

Sławomir Szymaniec
Politechnika Opolska, Opole

DIAGNOSTYKA OFF-LINE STANU IZOLACJI SILNIKÓW W PRZEMYSŁE

DIAGNOSTICS OFF-LINE OF INSULATION MOTOR IN INDUSTRY

Abstract: The article presents an application of diagnostic insulation high voltage induction motor off-line in industry. The paper contains an analysis of different diagnostics methods. It the usefulness of method was has talked over was in peculiarity using measurements PI, C, DD i SV - Polarization Index Testing, Capacitance, Dielectric Discharge Testing, Step Voltage Testing, Test pulse. The examples of results of measurements state isolation interesting industrial cases were passed.

1. Wstęp

Z ekonomicznego punktu widzenia dla użytkowników silników WN najkosztowniejsze są uszkodzenia ich izolacji oraz poważne uszkodzenia fundamentów i konstrukcji wsporczych. Remont silnika, mający na celu gruntowną poprawę stanu jego izolacji, to najczęściej przezwyciężenie, co jest bardzo kosztowne. Konieczność przewijania silnika eliminuje dany napęd z cyklu produkcyjnego zakładu na kilka-kilkanaście tygodni, co dodatkowo komplikuje sytuację i wyraźnie zwiększa koszty awarii. Obniżenie kosztów eksploatacji silników jest możliwe przez prowadzenie coraz efektywniejszej ich diagnostyki w tym diagnostyki stanu izolacji off-line

2. Diagnostyka stanu izolacji silników

W latach 50-60-tych ubiegłego stulecia w statystykach przyczyn uszkodzeń maszyn elektrycznych w tym silników asynchronicznych klatkowych, uszkodzenia izolacji stanowiły nawet 85% wszystkich uszkodzeń. W miarę upływu czasu, przy intensywnym rozwoju materiałoznawstwa elektrotechnicznego, postępowi w technologii wytwarzania materiałów elektroizolacyjnych oraz w konstrukcji maszyn elektrycznych statystyka przyczyn uszkodzeń zmieniła się. Uważa się, że jakościowa zmiana w izolacji maszyn elektrycznych nastąpiła po wprowadzeniu do produkcji materiałów elektroizolacyjnych, żywic syntetycznych epoksydowo – poliestrowych [4]. W latach 70-80 uszkodzenia izolacji w dalszym ciągu dominowały ale liczbowo zbliżano się do 50%. W latach 90-tych było to już poniżej 50%. Statystyki światowe z 2004 roku podają że stojan jest w 37% przyczyną uszkodzeń maszyn elektrycz-

nych [4]. Wśród uszkodzeń stojana wymienia się w kolejności [4]:

- uszkodzenia izolacji zwojowej,
- uszkodzenie izolacji głównej,
- uszkodzenia izolacji międzyfazowej,
- uszkodzenia pakietu.

Uszkodzenia izolacji silników należą do najkosztowniejszych, koszty przezwojenia to średnio od 25% do 36% ceny nowego silnika. Eksploatując silniki elektryczne WN, należy monitorować proces starzenia się (degradacji) ich izolacji [1,2,4,5]. Należy szczególnie traktować napędy nie mające rezerwy. Napędy te są niekiedy nazywane krytycznymi, ze względu na to, że nie mają dublera. Awaria takiego napędu unieruchamia nitkę produkcyjną lub cały zakład. Koszt awarii przekracza wówczas wiele razy koszt silnika. Rzetelna ocena stanu izolacji silnika w takim napędzie jest szczególnie ważna [1].

