

함침기법에 따른 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 절연성능 평가

(Evaluation of Insulation Performance for Stator Winding of the Inverter Driven Induction Motor According to Impregnation Methods)

황 돈 하* · 강 동 식* · 이 인 우** · 김 동 희*** · 이 광 식***

(Don-Ha Hwang · Dong-Sik Kang · In-Woo Lee · Dong-Hee Kim · Kwang-Sik Lee)

한국전기연구원* · (주)효성** · 영남대학교***

Abstract

Inverter driven induction motors with high speed switching and advanced PWM techniques are widely used for variable speed applications. Recently, the insulation failures of stator winding have attracted much concern due to high dv/dt of IGBT PWM inverter output. In this paper, the detailed insulation test results of 26 low-voltage induction motors are presented. Six different types of insulation techniques are applied to 26 motors. The insulation characteristics are analyzed with partial discharge, discharge inception voltage, AC current, and dissipation factor tests. Also, breakdown tests by high voltage pulses are performed. From the above test data, the effects due to different wires and insulation techniques on the insulation characteristics of low-voltage induction motors are compared and analyzed. The insulation technique to enhance the insulation strength is suggested from the test results.

1. 서 론

전력용 반도체 소자의 고속화와 마이크로프로세서의 급격한 발달로 인버터의 고주파 스위칭 운전이 가능해짐에 따라 광범위하고 연속적인 속도제어가 가능하고, 전력절감 효과가 큰 가변속 드라이브에 사용되는 PWM 인버터의 성능이 크게 향상되었다. 최근에는 유도전동기의 가변속 구동용 인버터에 스위칭 주파수가 2~20 [kHz] 대역인 IGBT가 채용되면서 스위칭 속도가 매우 빨라짐에 따라 전압상승률이 크게 증가하여 스위칭 손실 감소, 방열설계의 용이성, 입력전류의 파형개선, 가청소음 저감 등의 많은 장점을 보이고 있다[1]-[3].

그러나 고속 스위칭과 더불어 향상된 PWM 기법이 인버터 구동 유도전동기의 제어성능을 크게 향상시킨 반면에, 고주파 스위칭 동작과 높은 전압상승률(dv/dt)이 전동기의 고정자 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시켜 조기에 절연파괴가 발생하는 문제점이 대두하게 되었다. 이와 같은 IGBT PWM 인버터 구동형 유도전동기에 대한 고정자 권선의 절연문제를 해결하기 위해서 Magnet wire의 절연강화, 스위칭시 발생하는 써지전압의 크기 저감, 전동기 단자에 인가되는 전압상승률의 억제 및 과전압 저감용 필터설계 등에 관한 연구가 많

이 이루어지고 있다[2]-[5]. 하지만 인버터용 저압 유도전동기의 제작시 매우 중요한 절연설계, 함침방법 및 절연특성에 관한 연구결과는 전동기 Maker의 고유기술로서 많이 공개되지 않고 있다.

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동형 5 [HP], 380 [V]급 유도전동기를 대상으로 하여 고정자 권선에 대한 절연특성의 상세한 분석결과를 제시한다. 함침방법과 함침횟수를 다르게 적용한 5가지 종류의 고정자 25기를 실제 제작하여 부분방전 시험을 통한 최대 부분방전 크기(Max. Partial Discharge Magnitude; Qm)와 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage; DIV)을 구하였고, 교류전류 및 유전정접 시험을 수행하여 교류전류 변화율(ΔI)과 유전정접 변화율($\Delta \tan \delta$)을 산출하여 각 전동기별로 상세히 비교 분석하였다. 또한, 실제 IGBT PWM 인버터와 동일한 전압상승률을 가지는 파형을 발생시켜 출력전압의 크기를 가변시킬 수 있는 고압 펄스 발생기를 제작하여 절연파괴 시험을 수행함으로써 함침방법에 따른 고정자 권선의 절연내력을 평가하였다. 이를 통하여 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기의 제작시 고정자 권선의 절연내력을 향상시킬 수 있는 방안과 함침기법을 선정하는 데 유용한 자료를 제시하였다.

