

# 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 함침기법에 따른 절연성능 평가

論 文  
55C-7-8

## Evaluation of Insulation Performance on Stator Windings of Inverter-Fed Induction Motor According to Impregnation Techniques

黃 敦 夏<sup>†</sup> · 姜 東 植<sup>\*</sup> · 金 容 柱<sup>\*\*</sup> · 李 仁 佑<sup>\*\*\*</sup> · 具 滋 允<sup>§</sup> · 金 東 熙<sup>§§</sup> · 李 廣 植<sup>§§</sup>

(Don-Ha Hwang · Dong-Sik Kang · Yong-Joo Kim · In-Woo Lee · Ja-Yoon Koo · Dong-Hee Kim · Kwang-Sik Lee)

**Abstract** - The low-voltage induction motors have been widely driven by IGBT PWM inverters, ever since it was used to apply variable speed drives. Recently, the insulation failures of the stator windings become critical problems due to the high ratio of dv/dt in IGBT PWM inverters. In this paper, the detailed insulation tests on the IGBT PWM inverter fed induction motor are carried out. Five different types of insulation techniques are used to 25 induction motors. The change of the insulation characteristics such as partial discharge, AC current, capacitance, and dissipation factor are compared, respectively. In addition, insulation breakdown tests using the high voltage pulse are performed, and corresponding breakdown voltages are analyzed.

**Key Words** : 유도전동기, 고정자 권선, IGBT PWM 인버터, 부분방전, 절연파괴

### 1. 서 론

전력용 스위칭 소자의 급격한 발달에 의해 고주파 스위칭 운전이 가능해짐에 따라 광범위하고 연속적인 속도제어가 가능하고, 전력절감 효과가 큰 가변속 유도전동기 시스템에 사용되는 PWM 인버터의 성능이 크게 향상되었다. 그러나 고속 스위칭 속도와 더불어 향상된 PWM 기법이 인버터 구동 유도전동기의 성능을 크게 향상시킨 반면에, 짧은 상승시간에 의한 높은 전압상승율(dv/dt)이 전동기 고정자 권선의 절연에 치명적인 손상을 가져오는 것이 최근 큰 문제점으로 대두되고 있다. 특히, 고효율 운전과 20 [kHz]대의 고속 스위칭이 가능한 IGBT 소자를 사용한 PWM 인버터에 의해 구동되는 유도전동기 고정자 권선의 절연파괴 사고에 대한 위험이 크게 증가하고 있다[1-4].

유도전동기 구동 시스템에 IGBT PWM 인버터를 채용함으로써 나타나게 된 절연파괴 문제를 해결하기 위하여, 과도 써지전압을 억제하기 위한 필터 및 리액터 설계[5],[6], 절연내력이 강화된 마그네트 전선의 채용[7], 고정자 절연 시스템의 등급 향상[2],[8] 등에 관한 연구가 많이 이루어져 왔다. 그러나 대부분의 방법이 전동기 제작 및 설치시의 경비를

를 크게 증가시키게 되고, 아직까지 완전한 해결방법은 제시되지 못하고 있다. 특히, 유도전동기의 제작시 매우 중요한 절연절개, 함침기법 및 절연특성에 관한 연구결과는 많이 공개되지 않고 있다.

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동용 유도전동기의 고정자 권선에 대한 상세한 절연특성 분석결과를 제시한다. 동일한 마그네트 전선을 사용하여 함침횟수와 함침방법을 5가지 방법으로 다르게 제작한 5 [HP], 380 [V]급 저압 유도전동기 고정자 25대를 대상으로 한 절연특성 시험과 절연내력 평가결과를 제시한다. 각각의 전동기별로 교류전류 및 유전정접 시험을 수행하여 교류전류 변화율( $\Delta I$ ), 유전정접 변화율( $\Delta \tan \delta$ ) 및 정전용량 증가율( $\Delta C/Co$ )을 산출하고, 부분방전 시험을 통한 최대 부분방전 크기( $Q_m$ )와 부분방전 개시전압(DIV; Discharge Inception Voltage)을 구하여 절연기법에 따른 절연특성을 상세히 분석하였다. 또한, 전압상승율(dv/dt)이 실제 인버터에서와 동일한 써지파형에 의한 펄스 절연파괴 시험을 수행하여 함침방법에 따른 고정자 권선의 절연파괴 전압을 비교하였다. 이를 통하여 인버터 구동용 유도전동기의 절연내력을 향상시킬 수 있는 효과적인 절연기법을 제안한다.

### 2. IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템

#### 2.1 고정자 권선의 절연시스템과 부분방전 발생

유도전동기 고정자 권선의 절연 시스템은 주절연(main), 상절연(phase) 및 턴절연(turn insulation)으로 구성되어 있고, 코일 내부의 인접한 Turn간의 턴절연은 그림 1과 같이 에나멜 전선(magnet wire)과 함침레진(impregnating resin) 또는 바니쉬(dielectric varnish)로 이루어져 있다. 저압 유도전동기는 Random-wound 권선 방식이 일반적이고, 용량이 커지게 되면 몇 개의 전선을 묶어 코일을 병렬로 감기 때문

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 先任研究員 · 工博  
E-mail : dhhwang@keri.re.kr

