

Adam Bartoszek, Du Pont Polska, Warszawa  
 Roland Menzel, Du Pont de Nemours, Deutschland GmbH  
 Steven Lee, Du Pont R&D and Management Co. Ltd, Korea Południowa

## PRÓBY STARZENIA MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH DLA SILNIKÓW ZASILANYCH Z FALOWNIKA

### MOTORETTE AGING TEST FOR INSULATION MATERIALS OF INVERTER-FED MOTORS

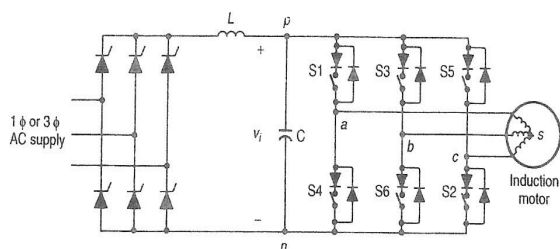
**Abstrakt:** Inverter Driven Motors (IDM) with high speed switching and advanced Pulse Width Modulation (PWM) techniques have been widely used for variable speed applications. Adjustable Speed Drives (ASD) with high speed switching devices provide very accurate control of speed and torque to a system. However, ASD give electrical stress such as high peak voltage, fast rate of voltage change ( $dV/dt$ ) and extremely high carrier frequency to the insulation materials of a motor. The degradation of electrical insulation used in Inverter Driven Motors can lead to premature failure of motors sometimes days or months after startup. This paper presents the evaluation process of insulating materials used for IDM. Thermal aging tests were carried out on motorettes with enameled wires, impregnating resin and different insulating materials. Partial Discharge Inception Voltage (PDIV) measurement and Diagnosis test, based on IEC 60034-18-41 TS, were conducted on the motorettes.

It could be demonstrated that the PDIV of the motorette decreased during aging and was very much dependent on the types of insulating materials being used.

#### 1. Zagrożenia dla silników zasilanych z falownika

##### 1.1. Silnik zasilany z falownika i naprężenie elektryczne

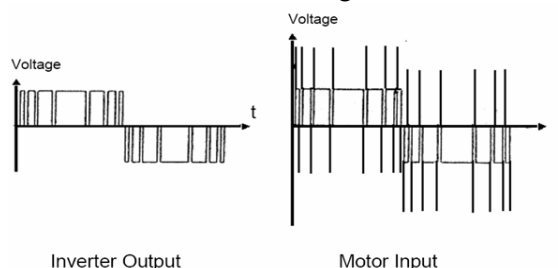
Od zawsze był duży popyt na napędy o regulowanej prędkości. W latach 50-tych ten segment był zdominowany przez silniki prądu stałego z uwagi na łatwość dostosowania napięcia prądu stałego, gdyż jedynie jedno napięcie musiało być kontrolowane w przeciwieństwie do trzech w przypadku silników prądu zmiennego (co ilustruje Rysunek 1).



Rys. 1. Schemat obwodu dla układu falownik / silnik

Jednakże silniki prądu stałego mają relatywnie niską sprawność i są skomplikowane konstrukcyjnie. Podczas ostatnich 20 lat silniki prądu zmiennego stały się coraz bardziej popularne z uwagi na ich zwartą konstrukcję, prostotę i łatwość utrzymania.

Dodatkowo, z uwagi na fakt, iż falowniki stają się tańsze i mniejsze, silniki prądu zmiennego stosowane są w wielu dziedzinach, gdzie zachodzi potrzeba regulowanej prędkości, jak również momentu obrotowego silnika.



Rys. 2. Wyjściowe przebiegi napięcia falownika i wejściowe przebiegi napięcia silnika

Mechanizm przełączający w nowoczesnym przekształtniku może dostarczyć szybkie impulsy napięciowe, z czasem narastania osiągniętym 20-100 ns i wysoką częstotliwością przełączania dochodzącą aż do 20 000 Hz. Fala odbicia z niedopasowanej impedancji oraz opóźnienia sygnału w kablu połączeniowym silnika i falownika mogą wygenerować przepięcia lub szybko narastające piki napięciowe w silniku. Jak pokazano na Rysunku 2 [1, 2], przepięcia mogą wystąpić zarówno na początku, jak i na końcu każdego impulsu. Te przepięcia powodują wysoki procent uszkodzeń izolacji w krótkim czasie.

