w obszarach części czołowych uzwojeń stojana silników. W częściach prostych cewek uzwojenia szczelin i rozwarstwień było zdecydowanie mniej. Generacji wnz w silniku w czasie jego pracy należy się spodziewać przede wszystkim od strony czołowej uzwojenia. Dalsza analiza stwierdzonych faktów do-

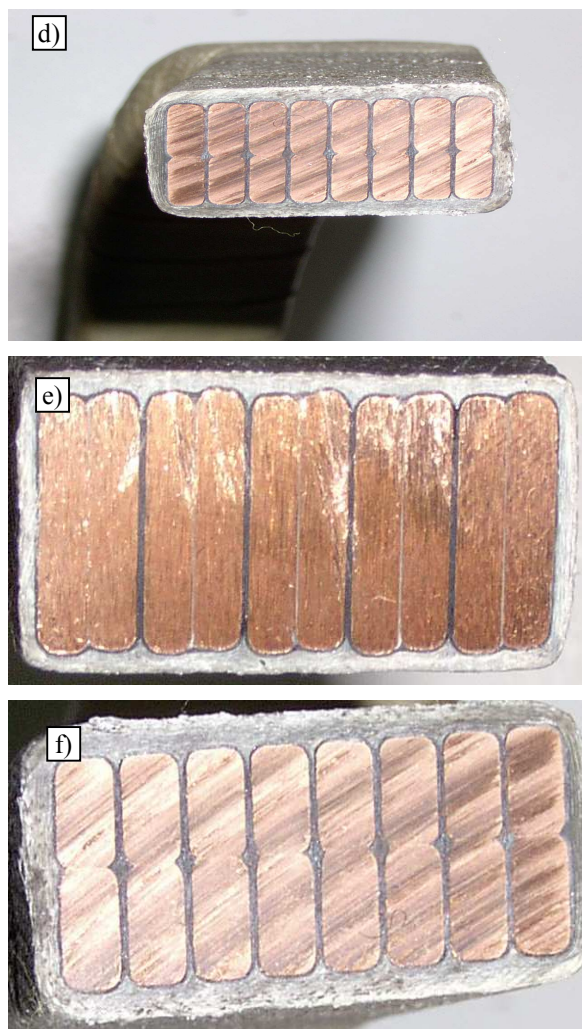
przewadziła autora do przekonania o konieczności podjęcia badań własnych w zakresie pomiarów stanu izolacji silników w warunkach on-line. Generacja wznz przez izolacje silników w warunkach ich eksploatacji jest inna niż w warunkach off-line. Podczas pracy silników występują siły elektrodynamiczne, w szczególności w częściach czołowych uzwojeń, które sprzyjają powstawaniu wznz. Silniki na postoju



Rys. 1. Przekroje przeciętych części czołowych uzwojenia dla przykładowych silników a), b), c) – izolacje wadliwe

w trakcie badań off-line mają układ izolacyjny naprężony tylko elektrycznie. Jest to znacznie mniejszy zakres wymuszeń niż w czasie eksploatacji. Naprężenia elektryczne, mechaniczne i cieplne w układzie izolacyjnym silników obok tego, że zależą bardzo mocno od warunków pomiaru izolacji, warunków pracy (temperatura, wilgotność, stopień obciążenia silnika), równocześnie nie są rozłożone równomiernie w układzie izolacyjnym. Pogorszenie się stanu izolacji

uzwojenia silnika w poszczególnych miejscach układu zachodzi w różnym stopniu i w różnym tempie. Należy w procesie diagnostycznym silnika ten element uwzględnić w miarę możliwości technicznych. Układ izolacyjny silnika jest tak wytrzymały jak wytrzymały jest jego najsłabszy element – miejsce układu izolacyjnego.