\* 正會員 : 韓國電氣研究院 電力設備診斷研究그룹 그룹장 · 工博

\*\* 正會員 : 韓國電氣研究院 融合技術研究團 團長 · 工博

\*\*\* 正會員 : (株)曉星 重工業研究所 回轉機팀 팀장

§ 正會員 : 漢陽大 工大 電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

§§ 正會員 : 嶺南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2006年 4月 11日

最終完了 : 2006年 5月 16日

에, 1개 코일의 처음과 마지막 턴이 인접하게 배치될 가능성이 가장 크다. 따라서 전체 코일전압이 인접한 2개의 전선 사이 및 미소공극(void)에 걸리게 되어 전기적 스트레스가 가장 크게 나타나고, 가혹한 상태에서는 턴절연이 다층코일 또는 코일그룹 전체에 걸리는 것보다 더 큰 전압강하를 받을 수도 있다. 고정자 권선에 걸리는 전압이 부분방전 개시 전압을 초과하게 되면, 전선 사이의 미소공간이나 바나쉬 절연물 내의 미소공극 등의 전계가 집중하는 곳에서 부분방전이 발생하여 국부적인 절연파괴 또는 이온화를 촉진시킴으로서 절연열화가 진행되고, 결국에는 턴간, 상간 또는 상-대지간의 절연파괴로 진전된다[1],[3],[4].

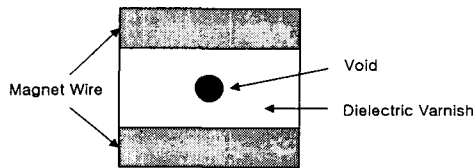


그림 1 고정자 권선에서의 부분방전 발생위치  
Fig. 1 The place of partial discharge occurrence

2.2 인버터 구동 유도전동기 시스템

산업설비의 가변속 드라이브에 채용되는 일반적인 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 구성도와 각 부분에서의 전압파형을 그림 2와 그림 3에 각각 나타내었다. 그림 3 (a)의 3상 교류전원( $V_{RS}$ )이 입력되어 다이오드 정류기와 DC Link단에 의해 그림 3 (b)의 DC Bus 전압( $U_D$ )이 생성되고, IGBT PWM 인버터의 출력전압( $E_{ab}$ )은 그림 3 (c)와 같이 되지만, 실제 유도전동기의 입력단자에는 그림 3 (d)와 같은 DC Bus 전압보다 매우 큰 써지전압 형태의 과도전압( $V_{ab}$ )이 인가된다.

IGBT PWM 인버터의 고속 스위칭시 발생하는 상승시간이 짧고 매우 큰 전압상승률을 가지는 그림 3 (d)의 스위칭 과도전압으로 인하여 2 pu 이상의 써지전압이 전동기 단자에 인가되고, 이러한 스위칭 과도전압은 고정자 권선의 절연내력을 급격히 저하시키게 된다. 특히, 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이가 긴 경우에는 인버터 출력단과 전동기 입력단 사이의 임피던스 비정합에 의해 발생하는 반사전압으로 인하여 전동기의 단자전압이 더욱 상승하므로 조기 절연파괴 사고가 유발될 가능성이 매우 높다[1],[2],[9].

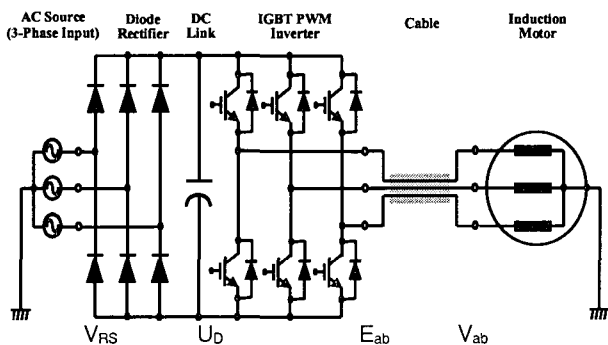
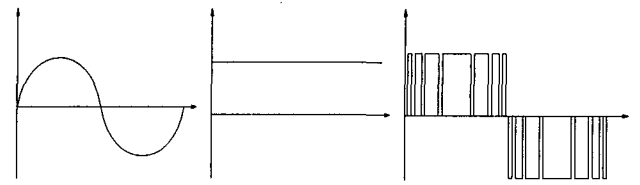
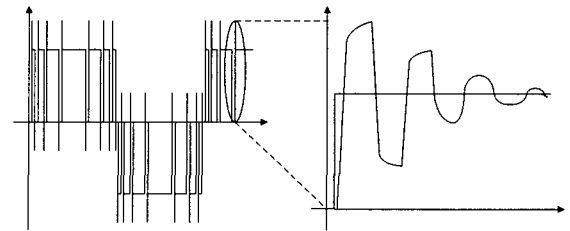


그림 2 IGBT PWM 인버터로 구동되는 유도전동기의 구성  
Fig. 2 Configuration of induction motor system driven by IGBT PWM inverter



(a) 입력전압 VRS (b) DC Link 전압 UD (c) 인버터 출력전압 Eab  
(a) Input voltage (b) DC link voltage (c) Inverter output voltage



(d) 전동기 단자전압 Vab  
(d) Motor terminal voltage

그림 3 인버터 구동 유도전동기 시스템의 전압파형  
Fig. 3 Voltage waveforms of the inverter driven induction motor system

3. 실험방법

3.1 유도전동기의 사양과 절연방식

인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에 대한 함침방법에 따른 절연성능을 비교하기 위하여 표 1과 같이 절연기법을 다르게 하여 총 25개의 유도전동기 고정자를 제작하였다. 전동기의 사양은 3상, 4극, 380 [V], 5 HP (3.7 kW)이고, 절연등급은 최고 허용온도가 155 [°C]인 F종 절연을 채택하였고, 절연물은 Nomex를 사용하였다. 절연처리 방식에 따른 특성비교를 위해서 함침횟수를 다르게 하였고, 권선의 함침방법을 Varnish dipping의 표준함침(Standard impregnation; SI)과 진공가압 함침(Vacuum pressure impregnation; VPI)의 2종류로 제작하였다.