## 1.2. Silnik zasilany z falownika i narażenia termiczne

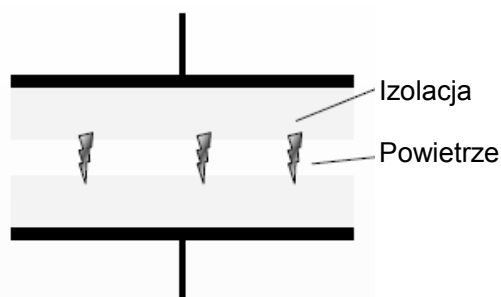
Starzenie się materiałów izolacyjnych pod wpływem temperatury jest powszechnie znane. W celu umożliwienia konstruktorom podjęcia prawidłowej decyzji w wyborze układu izolacyjnego można zastosować klasy temperaturowe zgodnie z normą IEC 60626-3. [3] Utrzymywanie temperatury silnika w wymogach klasy temperaturowej nie wpływa na problemy z żywotnością.

W połączeniu z naprężeniem elektrycznym, charakterystyka starzenia izolacji staje się jeszcze ważniejsza. Na przykład żywica impregnacyjna nie powinna pękać podczas starzenia. Izolacja giętka nie powinna się kurczyć pod wpływem niekontrolowanej straty składników lotnych w wyższych temperaturach pracy.

## 2. Wyładowania niepełne

### 2.1. Wyładowania niepełne w materiale izolacyjnym

Wyładowanie niepełne jest krótkotrwałym i miejscowym wyładowaniem o dużym natężeniu wynikającym z nieustalonych jonizacji gazowych w systemie izolacyjnym. [4, 5]. Rysunek 3 pokazuje wyładowanie niepełne w mikroprzestrzeniach powietrznych izolacji, gdy napięcie przekroczy napięcie zapłonu wyładowań niepełnych.



Rys. 3. Wyładowanie niepełne w izolacji z mikroszczelinami

Głównymi czynnikami wpływającymi na wyładowania niepełne są: napięcie, temperatura, wilgotność, geometria, grubość izolacji i czas narastania impulsu. Degradacja organicznych materiałów izolacyjnych narażonych na ciągłe napięcie powyżej napięcia zapłonu wyładowań niepełnych (Partial Discharge Inception Voltage – PDIV) jest chemiczną degradacją wynikającą z działania wyładowań. Jeśli napięcie

jest poniżej PDIV żadne przedwczesne uszkodzenie nie pojawi się (nie obserwujemy wyładowań). W silnikach elektrycznych niskiego napięcia wyróżniamy 3 główne materiały izolacyjne – izolację drutów nawojowych (np. emalia), izolację giętką, oraz żywicę / lakier impregnacyjny. Wraz ze starzeniem cieplnym materiałów izolacyjnych obecność i liczba defektów takich jak pęknięcia i mikroszczeliny może wzrosnąć. To może prowadzić do obniżenia PDIV (napięcia zapłonu wyładowań niepełnych) w systemie izolacyjnym silnika.

