

견인전동기의 절연성능평가

박대원* · 박찬용* · 김성욱* · 길경석**

한국해양대학교 전기전자공학부

**한국해양대학교 전기전자공학부 교수

Insulation Performance Evaluation of Traction Motors

Dae-Won Park · Chan-Yong Park* · Sung-Wook Kim* · Gyung-Suk Kil***

Division of Electrical and Electronics Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요약 : 본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능 평가기준을 마련하기 위해, 전동기 고정자권선의 절연저항, 성극지수, 부분방전 전하량 및 방전개시전압을 측정하고, 그 결과를 비교·분석하였다. 회전기 절연시험 규격인 IEEE Std. 43과 IEC 60085-1에 따라 절연저항, 성극지수를 측정하였으며, 시험전압은 500V_{DC}이다. 실험결과, 기사용 전동기의 성극지수는 0.74~1.1로 IEC 60085-1에 제시된 권장기준을 만족하지 못하였다. 또한 기사용 전동기의 방전개시전압은 1,100 V, 방전전하량은 105 pC, 신품 전동기의 방전개시전압은 1,400 V, 방전전하량은 84 pC로 평가되었다. 이와 같이 절연저항, 성극지수, 방전개시전압과 전하량을 비교함으로써 견인전동기의 절연상태를 평가할 수 있었다.

핵심용어 : 하이브리드 차량, 견인전동기, 절연성능, 절연저항, 성극지수, 부분방전, 방전개시전압

ABSTRACT : In this paper, we carried out comparative measurement and analysis on insulation resistance(IR), polarization index(PI) apparent charge(q) and discharge inception voltage(DIV) of motor stators to acquire the data related to insulation evaluation of hybrid vehicle traction motors. The IR and the PI were tested according to the IEEE Std. 43 and the IEC 60085-1. Test voltage applied between a phase and the enclosure was 500V_{DC}. From the experimental results, the PI for the used motor was 0.74~1.1 which did not meet the recommendation criteria 2 for insulation level H. The q and the DIV were 105 pC at 1,100 V for the used motor, and 84 pC at 1,400 V for the new one. By comparing IR, PI, DIV and q of motor stators, we could evaluate insulation condition for the traction motors.

KEY WORDS : Hybrid vehicle, Traction motor, Insulation performance, Insulation Resistance(IR), Polarization Index(PI), Partial Discharge(PD), Discharge Inception Voltage(DIV)

1. 서 론

화석연료의 고갈에 따른 고유가 현상과 환경오염의 문제로 전기철도나 하이브리드 차량에 대한 관심이 증대되고 있으며 국내외적으로 하이브리드 차량에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 견인전동기는 전기철도나 하이브리드 차량에서 주요 동력원으로 사용되고 있다. 이러한 견인전동

기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어 운전상태의 고신뢰성이 요구된다[1]. 특히, IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)나 FET(Field Effect Transistor)와 같은 전력용 반도체 소자의 진보와 각종 제어기술의 발달에 따라 견인전동기의 가변속 제어성능이 크게 향상되었으며, 고효율 운전이 가능해졌다. 그러나 전력용 반도체 소자의 적용에 따른 과도전압의 발생은 전동기의 고정자권선에

* dwpark77@hhu.ac.kr,

cypark77@hhu.ac.kr,

p5375@hhu.ac.kr

** kilgs@hhu.ac.kr 051)410-4414

불규칙적인 전압분포를 야기시켜 최종적으로 견인전동기의 절연과피를 초래할 수 있다[2]-[5]. 절연은 기기의 수명과 직접적으로 관련이 있으며, 절연성능을 평가하기 위해서는 기기에 대한 정확한 절연열화기구를 이해하고 상황에 가장 적합한 절연평가가 이루어져야 한다. 절연성능을 평가하는 방법에는 절연저항시험, 직류전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 있으며, 그 중 내전압시험 및 서지시험은 피시험체에 비교적 높은 전압을 인가하므로 절연물의 성능저하를 초래하게 된다. 따라서 시험 전압을 가능한 낮게 설정하여 피시험기구의 절연성능에 영향을 주지 않으면서 효과적으로 평가할 수 있는 방법이 요구되고 있다[6]-[8]. 본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능을 평가하기 위하여 기사용 전동기와 신품 전동기를 대상으로 절연저항(Insulation Resistance, IR)과 성극지수(Polarization Index, PI)를 측정하고 회전기구의 절연에 대한 규격인 IEEE Std. 43 및 IEC 60085-1에 의거하여 절연상태를 분석하였으며 방전개시전압과 전하량을 측정하여 비교함으로써 견인전동기의 절연상태를 평가하였다.