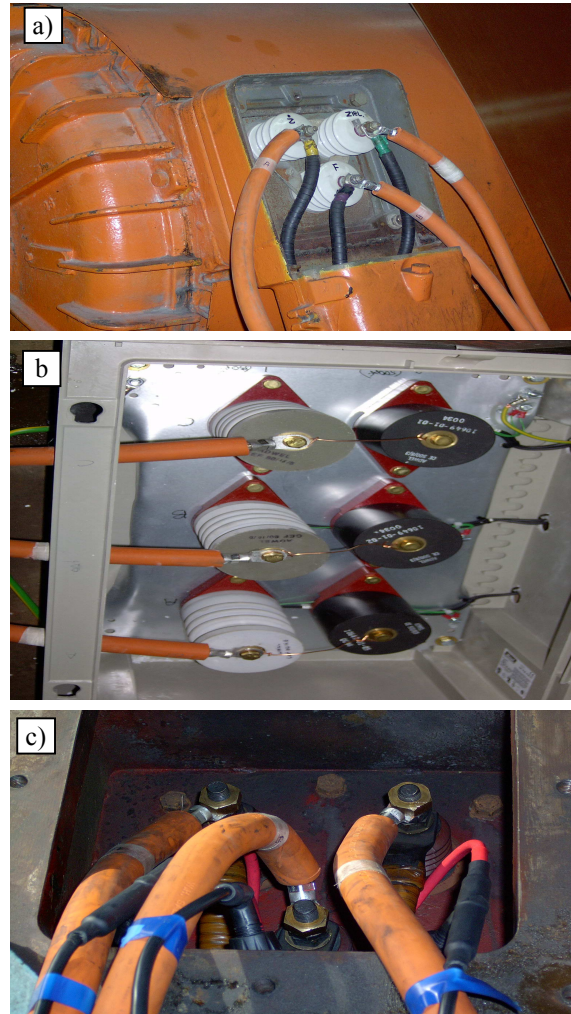


Rys. 1. Przekroje przeciętych części czołowych uzwojenia dla przykładowych silników d), e), f) – izolacje bez zastrzeżeń

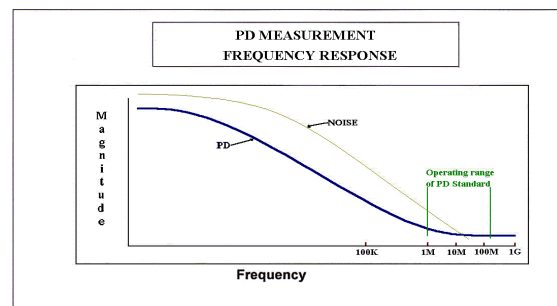
Kolejnym etapem badań była seria pomiarów stanu izolacji 4 różnych silników WN w warunkach ich normalnej pracy czyli pomiary on-line przy użyciu sprzętu pomiarowego renomowanej firmy zachodniej. Autor wykonał te pomiary wspólnie ze specjalistą kanadyjskiej firmy Adwel – Ian Slocombe [1]. Pomiary wznz silników wykonano w czasie ich normalnej eksploatacji korzystając z czujników pomiarowych typu bezindukcyjne, bezwyładowaniowe kondensatory 80 pF i 500 pF podłączone w wariantach pomiarowych po 1 na uzwojenie fazowe,