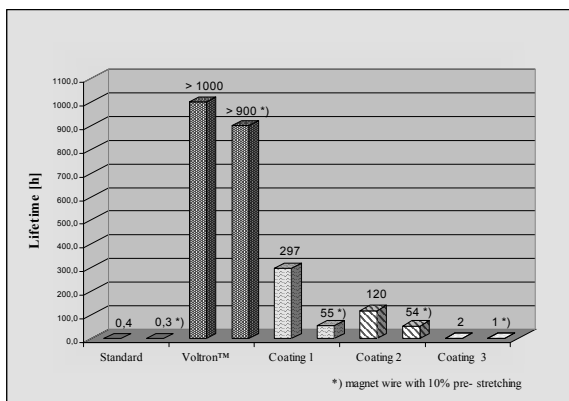
### 2.2. Przewody emaliowane

Przedwczesne uszkodzenia przez wyładowania niepełne doprowadziły do powstania wielu rodzajów emalii izolacyjnych i drutów nawojowych o podwyższonej odporności na wyładowania niepełne (np. VOLTRON™). Dotychczas najbardziej standardowym rozwiązaniem są emalie z dodatkiem wypełniaczy [6, 7, 8, 9]. Najbardziej popularnymi dodatkami są tlenki tytanu, krzemu, chromu, aluminium itp. Te działania wpłynęły na poprawę sytuacji, ale nie rozwiązały problemu. Istnieje kilka przeszkód spowodowanych tendencją do niejednorodności rozproszenia nieorganicznych cząstek stałych. Podczas uzwojowania żłobków silnika elektrycznego przewody doznają mechanicznych naprężeń i rozciągania. To powoduje znaczną redukcję żywotności drutu nawojowego podczas pracy z falownikiem (mikropęknięcia), gdy zastosowana jest emalia z wypełniaczami. Wiele firm i instytucji rozwinęło swoje własne metody mierzenia żywotności drutów nawojowych podczas występowania napięcia związanego z efektem koronowym, jednakże żaden nie został zaakceptowany jako standard międzynarodowy. Podobnie, nie ma żadnego aprobowanego testu, który określałby żywotność silnika pracującego podczas wyładowań niepełnych. Dlatego też Uniwersytet w Essen wybrał procedurę testu symulującego rzeczywiste warunki pracy. Wybrano ogólnodostępny falownik standardowo używany do silników tak, by uzyskać rzeczywiste warunki wyładowań niepełnych na próbniku. Testy zostały przeprowadzane na wiązce drutów nawojowych (twisted pairs) (zgodnie z normą DIN EN 60171, 10.1995) w piecu w temperaturze 155°C, podłączonej do falownika o częstotliwości 16 kHz, podstawowej częstotliwości 400 Hz i napięciu 1250 V (patrz rys. 4).



Rys. 4. Wyładowania niepełne na wiązce drutów. (twisted pairs)

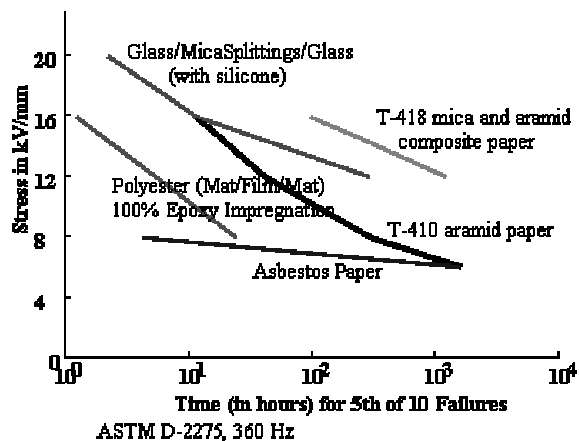
Rysunek 5 pokazuje różnice żywotności pomiędzy standardowymi drutami, a drutami o podwyższonej odporności na wyładowania niepełne (corona resistant wires). Druty o podwyższonej odporności oferują znacznie wyższe parametry odporności na efekt koronowy, jednakże większość z nich wykazuje duży spadek odporności na efekt koronowy po mechanicznym kształtowaniu drutu podczas nawijania (rozciągnięcie drutu ponad 10%).