표 1 유도전동기의 사양  
Table 1 Specifications of the induction motors

함침방법	함침횟수	전동기 기호	갯수
표준함침 (SI)	1	S1#1 ~ S1#5	5
	2	S2#1 ~ S2#5	5
	3	S3#1 ~ S3#5	5
진공가압 함침 (VPI)	1	V1#1 ~ V1#5	5
	2	V2#1 ~ V2#5	5

고정자 권선에 사용된 Enamel wire는 도체 외경이 0.9 [mm]의 Polyester enameled wire (PEW)인 1종 에나멜선으로서 표준 절연두께가 0.066 [mm]이다. 그리고 슬롯내의 주 절연은 T0.25인 Mylar-Nomex-Mylar 소재의 Slot Cell과 Nomex-Mylar-Nomex 소재의 Top Wedge 및 T0.3 Dacron-Mylar-Dacron의 Phase Insulation으로 구성되었다.

### 3.2 교류전류 시험방법

교류전류 시험은 절연물에 교류전압을 인가했을 때 흐르는 전류(I)와 전압(V)과의 관계로부터 절연상태를 평가하기 위한 시험이다[9]. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례해서 충전전류가 증가하고, 이때 절연층 내에 미소공극(void) 등의 결함이 존재하여 부분방전이 발생하면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가하여 그림 4와 같이 전류가 급증하게 된다. 이러한 전류급증 전압 및 전류 급증율로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도, 또는 부분방전 발생상황 등을 알 수 있다. 교류전류 시험에서의 절연특성 분석을 위한 파라메타는 다음 식에 따라 정의되는 전류증가율( $\Delta I$ )을 사용한다.

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100 [\%]$$

여기서, I : 정격(단자)전압(E) 인가시 흐르는 전류

$I_0$  : 전류가 직선적으로 증가한다고 가정한 경우 정격전압에서의 전류

본 연구에서는 교류전류 시험을 위해 Tettex Instruments사의 Automatic Insulation Test System (Type 5283)을 사용하였고, 전동기 고정자 권선의 입력단자와 대지 간에 전압을 인가하여 전압상승에 따른 전류의 변화상태를 측정하여 교류전류 변화율( $\Delta I$ )을 산출하였다.

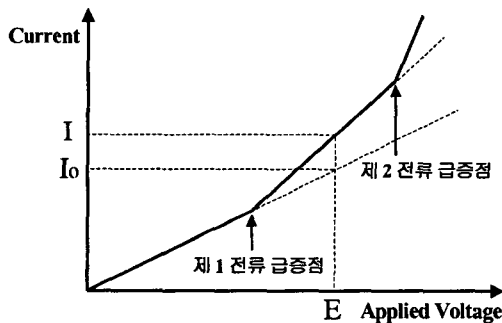


그림 4 교류 전류-전압 (I-V) 특성

Fig. 4 AC current-voltage (I-V) characteristics

### 3.3 유전정점 및 정전용량 시험방법

유전체 절연물에 교류전계를 가하면 일반적으로 누설전류, 유전분극, 부분방전 등에 의한 유전손(dielectric loss)이라는 에너지 손실이 발생하고, 이를 나타내는 척도로서 유전정점(Tan delta ;  $\tan\delta$ ) 및 정전용량(Capacitance ;  $C_x$ )를 사용한다. 인가전압을 증가시키에 따라 절연물 내의 결함에서 부분방전이 발생하면  $\tan\delta$ 와  $C_x$ 가 증가하는 현상으로부터, 본 연구에서는 특정전압에서의  $\tan\delta$  및  $C_x$ 와 부분방전이 나타나지 않는 낮은 전압에서의  $\tan\delta_0$  및  $C_{0x}$ 와의 차이인  $\Delta \tan\delta$ (유전정점 변화율) 및  $\Delta C/C_0$ (정전용량 증가율)를 파라메타로 이용하였다.  $\Delta \tan\delta$  및  $\Delta C/C_0$ 는 절연물의 치수, 형상에 관계없이 부분방전 등에 의한 유전손의 증가분이기 때문에 변화율이 적을수록 양호한 절연체이고, 고정자 권선 내부의 미소공극의 파다 여부 등 권선 제작과정에서의 결함유무와 장기간 사용된 권선의 절연열화 상태를 나타낸다[9].

유전정점( $\tan\delta$ )과 정전용량( $C_x$ )을 측정하기 위한 장비로는 Tettex Instruments사의 Schering Bridge인 Automatic Insulation Test System 및 Capacitance and Dissipation/Power Factor Test Set (Type 2818-QA)을 사용하였고, 인가전압에 따른  $\tan\delta$ 와  $C_x$ 를 측정하여 각각의 변화율을 계산하였다.