2. 절연성능평가

2.1 절연저항에 의한 절연평가기준

일반적으로 절연저항은 피시험체에 직류전압을 인가하여 누설전류를 측정함으로써 계산된다. 인가되는 시험전압은 피시험체의 정격전압에 따라 달라지며 피시험체의 전기적인 사양을 파악하는 것이 중요하다. 절연저항 측정시 사용되는 시험전압을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Voltage to be applied during insulation resistance test

정격전압[V]	시험전압[V]
<1,000	500
1,000~2,500	500~1,000
2,501~5,000	1,000~2,500
5,001~12,000	2,500~5,000
>12,000	5,000~10,000

절연저항 IR 은 시험전압 E 와 누설전류 I_l 로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$IR = \frac{E}{I_l} \quad [\Omega] \quad (1)$$

그러나 누설전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 달라지

며 시간에 따라 변하기 때문에 단편적인 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 판단하기 어렵다. Fig. 1에 나타난 것과 같이 건전한 고체절연물에서는 누설전류가 극히 미소하며 흡수전류가 감소하기 때문에 절연저항은 시간에 따라 초기에는 급격히 상승하고 시간에 따라 증가하지만 열화 또는 오손된 상태에서는 시간에 따른 절연저항의 상승비율이 급격히 감소하게 된다.

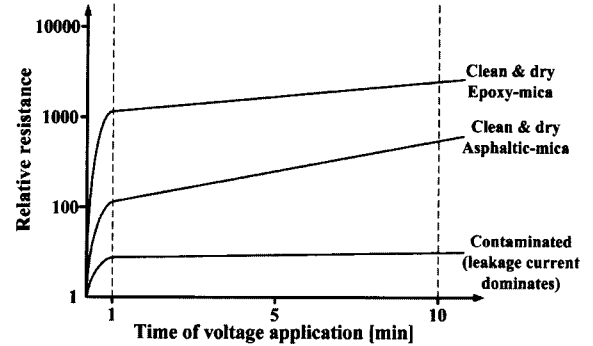


Fig. 1 Changes of insulation resistance as a function of voltage application time(IEEE Std. 43)

이러한 누설전류 또는 절연저항의 시간변화를 나타내는 지표로서 성극지수가 사용되며 이를 이용하여 절연물의 상태를 판정한다. 성극지수는 1분 후의 절연저항 IR_1 과 10분 후의 절연저항 IR_{10} 의 비로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 IEC 60085-1에 규정하고 있는 절연등급에 따른 최소 성극지수를 Table 2에 나타내었다[9][10].

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \quad (2)$$

Table 2 Recommended minimum values of polarization index

절연등급	최소 성극지수
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

2.2 부분방전측정에 의한 절연평가방법

부분방전검출은 열화에 의한 크랙이나 박리 등의 공극의 발생, 열화의 진행정도를 파악하여 절연수명을 추정할 수 있으며 비파괴 시험으로서 피시험체의 절연성능에 영향을 주지 않아 효과적인 절연평가가 가능하다. 일반적으로 부분방전 신호는 상승시간이 수 ~ 수십 ns 정도의 고주파 펄스형태로 발생

하기 때문에 이를 검출하기 위해서는 Fig. 2와 같이 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하다[11][12].