Na podstawie diagnozy stanu izolacji można prowadzić racjonalną politykę remontową – planować i przeprowadzać remonty, przy optymalizacji kosztów w zakładzie. Silniki wspomnianych napędów krytycznych, najczęściej kieruje się do zakładów remontowych na przezwojenie, gdy stan ich izolacji umożliwia jeszcze pracę silnika. Postępuje się tak w obawie przed nieoczekiwaną awarią. Zdaniem autora błędem jest przedwczesne kierowanie silnika na przezwojenie, gdy stan izolacji umożliwia jeszcze jego pracę w czasie przewidywalnym i akceptowalnym przez służby techniczne zakładu przemysłowego. Przezwojenie silnika powinno być zaplanowane, przygotowane i we właściwym czasie przeprowadzone. Remont ten właściwie wykonany, jest gwarancją dalszej

niezawodnej pracy silnika. Pomiaru diagnostyczne stanu izolacji silnika należą do grupy najważniejszych pomiarów warunkujących bezawaryjną eksploatację napędów. Wyniki tych badań decydują o dopuszczeniu silnika do eksploatacji, warunkują jego bezpieczną eksploatację, a wcześniej na etapie produkcji silnika umożliwiają ocenę jakości uzwojenia. Badania izolacji uzwojeń silników prowadzone w oparciu o wykorzystanie najnowszej aparatury diagnostycznej w ocenie własnej należą do najtrudniejszych, najdłużej trwających i najbardziej kosztownych.

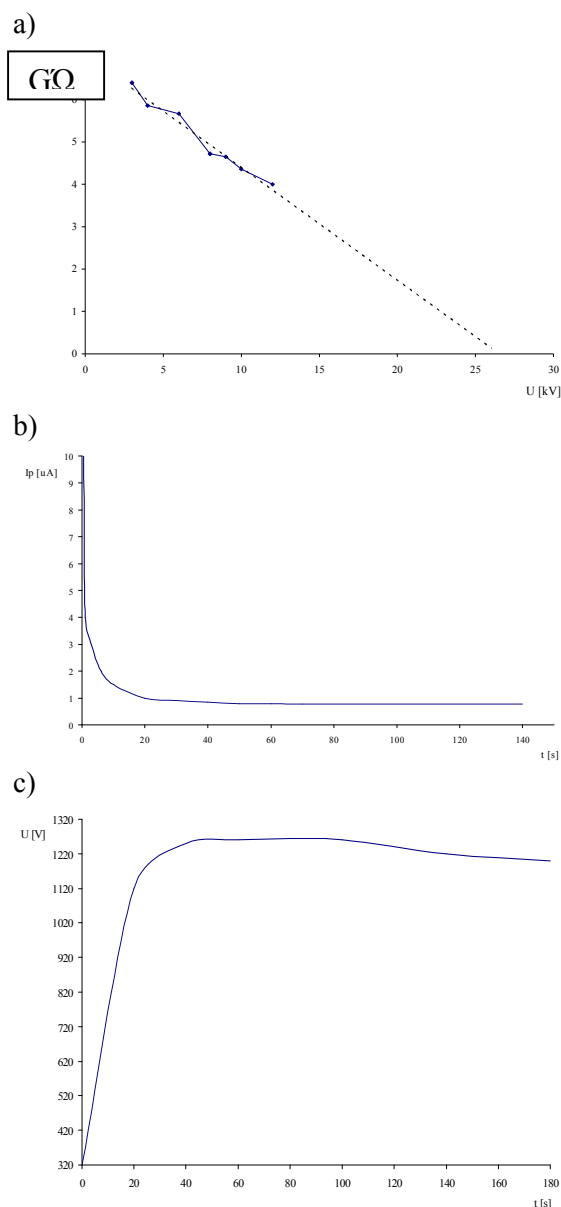
Na badania stanu izolacji silników składają się:

- ocena funkcjonalna układów izolacyjnych na etapie ich badań.
- badania stanu izolacji uzwojeń w czasie ich produkcji.
- próba napięciowa izolacji.
- badania diagnostyczne stanu izolacji off-line (poza eksploatacją).
- badania diagnostyczne stanu izolacji on-line (w czasie eksploatacji);

Przedmiotem niniejszego artykułu są: badania diagnostyczne stanu izolacji off-line (poza eksploatacją)