### 3.3 부분방전 시험방법

전동기와 발전기의 고정자 권선은 제작과정에서의 결함이나 사용시간의 증가로 인해 절연층에 간극(Air-filled gap), 미소공극(void), 균열(crack), 박리(delamination) 등이 생기면 이 결함부에서 전압이 높아짐에 따라 부분방전 펄스전류가 발생한다. 이러한 부분방전을 측정하여 절연물내의 국부적인 결함과 열화를 검출하는 수단으로서 최대 부분방전 전하량( $Q_m$ )을 사용하고, 결함이 많거나 절연열화가 진행되면 방전전하가 커지고 방전 발생개수 또한 증가하여  $Q_m$ 이 커지면 절연파괴 전압이 저하된다. 한편, 부분방전 시험에서 부분방전 개시전압(Discharge inception voltage ; DIV)은 절연물 내에 존재하는 미소공극 등의 결함부분 중 가장 낮은 전압에서 방전하는 결함부의 방전 개시전압을 나타내는 것으로서, 특히, 에나멜 전선을 사용한 저압 전동기의 경우에는 최초의 부분방전 개시전압이 중요하게 취급된다. 따라서 부분방전 측정시 외부잡음 제거 및 높은 측정 정밀도가 필수적으로 요구된다[9].

전동기 고정자 권선에 대한 부분방전 측정 회로도에는 그림 5와 같고, 본 연구에서는 Haefely Trench Tettex사의 디지털 부분방전 측정기인 Partial discharge detector (Model TE571)을 이용하여 수행한 부분방전 시험으로부터 최대 부분방전 크기( $Q_m$ )와 부분방전 개시전압(DIV)을 측정하였다. 이때 부분방전의 정밀한 측정을 가능하게 하고 전원과 접지 등으로부터 유입되는 외부잡음의 제거를 위해서, Panashield사의 Radio frequency shield system 차폐실에서 측정과 Noise-free power supply를 사용함으로써 1 [pC] 이하의 측정 정밀도를 가지도록 하였다.

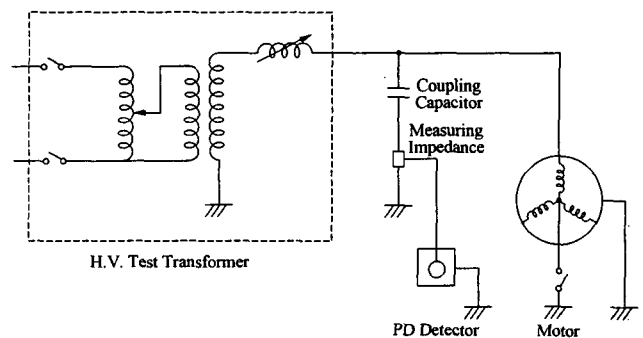


그림 5 부분방전 측정 시스템의 구성

Fig. 5 Configuration of partial discharge measuring system

### 3.4 절연파괴 시험방법

절연파괴 또는 내전압 시험은 전동기 고정자 권선의 절연강도를 점검하기 위해 실시하고, 권선의 주절연이 정상 운전 전압에서 안전한가를 보증하기 위한 것이다. 일반적으로 절

연파괴 (내전압) 시험은 전동기의 공장 출고시 최종 절연내력 평가나 사용중인 전동기의 운전에 필요한 절연강도의 보유여부를 판단하기 위해서 고정자 또는 회전자 권선에 적용한다.

그러나 인버터 구동용 저압 유도전동기는 에나멜 전선을 사용하므로 전동기가 실제 운전중일 때 가해지는 인버터 스위칭 써지에 따른 과도전압에 의해서 권선의 절연이 파괴된다. 따라서 본 연구에서는 통상적인 교류 및 직류 내전압 시험 대신에 고압 스위칭 펄스전압을 절연이 파괴될 때까지 전동기 권선에 인가하는 펄스 절연파괴 시험을 수행하였다. 그림 6은 실제 IGBT PWM 인버터의 출력전압과 동일한 전압상승율을 가지는 상승시간 200 [ns], 피크값이 18 [kV]인 스위칭 펄스파형을 나타내고 있고, 전동기 단자와 대지 사이에 스위칭 펄스 파형의 크기를 단계적으로 증가시켜 고정자 권선의 절연이 파괴되는 전압을 측정하였다[4].

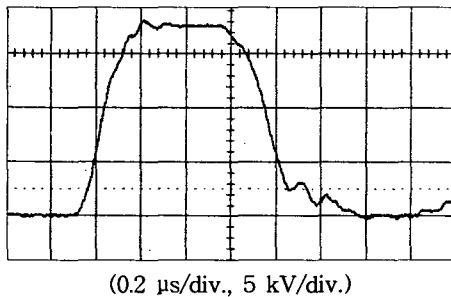


그림 6 절연파괴 시험을 위한 고압 펄스파형  
Fig. 6 Waveform of high-voltage pulse for breakdown test

#### 4. 절연특성 실험결과 및 검토

##### 4.1 교류전류, 유전정접 및 정전용량 실험결과

합침법과 횡수를 다르게 적용하여 제작한 5가지 종류의 유도전동기 고정자 권선에 대한 교류전류, 정전용량 및 유전정접 시험결과를 그림 7, 그림 8 및 그림 9에 나타내었다.