podłączenie w skrzynce zaciskowej silnika badanego do zacisku fazowego - rys. 2. Równocześnie w miarę możliwości technicznych mierzono wnz silników korzystając z 3 elastycznych cewek Rogowskiego nawiniętych po jednej na każdym przewodzie zasilającym silnik. Nawinięcie na każdym przewodzie zasilającym było w wariancie 1 zwoj, 2 zwoje, 3 zwoje, 4 zwoje, równocześnie tyle samo na każdym przewodzie zasilającym. Pomiary wykonano korzystając z analizatora wyładowań niepełnych PDA PREMIUM, który jest urządzeniem w standardzie PDA. Jest to najnowszy przemysłowy standard pomiaru wnz generatorów oraz silników odporny na zakłócenia, który mierzy wnz w zakresie od 1÷150 MHz. Wybór takiego zakresu pomiaru wnz w badaniach on-line stanu izolacji maszyn elektrycznych wynika z: rezultatów długoletnich badań jakie firma ADWEL prowadziła w warunkach przemysłowych nad określeniem najkorzystniejszego z punktu widzenia metrologicznego zakresu pomiarów wnz zważywszy na stosunek sygnału do szumu, widma wnz (PD) pochodzących od maszyn elektrycznych, widma zakłóceń w czasie pomiarów przy uwzględnieniu charakterystyk częstotliwościowych czujników wnz [1, 2]. Ustalono, że najkorzystniejszy do pomiarów jest przedział od 1 do 150 MHz. Na rys. 3. przedstawiono w uproszczonej graficznej formie rezultaty badań. Stosowany przez autora układ do pomiaru wnz on-line wybranych 4 silników z użyciem analizatora PDA PREMIUM przedstawiono na rys. 4. Kondensatory sprzęgające 80 pF lub 500 pF były bezpośrednio podłączone do zacisków fazowych silnika, a więc znajdowały się na potencjale 6 kV. Kondensatory te skutecznie tłumią przejście napięcia o częstotliwości sieciowej 50 Hz do analizatora. Impedancja (Z) kondensatora 80 pF dla $f=50$ Hz, $Z=39,8$ M Ω , dla sygnałów w.cz czyli wyładowań niepełnych; dla $f=1$ MHz, $Z=1,99$ k Ω , a dla $f=150$ MHz, $Z=13,27$ Ω . Dla sygnałów w.cz kondensator pomiarowy 80 pF praktycznie nie stanowi przeszkody. Dla kondensatora 500 pF impedancje są 6,25 razy mniejsze. Można więc stwierdzić, że sygnały napięciowe pochodzące od wnz izolacji badanego silnika w wybranym zakresie pomiarowym, które docierają do zacisków fazowych silnika przechodzą bez większych strat do analizatora wnz (rys. 4.). Zważywszy na parametry kondensatorów sprzęgających, w tym

przede wszystkim na ich czułości, impedancję dla 50 Hz i wnz oraz cenę, najkorzystniejszym w ocenie autora wydaje się sprzęgających 500 pF (cena za 3 szt. ok. 3000 Euro).

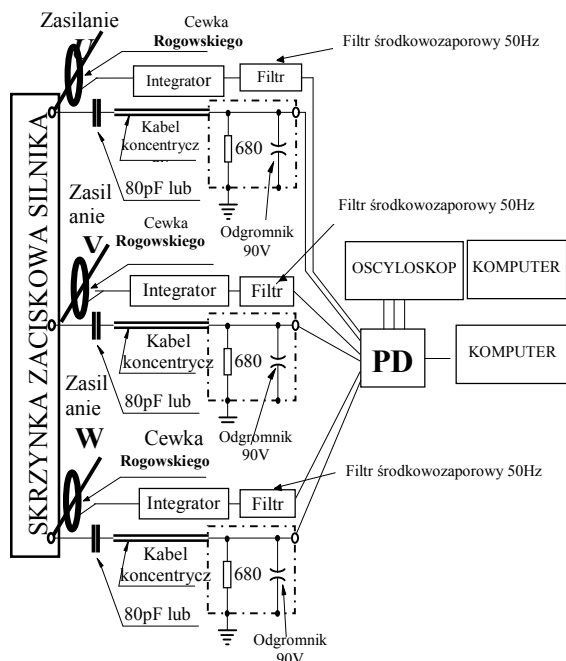


Rys. 2. Kondensatory pomiarowe 80 pF i 500 pF do pomiarów wnz silników podłączone do silnika, a) silnik o mocy 200 kW, b) kondensatory, c) silnik o mocy 2,6 MW, skrzynka zaciskowa (widoczne cewki Rogowskiego)



Rys. 3. Widmo wnz (PD) maszyn elektrycznych w czasie ich eksploatacji oraz widmo zakłóceń [1]