Badanie stanu izolacji silników w szczególności WN prowadzone poza miejscem eksploatacji (off-line) jest podstawowym badaniem określającym stan jego izolacji. Obserwując od wielu lat sposoby oceny izolacji silników w przemyśle krajowym i śledząc obszerną literaturę techniczną poświęconą temu zagadnieniu [1,2,4,5] autor usystematyzował rodzaje technik stosowanych przez oceniających stan izolacji silników indukcyjnych. Wg wiedzy autora można tu wyróżnić następujące metody:

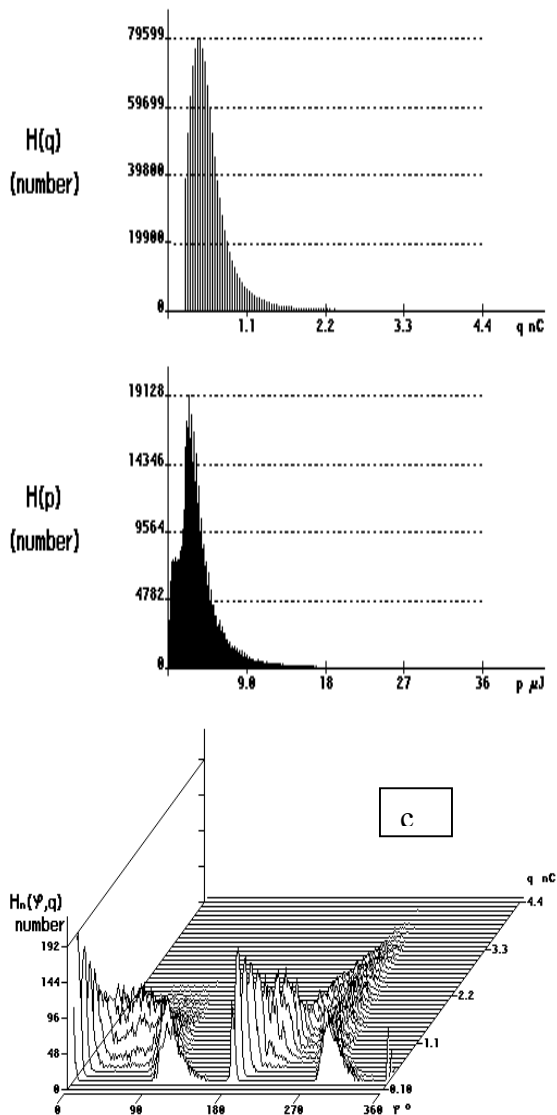
1. Ocena na podstawie pomiarów wg norm krajowych i zaleceń branżowych
2. Metoda Glinki na podstawie pomiarów napięciem stałym.
3. Wieloparametrowa metoda Wiły.
4. Metoda w oparciu o pomiary PI, C, SV, DD, test meggera.
5. Metoda uderzeń napięciowych.
6. Metoda rampy wysokonapięciowej, DC Ramp Test.
7. Metoda spektroskopii niskoczęstotliwości.
8. Ocena na podstawie pomiarów wyładowań niezupełnych – wnz.



Rys. 1. Wyniki pomiarów stanu izolacji metodą prądu stałego, silnik 320kW, 6kV, izol F.

- a) Wykres rezystancji izolacji $R_{60}=f(U)$,
- b) Przebieg czasowy $i_p=f(t)$ po skokowym załączeniu napięcia stałego na całkowicie rozładowany układ izolacyjny,
- c) Wykres odbudowy napięcia

Większość użytkowników silników indukcyjnych WN w kraju do oceny stanu izolacji tych silników stosuje wskazania norm krajowych i ewentualnie zalecenia branżowe i zakładowe [3]. W ocenie własnej coraz częściej stosowana jest metoda Glinki, test meggera oraz metoda wyładowań niezupełnych.