그림 7의 교류전류 시험결과에서 교류전류의 변화율  $\Delta I_1$ ,  $\Delta I_2$ ,  $\Delta I_3$  및  $\Delta I_4$ 는 각각 1,200 [V], 1,300 [V], 1,400 [V] 및 1,500 [V]에서의 전류값을 추정하여 계산한 것을 나타낸다. 전압이 높아질수록 충전전류가 많아져  $\Delta I$ 가 커짐을 볼 수 있고, 전반적으로 진공가압 합침(VPI) 1회 처리한 V1 전동기의  $\Delta I$ 가 가장 작고, 표준합침(SI) 1회 처리한 S1 전동기의  $\Delta I$ 가 가장 큰 값을 나타내어 절연특성이 가장 좋지 않음을 볼 수 있다. VPI 2회의 V2 전동기는 1,200 [V]와 1,300 [V]에서의 교류전류 변화율  $\Delta I_1$ 과  $\Delta I_2$ 가 S1 전동기(SI 1회)를 제외한 다른 전동기보다 더 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 전압이 높아질수록 VPI 1회, 2회 및 SI 3회 전동기의 교류전류 변화율은 비슷한 크기를 나타내고 있다.

그림 8은 전동기 종류별 정전용량의 증가율을 나타낸 것으로서,  $\Delta C/Co_1 \sim C/Co_4$ 는 각각 인가전압 600 [V]를 기준으로 1,200 [V], 1,300 [V], 1,400 [V] 및 1,500 [V]에서의 정전용량 값의 차이를 백분율로 나타낸 것이다. 진공가압 합침으로 제작한 전동기의  $\Delta C/Co$ 가 표준합침 전동기 보다 비교적 낮음을 볼 수 있고, 합침횟수가 많아질수록 절연특성이 향상됨을 확인할 수 있다.

유전정접( $\tan\delta$ ) 실험결과를 보여주는 그림 9에서 유전정접 변화율  $\Delta \tan\delta_1$ ,  $\Delta \tan\delta_2$ ,  $\Delta \tan\delta_3$  및  $\Delta \tan\delta_4$ 는 각각 1,200 [V], 1,300 [V], 1,400 [V] 및 1,500 [V]에서의  $\tan\delta$ 와 부분방전이 나타나지 않는 600 [V]에서의  $\tan\delta_0$ 와의 차이를 나타내고 있다. 정전용량 실험결과와 유사하게 진공가압 합침으로 제작한 전동기의  $\Delta \tan\delta$ 가 표준합침보다 작음을 볼 수 있고, 진공가압 합침 1회 및 2회는  $\Delta \tan\delta$ 의 크기가 전압에 따라 비슷하지만, 표준합침 처리한 전동기는 합침횟수가 증가할수록  $\Delta \tan\delta$ 가 감소하여 절연특성이 더 좋은 것으로 나타났다.

##### 4.2 부분방전 및 절연파괴 실험결과

IGBT PWM 인버터 구동용 저압 유도전동기 고정자 권선의 초기 절연파괴가 인버터 써지에 의해 나타나는 전동기 단자에서의 과전압에 기인하는 부분방전 발생 때문이므로 펄스 절연파괴 시험과 함께 부분방전 시험결과는 권선의 절연성능을 평가하는 데 있어서 매우 중요한 요소이다.

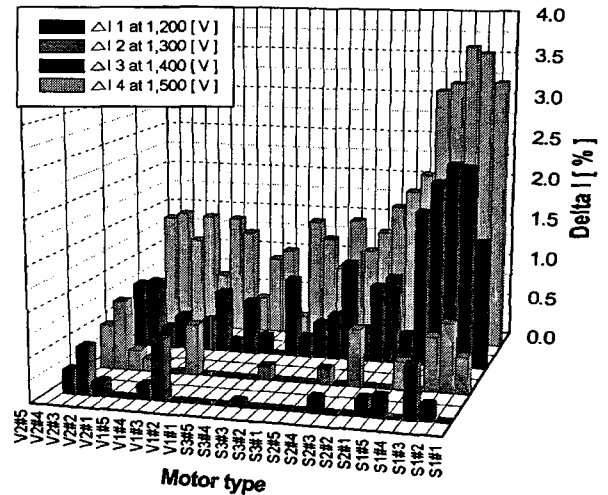


그림 7 교류전류 시험결과 ( $\Delta I$ )  
Fig. 7 Test results of AC current ( $\Delta I$ )

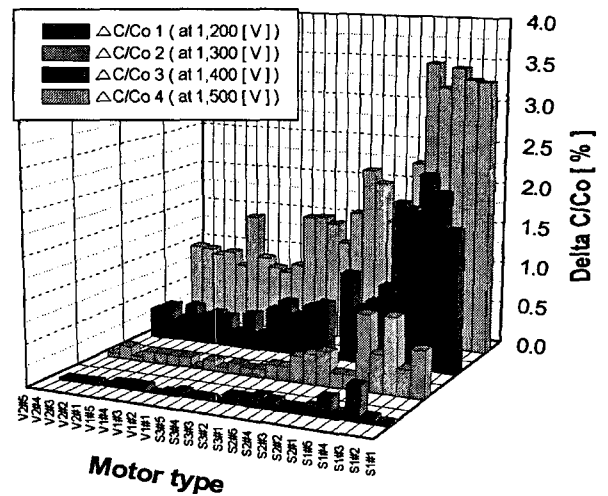


그림 8 정전용량 시험결과 ( $\Delta C/Co$ )  
Fig. 8 Test results of capacitance ( $\Delta C/Co$ )