Elementem zabezpieczającym przed przedostaniem się zbyt dużego napięcia do analizatora wnz jest odgromnik 90 V oraz skuteczne uziemienie ekranów kabli koncentrycznych. Ponieważ zamiarem autora było sprawdzenie możli-



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego PDA [1]

wości wykorzystania wspomnianego analizatora PDA do pomiarów wnz przy zastosowaniu elastycznych cewek Rogowskiego, w trakcie wszystkich pomiarów z udziałem sprzęgaczy pojemnościowych szacowano napięcia w układzie pomiarowym. W trakcie pomiarów występowały napięcia rzędu μV do kilku V. Nominalna dynamika analizatora PDA $\pm 16 \text{ mV}$ do $\pm 6,4 \text{ V}$ w trakcie pomiaru wnz jest podzielona na 16 zakresów napięcia – klasy intensywności sygnału, któremu towarzyszy podział na 60 zakresów fazy ($360^\circ:60=6^\circ$). Pomiar odbywa się przy synchronizacji napięciem zewnętrznym wybranej fazy silnika. Ustawienia „odporności” analizatora PDA ze względu na wpływ zakłóceń odbywa się dodatkowo w oparciu o zmierzony poziom maksymalnych zakłóceń w miejscu pomiaru. Tymi najintensywniejszymi zakłóceniami były: praca spawarki bezpośrednio przy badanym silniku – 8 mV i praca suwnicy nad badanym silnikiem – 6 mV. Sygnały powyżej tych poziomów interpretowano jako użyteczne. Pomiar wnz silników on-line przy użyciu analizatora PDA przebiegały w procedurze najczęściej spotykanej to znaczy bez wcześniejszej kalibracji toru pomiarowego. Kalibracji nie można było

przeprowadzić ponieważ silników nie można było rozmontować. Kalibracja do pomiarów wnz, o czym autor pisze w publikacji [15], wymaga demontażu silnika.

Do pomiarów wnz on-line wybrano z 3 zakładów przemysłowych 4 silniki:

1. Silnik o mocy 200 kW, 6 kV, izol. F, rok prod. 1988, napęd pompy.
2. Silnik o mocy 6,3 MA, 6 kV, izol. F, rok prod. 1995, napęd pompy.
3. Silnik o mocy 1,9 MW, 6 kV, izol. F, rok prod. 1980, napęd wentylatora.
4. Silnik o mocy 2,6 MW, 6 kV, izol. F, rok prod. 1978, napęd sprężarki.

Wszystkie z wymienionych silników dla porównania wyników, przed pomiarami wnz przebadano przy zastosowaniu pomiaru izolacji off-line, stosując test Meggera oraz DC Ramp Test. Wnioski z przeprowadzonych badań wnz silników on-line przedstawiają się następująco:

1. Stwierdzono, że kondensatory 500 pF są zdecydowanie bardziej przydatne do pomiarów wnz silników niż kondensatory 80 pF, w szczególności gdy poziom wnz jest mały. Przy zastosowaniu kondensatorów 500 pF wartości Q_m dla silników były większe od $40\div 200\%$, a wartości NQN od $60\div 160\%$ większe niż przy stosowaniu kondensatorów 80 pF. Wszystkie z badanych silników miały zadawalające wyniki w teście Meggera i w DC Ramp. Teście jednak wyniki pomiarów wnz były bardzo zróżnicowane. Wartości parametrów wnz [2, 3, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16] NQN -, NQN +, Q_{max-} , Q_{max+} , przedstawiono w tablicy 1. Oznaczenia A2, B2, C2 są oznaczeniami firmy ADWEL dla poszczególnych uzwojeń fazowych silnika – wejścia w analizatorze. Silniki badano w zbliżonych do siebie warunkach wilgotnościowych – wilgotność względna $68\div 75\%$. Temperatury uzwojeń stojana podano w tablicy 1. Wszystkie wyniki parametrów wnz dotyczą zastosowania sprzęgaczy pojemnościowych 500 pF. Jak już wcześniej wspomniano, poszczególnych torów pomiarowych nie można było z przyczyn technicznych wykalibrować. W związku z tym wzajemne porównanie wyników pomiarów dla poszczególnych silników nie jest w pełni uzasadnione. Zwraca jednak uwagę na tle innych silników wyróżniający się wysokimi poziomami wnz silnik o mocy 6,3 MW. Wartości NQN dla tego silnika dochodzą do 3729 (tablica.1). Q_m osiąga 2800 mV przy wartościach dla innych silników; $NQN = 0\div 162$, a $Q_m = 0\div 500 \text{ mV}$.