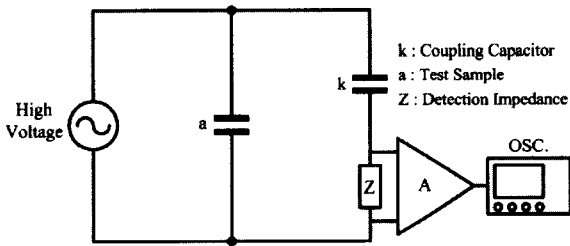


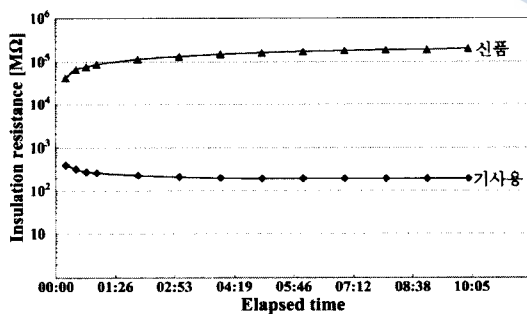
Fig. 2 Coupling network

시료 a에서 발생된 부분방전 신호 검출을 위하여 결합회로를 구성하고 피시험기와 페루프를 형성하게 함으로서 검출임피던스에 의해 부분방전신호를 검출할 수 있다.

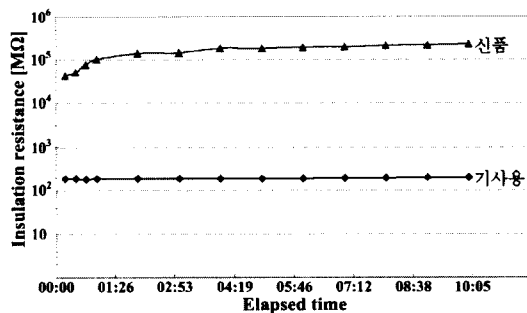
3. 측정 및 분석

3.1 절연저항 및 성극지수의 측정

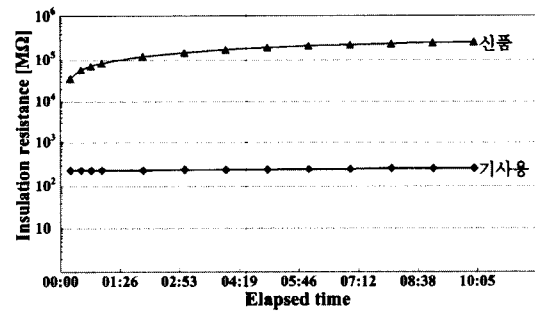
본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능을 평가하기 위하여 기사용품과 신품 견인전동기를 대상으로 절연저항 및 성극지수를 측정하였다. 견인전동기는 절연등급 H종, 정격전압이 400 V이므로 IEEE Std. 43에 의거하여 각 상(U, V, W)과 외함에 전압 500 V_{DC}를 인가하여 10분 동안 절연저항을 측정하였으며 측정결과를 Fig. 3에 나타내었다.



(a) Insulation resistance(U-Frame)



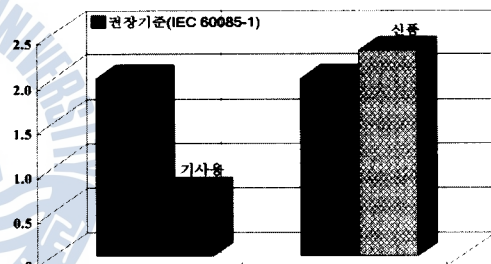
(b) Insulation resistance(V-Frame)



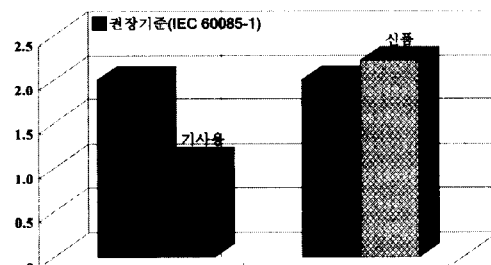
(c) Insulation resistance(W-Frame)

Fig. 3 Result of insulation resistance measurement

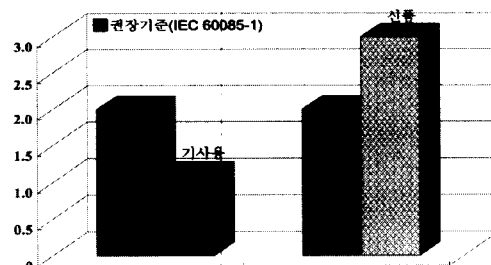
절연저항의 측정결과, 기사용 전동기에서는 10분 동안 절연저항이 감소 또는 유지하였으나 신품전동기에서는 기사용 전동기와 비교하여 인가시간동안 절연저항이 증가하는 추세를 나타내었다. 또한 성극지수를 측정하여 절연저항의 시간변화와 비교하였으며 IEC 60085-1에 제시된 절연등급별 권장기준을 이용하여 절연상태를 평가하였다[10]. 성극지수의 측정결과를 Fig. 4와 같다.