Rys.2. Pomiaru wzn, silnik 320kW, 6kV, izol. F, napięcie probiercze zmienne 6kV

a) charakterystyka liczby wyladowań w zależności od wielkości wyladowań $H=f(q)$, b) charakterystyka liczby wyladowań w zależności od energii wyladowań $H=f(p)$ c) charakterystyka liczby wyladowań w zależności od fazy i intensywności $H=f(\varphi, q)$

Autor od wielu lat do oceny off-line stanu izolacji silników w przemyśle stosuje wymienione wyżej metody. W niniejszym artykule przedstawione zostaną ciekawsze przypadki przemysłowe:

Przypadek nr 1.

Silnik 320kW, 6kV, izol. F badano metodą Glinki. Wyniki przedstawiono na rys.1. Na podstawie pomiarów wyznaczono następujące parametry układu izolacyjnego:

- R_{60} (dla U_N)=4615M Ω .

Z ekstrapolacji krzywej $R_{60}=f(U)$ napięcie przebicia $U_p \approx 25kV$.

- $U_p/U_N=4,16$.

- $R_{60N}/U_N=769,17$.

- Maksymalna wartość odbudowy napięcia

$U_{odmax}=1265V$.

- $U_{odmax}/U_0=0,21$.

- Czas odbudowy napięcia $t_{od}=80s$.

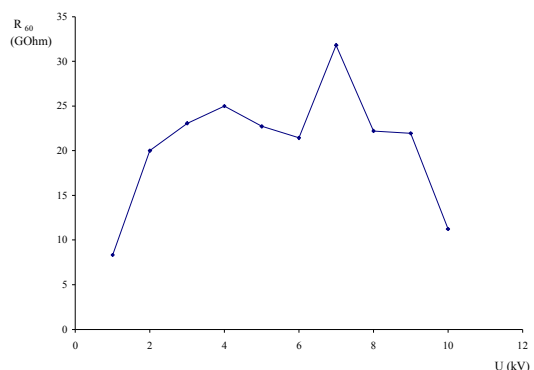
- Wahania prądu upływu $<0,5$.

- Współczynnik absorpcji $R_{60}/R_{15}=2,14$.

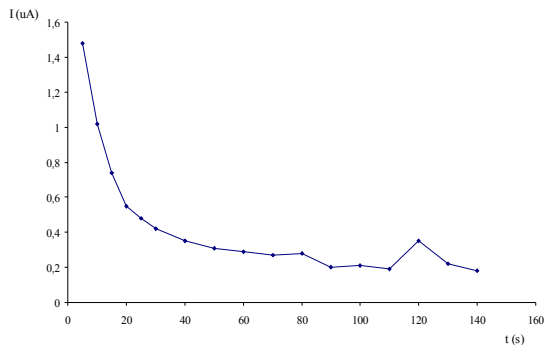
Na podstawie wykonanych pomiarów i w oparciu o kryteria metody prądu stałego stwierdzono że stan techniczny izolacji jest dobry, ocena punktowa 4, powinien niezawodnie pracować ze względu na izolację co najmniej 4 lata. Jednocześnie silnik przebadano metodą wyladowań niepełnych. Wyniki przedstawiono na rys.2. Wyniki pomiarów wzn silnika są dobre. Ładunek wyladowań jest na poziomie 2nC, a więc jest mały. Kształty charakterystyk z rys. 2 również nie budzą zastrzeżeń. Rozkład gęstości ładunku – rys. 2a przyjmuje kształt o jednym szczycie łagodnie obniżającym się. Obraz trójwymiarowy – rys. 2c prezentujący liczbę wyladowań wzn w zależności od fazy napięcia probierczego i ładunku wzn ma kształt podkowy co również jest cechą pozytywną. Silnik 320 kW którego wyniki przedstawiono na rys. 1 i 2 badany metodą Glinki i metodą wyladowań niepełnych otrzymał ocenę pozytywną, powinien niezawodnie pracować ze względu na izolację co najmniej 4 lata (prognoza w oparciu o metodę Glinki). Prognoza sprawdziła się. Przypadek nr 2.