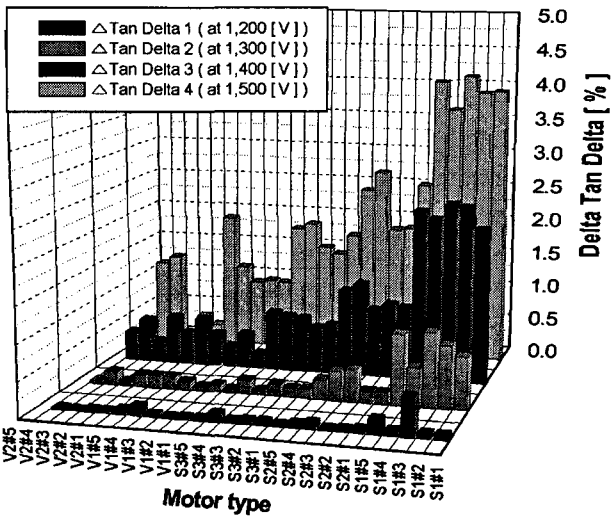


그림 9 유전정접 시험결과 ( $\Delta \tan \delta$ )  
 Fig. 9 Test results of tan delta ( $\Delta \tan \delta$ )

그림 10은 전동기 종류별 부분방전 크기로서, Qm1, Qm2, Qm3 및 Qm4는 인가전압이 1,200, 1,300, 1,400 및 1,500 [V] 일 때 각각의 전동기별 최대 부분방전 크기를 나타내고, 전압이 높아질수록 부분방전이 커지는 전형적인 특성을 볼 수 있다. 함침기법에 따른 전동기별 최대 부분방전 크기를 분석해 보면, 진공가압 함침 2회 처리한 V2 전동기가 모든 전압에서 Qm값이 가장 작음을 볼 수 있고, 표준함침 1회인 S1 전동기의 부분방전 크기가 가장 큰 것을 알 수 있다. 또한, S3 (표준함침 3회) 및 V1 (진공가압 함침 1회) 전동기의 경우에는 1,500 [V]에서의 최대 부분방전 크기인 Qm4가 크게 증가하였다. 그러나 전반적으로 함침종류에 관계없이 함침횟수가 증가하면 부분방전의 크기가 작아지고, 표준함침보다는 진공가압 함침을 적용한 전동기의 부분방전 특성이 양호하게 나타났다.

각 전동기에 대한 부분방전 개시전압의 측정결과를 보여 주고 있는 그림 11에서 DIV1, DIV2 및 DIV3는 각각 최대 부분방전 크기가 10 [pC], 100 [pC], 1,000 [pC]이 될 때의 인가전압을 나타내고 있다. 진공가압 함침 2회를 적용한 V2 전동기의 DIV가 가장 크게 측정되어 최대 부분방전 크기와 마찬가지로 가장 좋은 절연특성을 나타내었고, 표준함침 1회 처리한 S1 전동기가 가장 낮은 DIV를 나타내어 가장 낮은 전압에서 부분방전이 발생함을 알 수 있다. 나머지 전동기는 비슷한 크기의 DIV를 나타내고 있고, 표준함침 전동기의 경우에는 전반적으로 1,050 [V]에서부터 부분방전이 발생하기 시작하여 전압 1,100 [V] 이상의 전압에서 10 [pC] 정도의 부분방전이 발생함을 확인할 수 있다.

그림 12는 고압 스위칭 써지전압을 고정자 권선에 인가하여 수행한 펄스 절연파괴 시험의 결과로서, 각 전동기별 절연파괴 전압을 나타내었다. 진공가압 함침 처리한 V1 및 V2 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 높은 12 [kV] 이상으로 나타났고, 표준함침 전동기의 경우에는 10 [kV] 내에서 절연파괴가 발생하여 진공가압 함침 전동기의 절연내력이 좋은 것을 알 수 있고, 표준 및 진공가압 함침 전동기 모두 함침횟수를 증가시킬수록 절연파괴 전압이 높아짐을 볼 수 있다.

### 4.3 실험결과 종합분석

함침기법을 다르게 적용하여 제작한 25개의 유도전동기 고정자 권선에 대한 교류전류, 정전용량, 유전정접, 부분방전 및 펄스 절연파괴 시험결과를 요약하여 함침기법 및 파라메타에 따라 절연특성이 양호한 순서로 번호를 매겨 표 2에 종합적으로 나타내었다.

바나쉬 디핑 및 가열건조 방식의 표준함침보다는 진공가압 함침기법을 적용한 전동기의 절연특성이 우수한 것으로 나타났고, 특히 부분방전 시험결과와 펄스 절연파괴 전압이 가장 양호한 V2 전동기(진공가압 함침 2회)의 절연특성이 가장 좋다는 것을 알 수 있다. 그러나 V1 전동기(진공가압 함침 1회)의 경우에는 부분방전 개시전압(DIV) 특성이 좋지 않아서 상대적으로 낮은 전압에서 부분방전이 발생하였고, V2 전동기는 교류전류 변화율( $\Delta I$ )이 비교적 높게 나타났다.