(a) Polarization index(U-Frame)



(b) Polarization index(V-Frame)



(c) Polarization index(W-Frame)

Fig. 4 Result of polarization index

성극지수의 측정결과, 기사용 전동기에서는 U, V, W상에서 각각 0.74, 1.08, 1.1 로 최소 권장기준에 미달하는 결과를 나타냈으며 신폴 전동기에서는 U, V, W상에서 2.31, 2.22, 3.0로 2 이상의 성극지수가 측정되어 절연상태가 양호한 것으로 나타났다.

3.2 부분방전 측정

본 논문에서는 견인전동기의 부분방전 전하량과 방전개시 전압을 측정하고 절연저항 및 성극지수의 측정결과와 비교하기 위하여 Fig. 2와 같이 결합회로망을 구성하였다. 결합회로망은 정현파 입력신호에 대한 출력신호의 비로 주파수특성을 평가하였으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

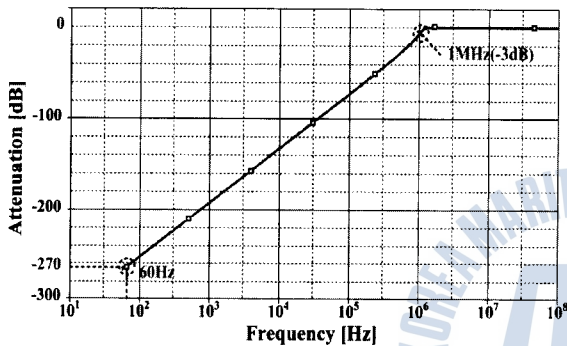


Fig. 5 Frequency response of coupling network

결합회로망은 60 Hz 상용주파수 전압을 -270 dB로 감쇄시키며, -3 dB가 되는 차단주파수는 1 MHz로 부분방전 신호를 검출할 수 있는 특성을 갖는다. 부분방전신호는 크기가 매우 작아 외부 노이즈의 영향을 받기 쉬우므로 외부잡음의 영향을 최소화 하기위해 측정회로를 차폐함 내에 설치하였다. 또한 미소 부분방전 신호를 증폭하기 위해 주파수 범위 DC~420 MHz인 연산증폭기를 사용하여 Fig. 6과 같이 2단 증폭회로를 설계·제작하였다.

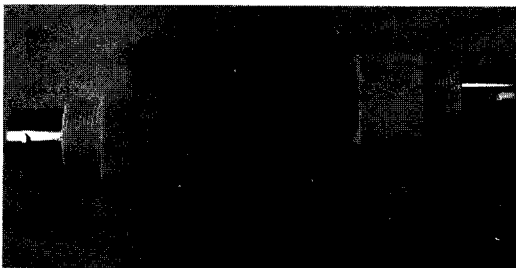


Fig. 6 The prototype amplifier

증폭회로의 주파수응답은 신호발생기를 이용하여 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로서 평가하였다. 증폭회로는 40 dB의 이득을 가지며, -3 dB의 주파수 대역은 100 kHz~30 MHz로 결합회로망에서 전달된 부분방전 펄스를 감쇄없이 증

폭시킬 수 있는 특성이다.

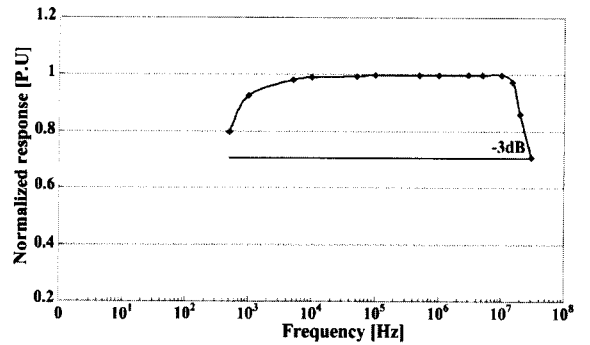
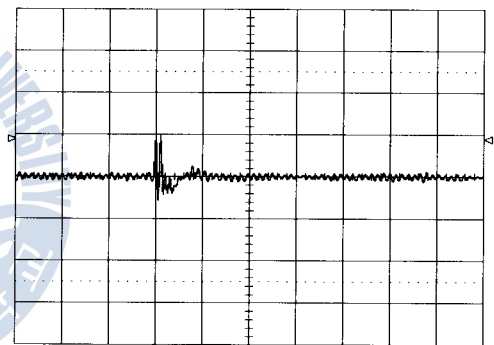