Silnik 630kW, 6kV, izolacja F:

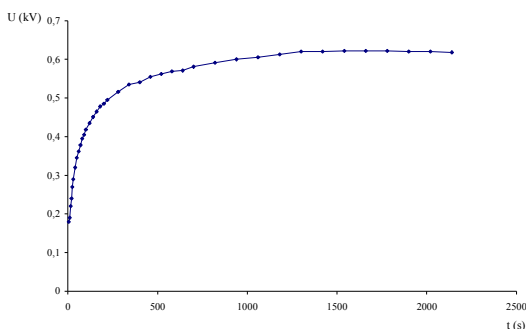
a)



b)



c)



Rys.3. Wyniki pomiarów stanu izolacji metodą prądu stałego, silnik 630kW, 6kV, izol F:

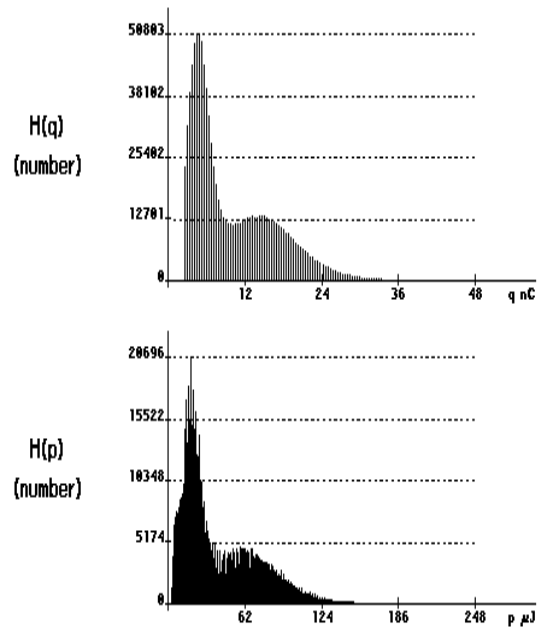
- a) wykres rezystancji izolacji $R_{60}=f(U)$,
 b) przebieg czasowy $i_p=f(t)$ po skokowym załączeniu napięcia stałego na całkowicie rozładowany układ izolacyjny,
 c) wykres odbudowy napięcia.

Na podstawie pomiarów wyznaczono następujące parametry układu izolacyjnego:

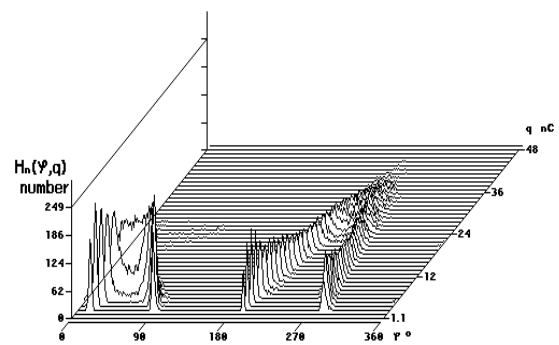
- R_{60} dla $(U_N)=21430M\Omega$.
- Z eksploatacji krzywej $R_{60}+f(U)$ napięcie $U_p=11kV$.
- $U_p/U_N > 1,83$.
- $R_{60N}/U_N=356,7$.
- Maksymalna wartość odbudowy napięcia $U_{od\ max}=620V$.
- $U_{od\ max}/U_N=0,103$.
- Czas odbudowy napięcia $t_{od}=1300s$.
- Wahania prądu upływu $< 0,5$.
- Współczynnik absorpcji $R_{60}/R_{15}=3,33$.

Na podstawie wykonanych pomiarów i w oparciu o kryteria metody prądu stałego stwierdzono, że izolacja jest zużyta – stan niedostateczny (zbyt niskie napięcie przebicia), ocena punktowa 2. Silnik przebadano również metodą wnz. Wyniki przedstawiono na rys.4 i 5. Wy-

niki pomiarów wnz wystawiają silnikowi również ocenę negatywną.