2. W ocenie firmy ADWEL [1], na podstawie wieloletnich ciągłych pomiarów wnz on-line na populacji kilkuset silników WN dużej mocy, stałe przekraczanie przez Q_m wartości 150 może oznaczać problemy z izolacją silnika w najbliższym czasie. Informację taką przedstawiono właścicielowi silnika. Okazało się, że problemy rzeczywiście występują. Podłączenie zasilania silnika 6,3 MW przy użyciu szynoprzewodów przewidziano w specjalnym zamkniętym pomieszczeniu. Dla zapewnienia bezpieczeństwa obsługi technicznej, pomieszczenie jest bardzo szczelne, ma wymuszoną wentylację. W ocenie autora system wentylacji jest zaprojektowany bardzo niefortunnie, wentylacja jest niewystarczająca. Na połączeniach szynoprzewodów zasilających z końcówkami uzwojenia silnika dochodzi do postępującego w czasie pogorszenia się jakości styków. Styki na szynoprzewodach mocno śniedzieją, sprzyja temu znaczna wilgotność w pomieszczeniu. Na uwagę zasługuje fakt, że najgorzej sytuacja przedstawia się w skrajnym uzwojeniu fazowym W (C2), szynoprzewód zasilający to uzwojenie fazowe najbardziej śniedzieje. Jest to ta sama faza, w której poziom wnz – NQN i Q_{max} (tablica 1) osiąga największe wartości.

Na rys.5 przedstawiono wyniki pomiarów wnz wspomnianego silnika elastycznymi cewkami Rogowskiego

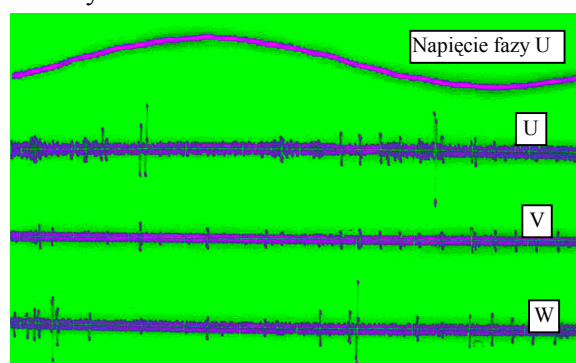
Tablica 1.

Zestawienie wyników pomiarów wnz silników analizatorem PDA

Lp.	Badany silnik	Stan pracy temperatura, uzwojenia	Uzwojenie fazowe	NQN, ujemna polaryzacja impulsów	NQN, dodatnia polaryzacja impulsów	Qmax, ujemna polaryzacja impuls. [mV]	Qmax, Dodatnia polaryzacja impuls. [mV]
1.	200 kW	0,5 obciążenia znamionowego $T=74^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	162 90 85	162 84 91	500 0 100	500 100 100
2.	6,3MW	0,5 obciążenia znamionowego $T=79^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	2686 1140 3263	2748 1098 3729	2800 800 2400	800 800 2400
3.	1,9MW	bieg jałowy $T=65^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	21 12 14	15 11 15	16 16 16	16 16 16
4.	2,6MW	bieg jałowy $T=62^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	25 126 0	247 51 108	50 100 0	150 50 100
5.	2,6MW	0,5 obciążenia znamionowego $T=74^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	53 113 8	266 128 151	0 200 0	150 150 100
6.	2,6MW	obciążenie znamionowe $T=78^{\circ}\text{C}$	U (A2) V (B2) W (C2)	27 45 17	317 134 143	50 50 0	150 150 100