Rys. 5. Żywotność różnych drutów nawojowych podczas pracy przekształtnika

### 2.3. Izolacja giętka

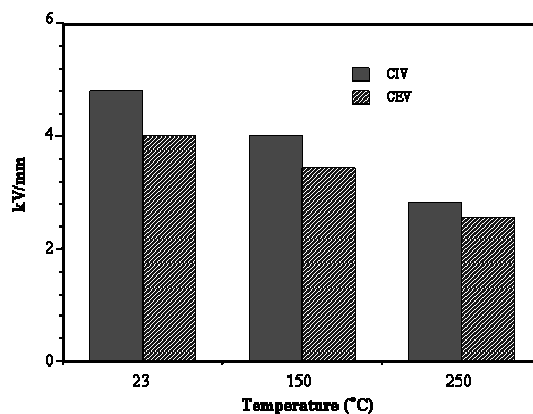
Wytrzymałość materiału izolacyjnego giętkiego na naprężenie elektryczne zależy od długości czasu działania napięcia. Wraz z przybliżaniem napięcia pracy do napięcia przebicia żywotność izolacji giętkiej maleje. Krzywe na Rysunku 6 porównują różne typy materiałów izolacyjnych podczas testu na długotrwałą wytrzymałość napięciową (voltage endurance test).



Rys. 6. Długotrwała wytrzymałość napięciowa różnych materiałów izolacyjnych

Napięcie zapłonu wyładowań niepełnych jest krytycznym punktem, w którym zaczyna występować jonizacja. Gdy zredukowane zostanie napięcie, wyładowanie niepełne w końcu gaśnie określając Napięcie Gaśnięcia Wyładowań Niepełnych (Partial Discharge Extinction Voltage – PDEV). Jeśli wyładowanie niepełne wystąpi w izolacji giętkiej poprzez osiągnięcie PDIV, wystarczy nieznacznie obniżyć napięcie by osiągnąć napięcie gaśnięcia wyładowań niepełnych PDEV.

Przykładowo, w przypadku papieru aramidowego PDEV jest o około 10-20% niższe od PDIV (Rysunek 7).



Rys. 7. Efekt koronowy - Napięcie Zapłonu (CIV) i Napięcie Gaśnięcia (CEV) dla różnych temperatur dla papieru meta-aramidowego Nomex® T410 0,25mm

Jeśli krótkotrwały udar napięciowy wywoła wyładowanie niepełne w papierze aramidowym, napięcie wejściowe powinno zmaleć poniżej PDEV by zakończyć wyładowanie. Po-

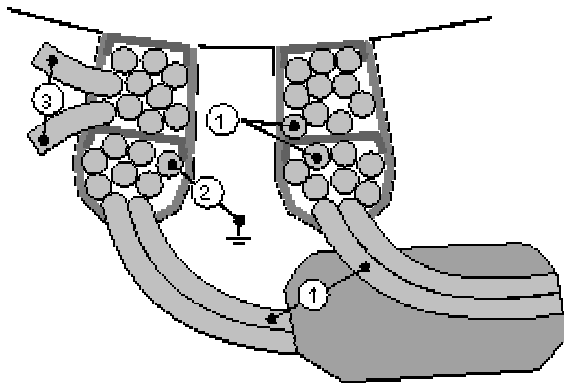
nadto odporność na występowanie wyładowania niezupełnego w papierze aramidowym maleje o około 20%, przy wzroście temperatury z 23 °C do 150 °C. Wynika z tego, że wybór izolacji giętkiej powinien być dokonany biorąc pod uwagę PDIV / PDEV, oraz spodziewaną temperaturę pracy układu izolacyjnego.

### 3. Weryfikacja różnych rozwiązań

#### 3.1. System izolacyjny i kategorie naprężeń

Dotychczas pokazano parametry elektryczne drutów nawojowych i izolacji giętkich związane z wyładowaniami niezupełnymi. Należy również określić, gdzie występuje napięcie elektryczne w silnikach niskonapięciowych, oraz jaka jest jego wielkość (gdzie potencjalnie może pojawić się źródło wyładowań niezupełnych).

Jeśli do uzwojenia dostarczony jest impuls w krótkim czasie, o znacznej wielkości, to duże napięcie elektryczne pojawi się pomiędzy fazami, między uzwojeniami, a potencjałem ziemi oraz między drutami nawojowymi tej samej fazy (Rysunek 8).