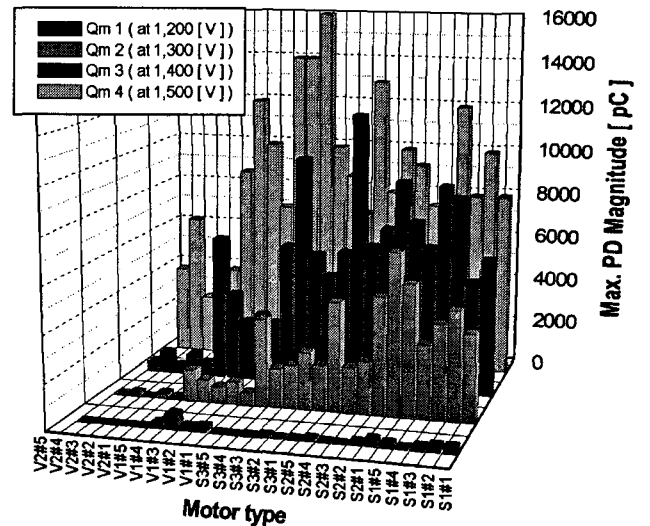


그림 10 최대 부분방전 크기 측정결과 (Qm)  
 Fig. 10 Test results of maximum PD magnitude (Qm)

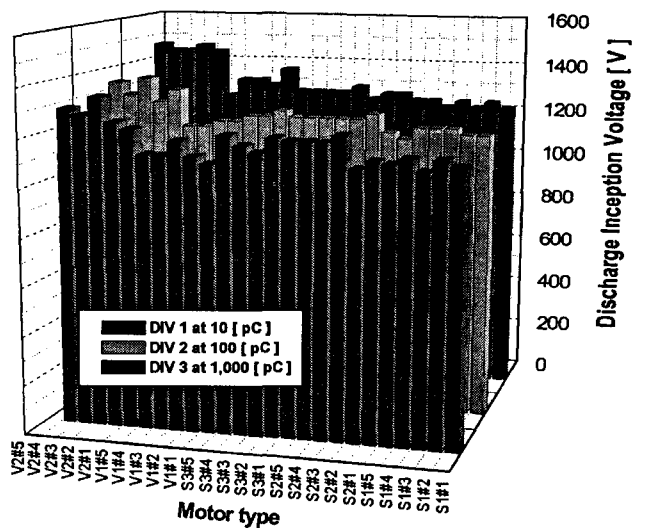


그림 11 부분방전 개시전압 측정결과 (DIV)  
 Fig. 11 Test results of discharge inception voltage (DIV)

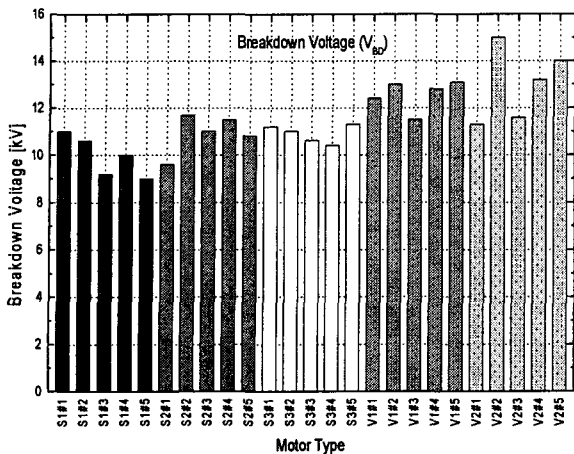


그림 12 절연파괴 전압 측정결과 (VBD)  
Fig. 12 Test results of breakdown voltage (VBD)

또한, 표준함침을 1회 처리한 S1 전동기의 절연특성이 가장 좋지 않음을 확인하였고, 함침횟수가 증가할수록 절연특성이 대체적으로 향상됨을 볼 수 있지만, 표준함침 2회 및 3회 처리한 S2와 S3 전동기의 절연파괴 전압은 큰 차이가 없었다. 이와 같이 절연특성 분석을 위한 파라메타의 특성이 일치하지 않는 것은 VPI에서의 진공도, 바니쉬 건조를 위한 가열온도와 가열시간 등의 함침조건이 원인일 가능성이 크다.

그리고 스위칭 써지에 의한 펄스 절연파괴 시험결과와 부분방전 특성이 가장 유사한 결과를 나타내어 최대 부분방전 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)이 인버터용 전동기의 절연수명에 가장 중요한 파라메타라고 판단되고, 절연내력을 악화시키는 주된 요인인 부분방전이 10 [pC] 이상의 크기로 발생되지 않도록 하기 위해서는, 그림 10의 부분방전 개시전압으로부터, 유도전동기 단자에서의 과도전압을 1,000 [V] 이하로 저감시켜야 할 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 절연처리에 의해서 5가지 종류의 5 [HP] 저압 유도전동기 고정자 25개를 제작하여 각각의 전동기에 대한 부분방전, 유전정접, 정전용량 및 교류전류 시험과 스위칭 펄스전압에 의한 절연파괴 시험을 수행함으로써

함침기법에 따른 절연특성의 상세한 분석결과를 제시하였고, IGBT PWM 인버터 구동용 유도전동기의 절연내력을 향상시킬 수 방안을 도출하였다.

또한, 부분방전의 크기가 저압 인버터용 전동기의 절연내력과 가장 밀접한 관련이 있음을 증명하였고, 고정자 권선의 절연에 손상을 주지 않는 한계전압으로서 전동기 단자전압에 대한 제한치를 제시하였다.