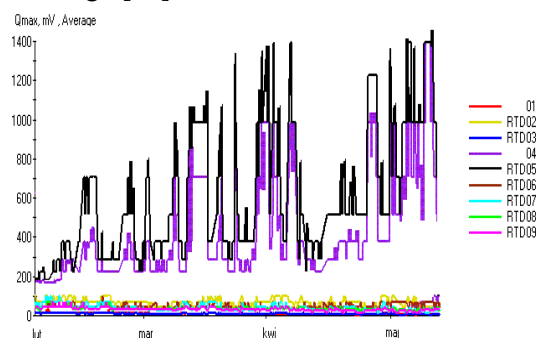
3. Dalsza analiza wyników badań wnz dla silnika o mocy 6,3 MW przeprowadzona w opar-

ciu o pomiary częstotliwości występowania impulsów wnz w zależności od wielkości impulsów, oddzielnie dla polaryzacji ujemnej oraz dodatniej wskazują na podobną intensywność wnz w dodatniej i ujemnej połowie napięcia zasilającego w szczególności dla uzwojenia fazowego V (B2) i W (C2) [1, 2] co oznacza występowanie szczelin powietrznych, pęknięć wewnątrz izolacji. Dla uzwojenia fazowego U (A2) stwierdzono, że $Q_{max} > Q_{max+}$, ale jednocześnie wykres częstotliwości występowania impulsów w zależności od wielkości impulsów, nie wykazuje wyraźnego i jednoznacznego rozdzielenia przebiegów dla polaryzacji ujemnej i dodatniej, co skłania do stwierdzenia, że intensywność wnz w dodatniej oraz ujemnej połowie napięcia zasilanego są podobne. Autor z uwagą śledzi dalsze losy silnika.



Rys. 5. Silnik o mocy 6,3 MW, pomiary wnz elastycznymi cewkami Rogowskiego

Kolejny etap badań własnych autora to badania rozpoznawcze w sprawdzeniu przydatności termorezystorów – RTD do pomiarów wnz silników. W tym celu do termorezystorów Pt-100 silników podłączono zespoły antenowe własnej konstrukcji, umożliwiające przeniesienie sygnału w.cz. z termorezystorów do układu pomiarowego [15].



Rys. 6. Silnik o mocy 1,4 MW, 6 kV, pomiary wnz przy użyciu; RTD i czujników własnych, wykresy parametru Q_{max} dla trybu godzinowego

Zespół antenowy umożliwia podłączenie termorezystorów o dowolnej konfiguracji, zapewnia również bezpieczeństwo mierzącemu i chroni aparaturę przed ewentualnym uszkodzeniem przez galwaniczne oddzielenie stojana od układu pomiarowego. Charakterystyka częstotliwościowa układu; termorezystor-zespół antenowy, umożliwiła pomiar wnz w zakresie 0,5÷20 MHz. Opracowano również własne czujniki wnz typu anteny na pasmo MHz-owe w postaci pętli lub fragmentu pętli, które autor umieszcza w silnikach od strony napędowej i przeciw-napędowej w strefie czoł [15]. Na rys. 6 przedstawiono wyniki pomiarów wnz uzyskane przy wykorzystaniu RTD i czujników własnych oraz aparatury pomiarowej własnej konstrukcji dla przykładowego silnika [15].

3. Uwagi i wnioski

Autor na podstawie swoich dotychczasowych doświadczeń uważa, że badania i diagnostyka on-line stanu izolacji silników elektrycznych w oparciu o pomiar wnz w warunkach przemysłu krajowego jest celowy i technicznie możliwy. Diagnostykę można prowadzić w oparciu o wszystkie dostępne czujniki wnz.