2. 인버터 구동 유도전동기 시스템

2.1. 가변속 유도전동기 구동 시스템

산업설비의 가변속 드라이브에 채용되는 전형적인 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 구성도와 각 부분에서의 전압파형을 그림 1과 그림 2에 각각 나타내었다. 그림 2 (a)의 3상 교류전원(V_{RS})이 입력되어 다이오드 정류기와 DC Link단에 의해 그림 2 (b)의 DC Link 전압(U_D)이 생성되고, IGBT PWM 인버터의 출력전압(E_{ab})은 그림 2 (c)와 같이 된다. 그러나 실제 유도전동기의 입력단자에는 IGBT PWM 인버터의 고속 스위칭에 의해 상승시간이 짧고 매우 큰 전압상승률(dv/dt)을 가지는 그림 2 (d) 및 (e)와 같은 스위칭 과도전압(V_{ab})이 발생되어 2 [pu] 이상이 되는 써지전압이 인가된다. 또한, 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이에 따른 임피던스 비정합에 의해 발생하는 반사전압으로 인하여 전압이 더욱 상승하게 된다. 이러한 스위칭 써지전압은 고정자 권선의 절연내력을 급격히 저하시키고, 결국에는 절연파괴로 진전된다[1][6][7].

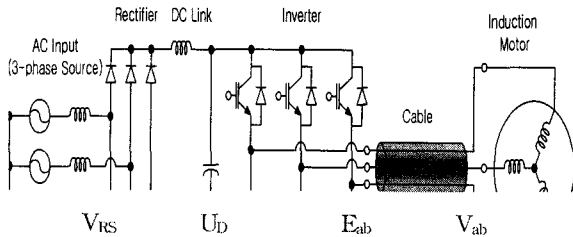


그림 1. IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 구성도

Fig. 1. Configuration of induction motor system driven by IGBT PWM inverter

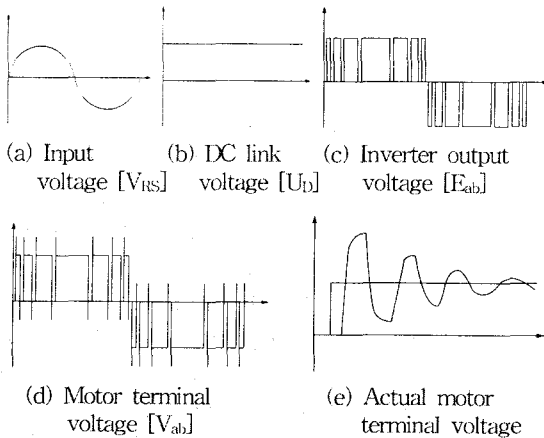


그림 2. IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 전압파형

Fig. 2. Voltage waveforms of the IGBT PWM inverter-fed induction motor system

2.2. 고정자 권선의 절연시스템

유도전동기 고정자 권선의 절연 시스템은 그림 3에 나타난 슬롯내 단면도와 같이 주절연(main), 상절연(phase) 및 턴절연(turn insulation)으로 구성되어 있다.

주절연 또는 슬롯절연(slot phase)은 고정자 철심으로 부터 권선을 분리시키게 되고, 상절연(phase separation)에 의해서 개별 상의 전위가 서로 다르게 분리된다. 슬롯절연은 상과 상을 분리시키기 위한 Slot separator (Mid stick), 상과 접지를 분리시키는 Slot closure (Top stick) 및 Slot liner로 구성되어 있다[4][8].