Rys.4. Pomiary wnz, silnik 630kW, 6kV, izol F, napięcie probiercze zmienne 3,9kV, rozkład liczby wyładowań w funkcji ładunku q i energii p



Rys.5. Pomiary wnz, silnik 630kW, 6kV, izol F, napięcie probiercze zmienne 3,9kV, trójwymiarowy obraz wyładowań $H_n=f(\phi, q)$, w zależności od fazy i intensywności

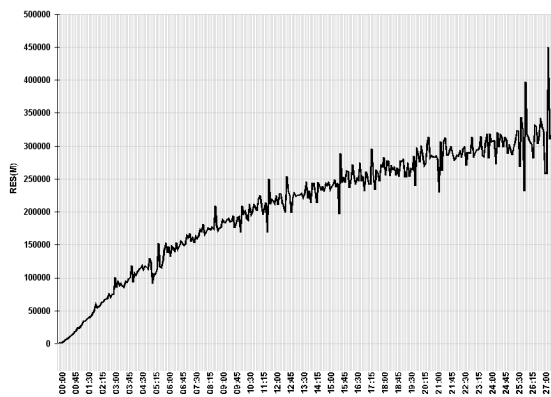
Silnik ma bardzo wysoki poziom wyładowań wnz. Już przy napięciu probierczym 3,9 kV ładunek maksymalny q_{max} osiąga bardzo wysoki poziom 48nC. Wprawdzie charakterystyki wnz mają w zasadzie kształty prawie regularne ale wysoki poziom wyładowań wnz kazał przypuszczać że izolacja silnika jest zużyta. Pomiary wnz silnika przerwano przy napięciu probierczym 3,9 kV. Ponieważ sytuacja ruchowa w zakładzie przemysłowym wymagała aby silnik pracował, silnik uruchomiono. Z ciekawości obserwowano losy silnika. Po roku eksploatacji, wyniki pomiarów stanu izolacji silnika metodą

prądu stałego były tak złe, że silnik skierowano do przezwojenia. Analizując ten przypadek można mówić o wzajemnej zbieżności wyników pomiarów metodą wnz i metodą Glinki.

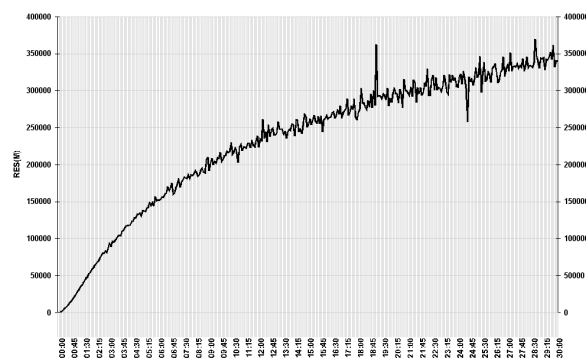
Przypadek nr 3

Silnik 1MW, 6kV, izol. F. Jest to przypadek silnika po remoncie kapitalnym, który obejmował przezwojenie stojana, technologia impregnacji próżniowo-ciśnieniowej VPI. Autor uczestniczył w odbiorze silnika po remoncie. W trakcie pomiarów rezystancji izolacji w funkcji czasu w horyzoncie czasowym 30 min zwracał uwagę fakt dużych wartości rezystancji $R_{60}=25,1G\Omega$, $R_{600}=174 G\Omega$, powolne wzrastanie rezystancji w funkcji czasu przy jednoczesnych dużych wahaniami rezystancji co było spowodowane wahaniami prądu. Analiza prądu w izolacji podczas pomiaru – rys. 6a wskazywała, że były to wahania prądu przewodzenia. Prąd ładowania pojemności zanika bowiem przed upływem 1 min, prąd absorpcji – polaryzacji wyraźnie maleje w funkcji czasu i po 10 min można mówić o jego zaniku, tym bardziej, że izolacja nie była zawilgocona ani zanieczyszczona. Po upływie 10 minut od momentu podania napięcia, w izolacji podczas pomiaru płynie prąd przewodzenia lub upływu. Zważywszy na warunki i okoliczności pomiaru mógł to być prąd przewodzenia. Autor postawił hipotezę, że przyczyną nadmiernych wahań prądu jest niecałkowite utwardzenie żywicy w impregnowanym uzwojeniu co mogło wynikać z opcji oszczędnego przeprowadzenia remontu i użycia materiałów cenowo atrakcyjniejszych ale jakościowo gorszych.