Sprawą najważniejszą przy diagnostyce on-line stanu izolacji silników jest śledzenie na bieżąco trendu zmian wielkości mierzonych w szczególności: Q_m , NQN , PDI , rozkładów fazowo-rozdzielczych. Wyniki pomiarów wnz silników zależą od: stanu ich izolacji, obciążenia silnika, temperatury uzwojeń, wilgotności, poziomu zakłóceń zewnętrznych oraz od charakterystyki czujników wnz i aparatury analizującej wnz [15].

4. Literatura

- [1]. ADWEL: *PD monitoring*. Nota Aplikacyjna 2003.
- [2]. Bertenshaw D., Sasic M.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV motors-Casestudies on Improved Sensitivity Couplers*. Nota aplikacyjna firmy ADWEL International Canada, 2002.
- [3]. Blokhintsev, M. Golovkov, A. Golubev, C. Kane: *Field Experiences on the Measurement of Partial Discharges on Rotating Equipment*, IEEE PES'98, February 1-5, Tampa
- [4]. Drak B.: *Zagadnienia elektromechaniczne czoł uzwojeń stojanów maszyn elektrycznych dużej mocy prądu przemiennego*. Monografia, Wyd. Politechnika Śląska, Zeszyty Naukowe Elektryka, zeszyt nr 163, Gliwice, 1998.
- [5]. Florkowska B, Florkowski M., Włodek R., Zydroń P.: *Mechanizmy, pomiary i analiza wyladowań niezupełnych w diagnostyce układów izolacyjnych wysokiego napięcia*. Wyd. IPPT PAN, Warszawa 2001.
- [6]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME, Katowice 1998.
- [6]. Holboll J.T., Henriksen. M.: *Frequency-dependent PD pulse distortion in rotating machines*. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, June 16-19, 1996. pp. 192-196.
- [8]. Holbøll J. T., Henriksen M., Jensen A.: *Motor insulation diagnostics by high frequency PD detection*. Asnaes Power Station SK Power Company, Kalundborg, Denmark 1994.
- [9]. Hoof, M., Lanz, S.. *PD Diagnostics on Rotating Machines – Possibilities and Limitations*. Electrical Insulation Conference, Cincinnati, OH, October 26-28, 1999.
- [10]. Kane C., Pozonsky J., Carney S., Blokhintsev I.: *Advantages of Continuous Monitoring of Partial Discharges in Rotating Equipment and Switchgear*. 2003 AISE Meeting, Pittsburgh, PA, September 2003.
- [11]. Kouadria D., Ryder D. M., Miller R., Thompson A. I.: *On-site application of a computer aided system for PD measurement and interpretation in electrical machines*. 9th Intern. Conf. on Condition Monitoring and Diagnostic Engineering and Management (COMADEM), Sheffield University, UK 1996.
- [12]. Sasic M., Bertenshaw D.: *On-line Partial Discharge Monitoring on MV Motors –Case Studies on Improved Sensitivity Couplers and Interpretation Methods*, SDEMPED 2001, ITALY 1-3 September 2001 pp.1-5.
- [13]. Sasic M.: *Partial discharge measurement on rotating machines*. 9th National Congress of Electric Rotating Machinery September 29 to October 2, 1999, Veracruz, Mexico.
- [14]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Dhirani H.: *Electrical insulation for rotating machines*. IEEE PRESS series on Power Engineering, USA, 2004.
- [15]. Szymaniec S.: *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*. Studia i Monografie z. 193, Wyd. Politech. Opolskiej, Opole 2006.
- [16]. Warren V.: *Partial Discharge Testing: A Progress Report*. Iris Rotating Machinery Conference, USA, Santa Monica, June 2003, pp. 1-13.

Autor

Dr inż. Sławomir Szymaniec
 Politechnika Opolska.
 Wydział Elektrotechniki, Automatyki
 i Informatyki.
 Instytut Układów Elektromechanicznych
 i Elektroniki Przemysłowej.
 45-951 Opole ul. Luboszycka 7.
 slawszym@po.opole.pl