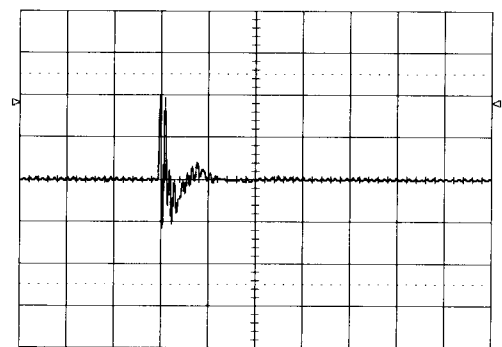
Fig. 7 Frequency response of the prototype amplifier

측정시스템의 감도를 산출하기 위하여 전용의 교정기 CAL 1A(Power Diagnostix, 1 pC~100 pC)를 이용하여 교정실험을 수행하였으며, Fig. 8에 교정펄스에 대한 측정시스템의 출력파형을 나타내었다.



[200 mV/div, 500 ns/div]

(a) 10 [pC]



[500 mV/div, 500 ns/div]

(b) 50 [pC]

Fig. 8 Typical waveforms of calibration pulse

교정실험결과를 Table 3에 나타내었다. 측정시스템은 10 pC에서 100 pC까지 선형적인 출력특성을 나타내었으며, 측정감도는 약 19 mV/pC로 산출되었다.

Table 3 Calibration results

Applied Charge [pC]	Output voltage [mV]	Sensitivity [mV/pC]
10	197	19.7
20	386	19.3
50	938	18.9
100	1,890	18.9

부분방전 측정시스템을 이용하여 Fig. 9와 같이 실험계를 구성하였으며 하이브리드 차량용 견인전동기(3상 400 V 52마력)에서 부분방전을 측정하였다.

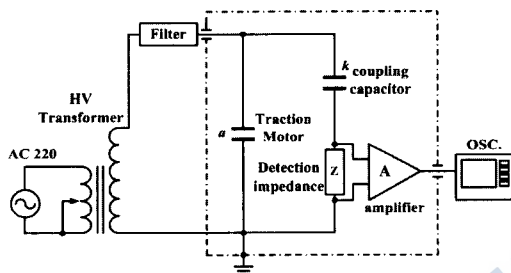
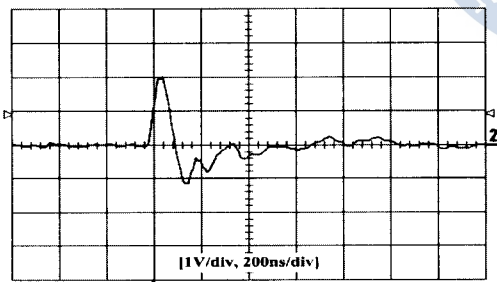
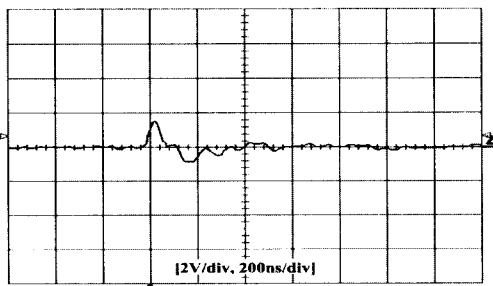


Fig. 9 Configuration of the experimental apparatus

기사용 전동기와 신품 전동기의 고정자 권선과 외함간에 고전압 변압기(220 V/5 kV)를 연결하고, 전압을 서서히 증가시키면서 부분방전을 측정하였으며 인가전압에 따른 부분방전과형의 예를 Fig. 10에 나타내었다.