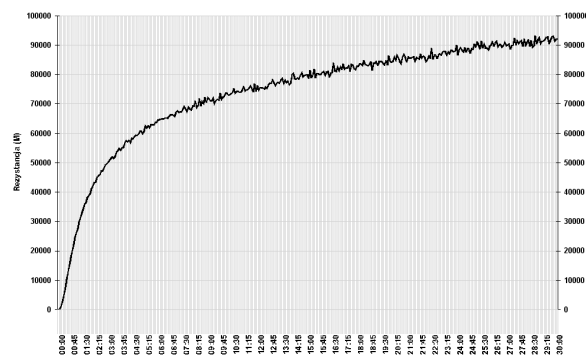
a)



b)



c)



Rys. 6. Pomiar rezystancji izolacji silnika 1 MW, 6 kV, izol. F, a) z wadliwą impregnacją, b) z impregnacją częściowo poprawioną, c) z impregnacją dobrą

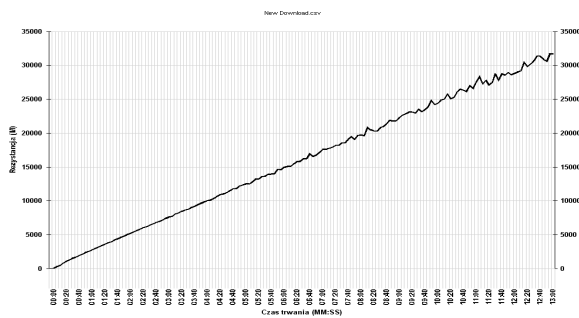
Zaproponowano dodatkowe utwardzenie żywicy w piecu (włożenie stojana do pieca). Po pierwszej fazie utwardzania; 130°C – 2 godziny wykonano pomiary kontrolne – rys. 6b widać było że wahania prądu w czasie pomiaru rezystancji w funkcji czasu $R=f(t)$ w horyzoncie czasowym 30 min zmniejszyły się w stosunku do wahań prądu przy pomiarze przed dodatkowym utwardzaniem – rys. 6a. Zdecydowano się na 2 fazę utwardzania – 150°C – 4 godziny. Pomiar kontrolny wykonany po tym zabiegu wskazał na wyraźną poprawę charakterystyki $R=f(t)$, wahania prądu wyraźnie zmniejszyły się. Jednocześnie uległy zmianie wartości rezystancji; $R_{60}=25G\Omega$, $R_{600}=72,2G\Omega$. Uznano że impregnacja uzwojeń stojana jest dobra.

Przypadek nr 4

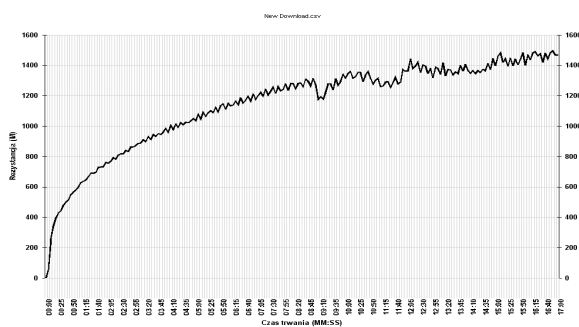
Silnik o mocy 315 kW, 400 V będący wraz ze specjalną przekładnią napędem krytycznym poddawany był przez obsługę techniczną rocznym pomiarom kontrolnym które obejmowały również ocenę stanu izolacji silnika. Ponieważ dostęp do silnika był bardzo utrudniony,

obsługa ułatwiając sobie pomiary oceniała stan izolacji silnika mierząc z rozdzielni izo-