Rys. 8. Przykładowa konstrukcja uzwojenia o dużym współczynniku wypełnienia żłobka  
1 – napięcie międzyfazowe (phase to phase),  
2 – napięcie fazowe (phase to ground)  
3 – napięcie międzyzwojowe (turn to turn)

Grupa robocza IEC wyselekcjonowała kategorie grup naprężeń (pokazane w Tabeli 1) bazując na czasie i wysokości piku napięciowego i procedurze ewaluacyjnej. [10] Tabela 1 pokazuje, że impulsowy wzrost napięcia mógł wzrosnąć w ekstremalnych przypadkach do wartości 2,5 razy większej niż napięcie nominalne prądu stałego (DC bus voltage). Przy współczynniku piku napięciowego większym niż 2,5 powinny

zostać użyte dodatkowe urządzenia, takie jak filtry.

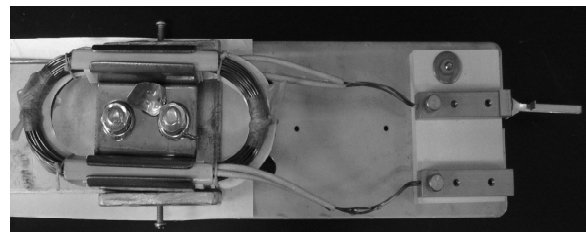
Tabela 1. Podsumowanie kategorii naprężeń elektrycznych

Kategoria naprężenia	Współczynnik wielkości piku $U_p/U_{dc}$	Czas trwania piku, $t_r$ ( $\mu s$ )
<b>A – Początkowe</b>	$\leq 1,1$	$\geq 1$
<b>B – Średnie</b>	$\leq 1,5$	$\geq 0,3$
<b>C – Dotkliwe</b>	$\leq 2,0$	$\geq 0,1$
<b>D - Ekstremalne</b>	$\leq 2,5$	$\geq 0,05$

Up : Napięcie piku, Udc : napięcie nominalne

#### 3.2. Testy na pojedynczych cewkach

Dla ewaluacji materiałów izolacyjnych dla napięć poniżej 500 V, ekstremalnych naprężeń (klasa D) i systemów klasy 155°C, pomiary wyładowań niezupełnych są przeprowadzane na pojedynczych cewkach. Rysunek 9 pokazuje testowaną cewkę, która zawiera główne materiały izolacyjne – emaliowany drut nawojowy, izolację giętką na żłobki i międzyfazową oraz żywicę impregnacyjną (Tabela 2).



Rysunek 9. Pojedyncze uzwojenie dla celów testów kwalifikacyjnych

Tabela 2. Specyfikacja materiałów izolacyjnych dla testu pojedynczego uzwojenia

#### Motorette Test Samples

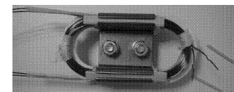
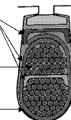
No.	Wire	Resin	Slot Insulation (Right)	Slot Insulation (Left)	Phase Ins. & Separator (Right)	Phase Ins. & Separator (Left)
1	PD resistant	UPI	DMD(0.25mm)	DMD(0.25mm)	DMD(0.3mm)	DMD(0.3mm)
2	PD resistant	UPI	NMN(0.25mm)	NMN(0.25mm)	NMN(0.3mm)	NMN(0.3mm)
3	PD resistant	UPI	T410(0.25mm)	T410(0.25mm)	T410(0.3mm)	T410(0.3mm)
4	PD resistant	UPI	T418(0.25mm)	T418(0.25mm)	T418(0.3mm)	T418(0.3mm)

#### Slot Liner, Topotic, Midstic, Phase Insulation :

-DMD ( Polyurethane based laminate)  
-NMN (m-aximide paper/PET film laminate)  
-T 410 - 100% m-Aramid paper  
-T 418 - 20% m-aximide/80% mica paper

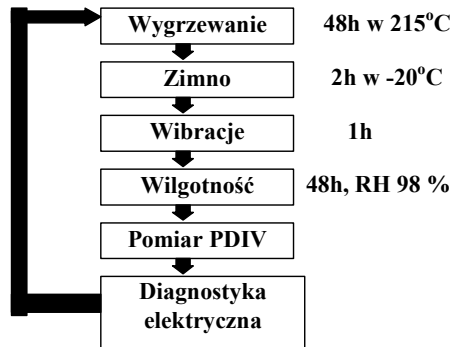
Magnetic Wire Insulation :  
- Voltzoo® (Cocoon resistance wire)

Varnish :  
- (Unstaturated Polyurethane resin - UPI)



### 3.3. Napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych po impregnacji żywicą i testach starzeniowych

Występowanie wyładowań niezupełnych na danej próbce uzwojenia jest mierzone tak, by porównać parametry przed i po impregnacji i po każdym cyklu starzeniowym tak, jak opisano na poniższym rysunku.