본 연구에서 제시한 함침기법에 따른 절연성능 평가결과와 전동기 단자전압의 제한치는 인버터 구동 저압 유도전동기의 절연설계와 가변속 구동용 IGBT PWM 인버터의 제작 및 설치시 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] M. Kaufhold, H. Auinger, M. Berth, J. Speck, and M. Eberhardt, "Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 2, pp. 396-402, April 2000.
- [2] A.H. Bonnett, "A Comparison Between Insulation Systems Available for PWM-Inverter-Fed Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, pp. 1331-1341, Sep./Oct. 1997.
- [3] Erik Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, pp. 1095-1101, Sep./Oct. 1992.
- [4] D.H. Hwang, D.Y. Park, Y.J. Kim, D.H. Kim, J.Y. Koo, and J.H. Kim, "Analysis of Insulation Characteristics of Low-Voltage Induction Motor Driven by IGBT PWM Inverter", Conference Record of the 2000 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, USA, pp. 17-20, Apr. 2-5, 2000.
- [5] A.V. Jouanne and P.N. Enjeti, "Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects of Long Motor Leads in ASD Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, pp. 1138-1145, Sep./Oct. 1997.
- [6] Y. Sozer, D.A. Torrey, and S. Reva, "New Inverter

표 2 유도전동기의 절연특성 양호순서

Table 2 The insulation characteristics of the induction motors (1; Best, 5; Worst)

파라메타 전동기	교류전류 변화율 (ΔI)	정전용량 증가율 (ΔC/Co)				유전정접 변화율 (Δtanδ)				부분방전 개시 전압 (DIV)			최대 부분방전 크기 (Qm)				절연 파괴 전압 V <sub>BD</sub>			
		ΔI1	ΔI2	ΔI3	ΔI4	ΔC1	ΔC2	ΔC3	ΔC4	ΔT1	ΔT2	ΔT3	ΔT4	DIV1	DIV2	DIV3		Qm1	Qm2	Qm3
표준 1회 S1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5	5	4	5	4	2	5
표준 2회 S2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	3	3	4	3	4	5	3	3
표준 3회 S3	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	2	2	3	2	3	3	5	4
진공 1회 V1	3	1	1	1	2	1	1	2	2	1	1	1	5	4	2	5	2	2	4	2
진공 2회 V2	4	4	3	3	1	2	2	1	1	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1

Output Filter Topology for PWM Motor Drives”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, No. 6, pp. 1007-1017, Nov. 2000.

- [7] W. Yin, “Dielectric Properties of an Improved Magnet Wire for Inverter-Fed Motors”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 17-23, Jul./Aug. 1997.
- [8] H. Brandes and J.A. Allison, “Insulating Systems for Inverter-Driven Motors ; Status and Developments”, Power Engineering Journal, Vol. 14, No.4, pp. 164-168, Aug. 2000.
- [9] 황돈하, 박도영, 김용주, 구자운, 박태익, 김진홍, “IGBT 인버터 구동 저압 유도전동기의 절연특성 연구”, 1999년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 206~210, 1999. 7. 19-21.

저 자 소 개



**황 돈 하 (黃 敦 夏)**

1991년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 전력설비진단연구그룹 선임연구원.  
Tel : 055-280-1544, Fax : 055-280-1547  
E-mail : dhhwang@keri.re.kr



**강 동 식 (姜 東 植)**

1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 책임연구원, 2005년~현재 한국전기연구원 전력설비진단연구그룹 그룹장.  
Tel : 055-280-1573, Fax : 055-280-1547  
E-mail : dskang@keri.re.kr



**김 용 주 (金 容 柱)**

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~현재 한국전기연구원 책임연구원. 1999년~2000년 한국전기연구원 산업전기연구단 단장. 2001년~2005년 한국전기연구원 기기제어응용연구그룹 그룹장. 2005년~현재 한국전기연구원 융합기술연구단 단장. 2003년~2005년 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 전기기기연

구회 위원장. 전기물성·응용부문학회 기획 위원장. 2006년~현재 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 부회장 겸 전기교통신기술연구회 위원장.

Tel : 055-280-1540, Fax : 055-280-1547  
E-mail : yjkim@keri.re.kr



**이 인 우 (李 仁 佑)**

1989년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1989년~현재 (주)효성 중공업연구소 회전기팀 팀장

Tel : 055-268-9921, Fax : 055-268-9926.  
E-mail : inlee@hyosung.com



**구 자 운 (具 滋 允)**

1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 프랑스 ENSEET 졸업(석사). 1984년 프랑스 ENSIEG 졸업(공학박). 현재 한양대 공대 전자컴퓨터공학부 교수. 한양대 전자재료 및 부품연구센터(EM&C) 소장. 2003년~2005년 대한전기학회 학술이사. 2004년~현재 CIGRE(국제대전력망기술회의) 아·태지역협의체 회장. 2006년~현재 대한전기학회 전기물성·응용부문회 회장.

Tel : 031-400-5163, Fax : 031-407-9873  
E-mail : koojy@hanyang.ac.kr



**김 동 희 (金 東 熙)**

1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 Kobe대 대학원 졸업(공학박). 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자연구부장. 1990년~현재 영남대 전기공학과 교수. 1999년~2000년 대한전기학회 전력전자연구회 위원장. 2000년 9월~2001년 2월 일본 국립 Kyushu대 교환교수. 2005년~현재 영남대학교 총무처장.

Tel : 053-810-2488, Fax : 053-810-4629  
E-mail : dohkim@yu.ac.kr



**이 광 식 (李 廣 植)**

1971년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~현재 영남대 전기공학과 교수. 1988년~1989년 일본 Nagoya Institute of Technology 초빙교수. 1998년~1999년 대한전기학회 방전·고전압연구회 간사장. 2000년~2002년 영남대학교 산업대학원 원장. 2002년~2004년 대한전기학회 대구·경북지회 지회장. 2006년~현재 한국조명·전기설비학회 회장.

Tel : 053-810-2486, Fax : 053-810-4629  
E-mail : kslee@yu.ac.kr