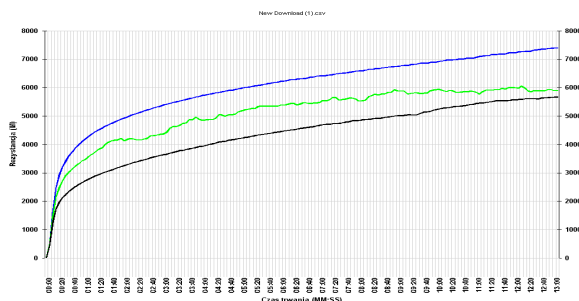
a)



b)



c)



Rys.7. Pomiary rezystancji izolacji silnika 315kW, 400V, izol F dla różnych wariantów pomiaru: a) Silnik, pomiar PI, 500V, 10min, b) Silnik + kabel, pomiar DD, 500V, 17min, c) Kable, porównanie par

-lację w układzie kabel zasilający + silnik. Interpretacja uzyskanych wyników wskazywała na wystąpienie w stosunku do poprzednich pomiarów izolacji silnika anomalii – rys. 7b. R_{60} i R_{600} zmniejszyły się, charakterystyka $R=f(t)$ wykazywała wahania, czego wcześniej nie było. Powstało przypuszczenie, że izolacja silnika uległa pogorszeniu. Autor w trakcie wyjaśniania powodów zmian w izolacji silnika zmierzył oddzielnie $R=f(t)$ dla samego silnika, dla układu silnik + kabel oraz dla samych par

kabli. Okazało się, że izolacja samego silnika jest bez zarzutu – rys. 7a. Podłączenie kabli do silnika wyraźnie pogarsza zmierzone charakterystyki izolacji – rys. 7b i wyliczone parametry, rezystancje wyraźnie maleją, pojemności rosną, zmiany R w czasie stają się niekorzystne, R waha się. Zmierzono również same kable – rys. 7c, Okazało się, że poszczególne pary w kablu znacznie się między sobą różnią. Jedna z par V2/T2 ma charakterystykę $R=f(t)$ nieregularną. Po dokładnych oględzinach okazało się, że ta para kabli jest położona najbliżej pieca na odcinku 20m. Temperatura kabli w czasie pracy pieca dochodzi nawet do 80°C . Izolacja kabli ulega systematycznej termicznej degradacji. Izolacja silnika nie budziła najmniejszych zastrzeżeń. Obsługa zmieniła sposób podejścia do pomiarów stanu izolacji silników.

3. Uwagi końcowe

Przedstawione metody oceny stanu izolacji silników off-line w pełni potwierdziły swoją przydatność w warunkach ich przemysłowej eksploatacji. Autor uważa, że najkorzystniejszym dla kompleksowej diagnostyki stanu izolacji silników off-line jest stosowanie równoczesne metody Glinki, testu Meggera oraz testu impulsowego (wykrywanie zwarc zwojowych). Z racji ograniczeń redakcyjnych nie podano przykładów zastosowań testu impulsowego.

4. Literatura

- [1]. Glinka T. *Klasyfikacja stopnia zużycia izolacji uzwojeń maszyn elektrycznych*, Wyd. BOBRME, Katowice 2004r, Zeszyty Problemowe Maszyny Elektryczne nr 68, 2004 r
- [2]. Megger *The Complete Guide to Electrical Insulation Testing*, AVO International 2001 r.
- [3]. Norma PN-98/E-04700. *Urządzenia i układy elektryczne. Wytyczne przeprowadzenia pomontażowych badań odbiorczych*.
- [4]. Stone G.C., Boulter E.A., Culbert I., Hussein Dhirani : *Electrical insulation for rotating machines*, Wiley-Interscience, USA, Canada, 2004 r.
- [5]. Subocz J.: *Wybrane zagadnienia przewodnictwa i relaksacji dielektrycznej w aspekcie diagnostyki izolacji kompozytowej*. Monografia, Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej nr 580, Instytut Elektrotechniki nr 30, Szczecin 2003.