(a) Used motor



(b) New motor

Fig. 10 Typical waveforms of PD pulse

기사용 전동기의 방전개시전압은 1,100 V이었으며, 이때의

방전펄스의 크기는 $2 V_{max}$ 로 이는 105 pC에 해당한다. 신품 전동기에서 방전개시전압은 1,400 V, 부분방전 전하량은 84 pC에 해당하는 $1.6 V_{max}$ 가 측정되었다.

실험결과, 기사용 전동기는 신품 전동기와 비교하여 상대적으로 낮은 방전개시전압이 측정되었으며 방전전하량은 크게 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능을 평가하기 위해 기사용 및 신품 전동기를 대상으로 시간에 따른 절연저항의 변화와 성극지수를 측정하고 부분방전 측정결과와 비교·분석하였다. 절연저항 및 성극지수의 측정은 IEEE Std. 43 및 IEC 60085-1에 따라 견인전동기의 각 상과 외함 사이에 시험전압 500 V_{DC}를 인가하여 수행하였다. 인가시간에 따른 절연저항의 측정결과, 기사용 전동기에서는 200~300 MΩ 정도로 측정되었으며 신품 전동기에서는 수 GΩ 이상의 높은 절연저항이 측정되었다. 그러나 절연저항은 피시험체의 크기나 구조에 따라 다르게 나타나므로 단순히 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 평가하기 어렵다. 따라서 시간에 따른 절연저항의 변화 및 성극지수를 측정하여 전동기의 절연상태를 평가하였다. 기사용 전동기에서는 절연저항이 감소 또는 유지하는 특성을 나타낸 반면 신품 전동기에서는 시간에 따라 증가하는 특성을 나타내었다. 측정된 절연저항을 이용하여 성극지수를 계산한 결과, 기사용 전동기는 0.74~1.1로 나타나 IEC 60085-1에 제시된 권장 성극지수에 미달하였지만 신품 전동기에서는 2.2~3.0으로 권장기준을 만족하는 결과를 나타내었다. 또한 부분방전 전하량과 방전개시전압을 측정하여 절연저항 및 성극지수의 측정결과를 비교하였다. 기사용 전동기에서는 1,100 V의 전압에서 105 pC의 전하량이 검출되었고, 신품 전동기에서는 방전개시전압이 1,400 V, 방전전하량이 84 pC로 측정되었다.

실험결과, 기사용 전동기는 신품 전동기와 비교하여 절연상태가 좋지 못한 것으로 나타났으며 절연저항, 성극지수 및 방전개시전압 및 부분방전 전하량을 측정함으로써 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능을 비교·평가할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 길경석, 송재용, 서황동, 김용주, 강동식, 황돈하, "저압유도 전동기에서 미소부분방전 측정에 관한 연구", 한국전기전자재료학회 논문지, 제18권, 제10호, pp.960-964, 2005.
- [2] H. A. Toliyat, G. Suresh, A. Abur, "Simulation of Voltage Stress on the Inverter Fed Induction Motor Winding Supplied Through Feeder Cable", Industry Application Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, Vol. 1, pp.143-150, 1997.

- [3] L. Gubbala, A. Von Jouanne, P. N. Enjeti, C. Singh, H. A. Toliyat, "Voltage Distribution in the Windings of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages", Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC '95, 26th Annual IEEE, Vol. 1, pp.579-585, 1995.
- [4] Christopher J. Melhorn, Le Tang, "Transients Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp.1065-1072, 1997.
- [5] E. Persson, "Transient effects in application of PWM inverters to induction motors", IEEE Trans on IAS, Vol.28, pp.1095-1101, 1992.
- [6] A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, and G. C. Montanari, "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.3, p.527, 2003.
- [7] R. C. ndela, G. Mrelli and R. Schifani (2000), "PD Recognition by Means of Statical and Fractal Parameters and a Neural Network" IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, pp.87-94, 2000.
- [8] G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid, "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.567-577, 1995.
- [9] IEEE 60043, IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, pp.7-18, 2000.
- [10] IEC 60085-1, Thermal evaluation and classification of electrical Insulation, pp.5-29, 1984.
- [11] F. H. Kreuger, "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", p.129, 1989.
- [12] IEC Publication 60270, High-voltage test techniques-Partial discharge measurement, 2000.

원고접수일 : 2008년 12월 30일

원고채택일 : 2009년 01월 05일