Rys. 10. Procedura testów próbnika (cewki)

### 3.4. Wpływ impregnacji

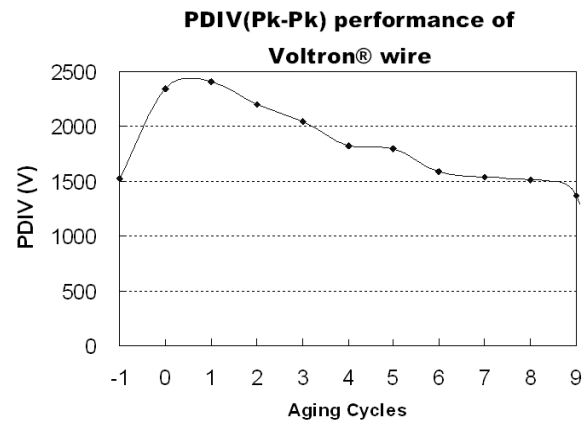
Po impregnacji żywicą, poziom PDIV w przypadku wyładowań międzyzwojowych (turn to turn) wzrasta o około 20-27%, jak pokazano na Rysunku 11. Średnia wartość PDIV w przypadku wyładowań fazowych (phase to ground) wzrasta o około 18-24% po impregnacji dla różnych materiałów (Rysunek 12). Dla wyładowań międzyfazowych (phase to phase) wartość PDIV wzrasta o 12-55% (Rysunek 13). Bazując na tych wynikach jest jasne, że żywica i proces impregnacyjny są kluczowymi czynnikami do poprawienia jakości systemu izolacyjnego w silniku zasilanym z falownika.

### 3.5. Zmiany napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych w funkcji cykli starzeniowych

Rysunki 11 – 13 pokazują również charakterystykę systemu izolacyjnego cewki po cyklu termicznym. Po znaczącej poprawie odporności na wyładowania niezupełne zaraz po impregnacji we wszystkich częściach cewki, napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych spada, z uwagi na występowanie naprężeń termicznych.

Rysunek 11 pokazuje zmianę napięcia zapłonu w izolacji między zwojami (turn to turn). To właśnie interakcja pomiędzy emalią a żywicą wpływa na PDIV wraz ze starzeniem cieplnym. Wraz ze wzrostem naprężeń termicznych wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia małych pęknięć oraz mikroszczelin (voids), co skutkuje

obniżeniem napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych.

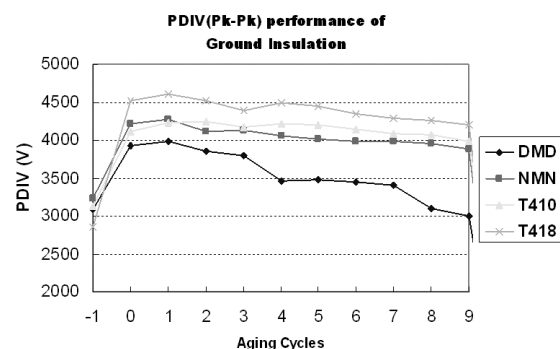


Rys. 11. PDIV turn to turn

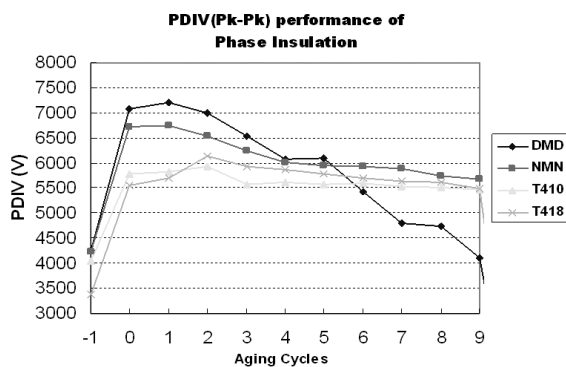
Następne 2 rysunki pokazują rozwój PDIV w żłobku cewki (coil to ground) oraz w przekładce fazowej próbnika (coil to coil). W tych obszarach istotne są dwa czynniki:

- starzenie cieplne żywicy impregnacyjnej
- starzenie cieplne izolacji warstwowej

Najslabsza termicznie badana izolacja (DMD) wykazała największy spadek napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych zarówno w przypadku testu międzyfazowego (phase to phase), jak i fazowego (phase to ground). Materiały elektroizolacyjne o niższych klasach temperaturowych starzeją się znacznie szybciej podczas naprężeń termicznych, i są zawodne w tak krytycznych aspektach, jak napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych.



Rys. 12. PDIV Phase to Ground



Rys. 13. PDIV Phase to Phase

#### 4. Podsumowanie

Starzenie termiczne materiałów organicznych często kurczy i rozkłada system izolacyjny oraz powoduje jego kruchość i łamliwość. Rezultatem tych chemicznych i mechanicznych reakcji jest wzrost mikroszczelin i pęknięć w materiale izolacyjnym. Ten proces degradacji idzie równolegle ze spadkiem napięcia zapłonu wyładowań niezupełnych, co skraca żywotność systemu izolacyjnego, jak również żywotność całego silnika.

Wybór odpowiedniego drutu nawojowego musi być bardzo dokładnie przemyślany. Z uwagi na fakt, iż PDIV w cewce jest relatywnie niskie, szansa na uszkodzenie w wyniku wyładowań niezupełnych jest relatywnie wysoka w tym obszarze. Drut odporny na wyładowania niezupełne może pomóc w wydłużeniu żywotności silnika.

Dla izolacji giętkiej, jak również żywicy impregnacyjnej jest ważne, by używać materiałów które zapewniają wyższą odporność termiczną, tak by uniknąć obniżenia napięcia zapłonu spowodowanego starzeniem się izolacji.

#### Bibliografia

- [1]. Martin Kaufhold, "Failure mechanism of the interturn insulation of Low voltage electric machines fed by pulse controlled inverters", 1995 Annual report conf. Electr. Insul. Dielectr. Phen., pp. 254-257.
- [2]. Nailen, Richard L. "Taking a New Look at Inverter-Duty Motors", Electrical Apparatus, 8/93.
- [3]. IEC 60626-3 "IEC 60626-3 Combined flexible materials for electrical insulation – Part 3: Specifications for individual materials"
- [4]. Shugg, W. Tillar, "Handbook of Electrical and Electronic Insulation Materials" Second Edition 1995, IEEE press Marketing.

[5]. Alexander, PE. (1975). "Magnet Wire Life under Voltage Stress", Proceedings of the 12<sup>th</sup> EIC. IEEE Pub No. 75 CH1014-0-EI. pp.114-118.

[6]. Yin, W., Barta, D., PCT (Patent Cooperation Treaty) International Application, WO 96/41909, (1996)

[7]. Yin, W., Bultemeier, K., Barta, D., Floryan, D., "Improved Magnet Wire for Inverter-fed Motors". Proceedings of Electrical Manufacturing & Coil Winding Association, Inc. (EMCWA) 1997, pp 379 – 382.

[8]. Keane, J.J., Pauze, D.R., United States Patent 4,537,804 (1985)

[9]. Björklund, A., Brammer, R., Paloniemi, P., Sepas, J., Svensson, G., "A New Mica-free Turn Insulation For Rotating HV Machines", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1994, pp. 482 – 484.

[10]. IEC 60034-18-41 TS "Rotating Electrical Machines : Qualification and type tests for Type I electrical insulation systems used in rotating electrical machines fed from voltage converters".