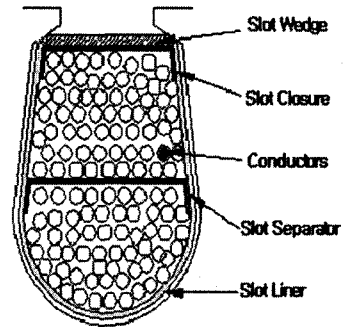


그림 3. 고정자 권선의 절연시스템

Fig. 3. Insulation system of the stator winding

코일 내부의 인접한 Turn간의 턴절연은 그림 4에 나타난 것과 같이 에나멜 전선과 함침 레진(impregnating resin) 또는 바니쉬(vanish)로 이루어져 있다[5][6]. 저압 유도전동기의 권선방식은 Random-wound 방식이 일반적이고, 용량이 증가하게 되면 몇 개의 전선을 묶어 코일을 병렬로 감기 때문에, 1개 코일의 처음과 마지막 턴이 인접하게 배치될 가능성이 가장 크다. 따라서 전체 코일전압이 그림 4에 나타난 턴간 절연 시스템과 같이 인접한 2개의 전선 사이 및 미소공극(void)에 걸리게 되어 전기적 스트레스가 가장 크게 나타나고, 가혹한 상태에서는 턴간 절연이 다층코일 또는 코일그룹 전체에 걸리는 것보다 더 큰 전압강하를 받을 수도 있다 [5][8][9].

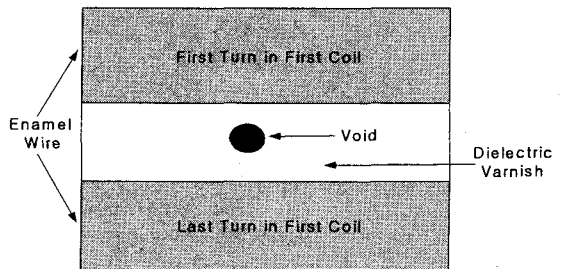


그림 4. 턴간 절연의 구성

Fig. 4. Configuration of the turn insulation

또한, 인버터와 전동기간의 케이블이 긴 경우에는 반사파가 발생하여 그림 2 (e)와 같이 전동기 고정자 권선의 부분방전 또는 코로나 개시전압(DIV 또는 CIV; Corona Inception Voltage)을 초과하는 써지전압이 전동기 입력단자에 인가되고, 이때 에나멜 피복 및 합침 바니쉬 절연물을 사이에 두고 접합된 고전압부와 저압부 사이에서 부분방전(코로나)이 발생한다. 부분방전은 전선 사이의 미소공간이나 바니쉬 절연물 내의 미소공극(Void) 등의 전계가 집중하는 곳에서 발생하여 국부적인 절연파괴 또는 이온화를 촉진시킴으로서 절연열화가 진행되고, 결국에는 턴(Turn)간, 상(Phase)간 또는 상-대지간의 절연파괴로 진전된다[4][6][10].

3. 절연특성 시험방법

3.1. 유도전동기의 사양과 절연방식

IGBT PWM 인버터 구동용 유도전동기의 고정자 권선에 대한 함침기법에 따른 절연특성 시험을 위해 제작한 유도전동기 고정자는 표 1과 같이 총 25基이다. 전동기 사양은 3상, 4극, 380 [V], 5 HP (3.7 kW)이고, 절연등급은 최고 허용온도가 155 [°C]인 F종 절연이다.

표 1. 고정자 권선의 함침방법
Table 1. Impregnation methods of the stator winding

Impregnation method	Number of impregnation	Motor symbol	Number
Standard impregnation	1	S1#1 ~ S1#5	5
	2	S2#1 ~ S2#5	5
	3	S3#1 ~ S3#5	5
Vacuum pressure impregnation	1	V1#1 ~ V1#5	5
	2	V2#1 ~ V2#5	5

고정자 권선의 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.

고정자 권선에 사용된 에나멜 전선(Enamel wire)은 도체 외경이 0.9 [mm]의 Polyester enameled wire (PEW)인 1종 에나멜선으로서 표준 절연두께가 0.066 [mm]이다. 그리고 슬롯내의 주절연은 T0.25인 Mylar-Nomex-Mylar 소재의 Slot Cell과 Nomex-Mylar-Nomex 소재의 상부웨지(Top Wedge) 및 T0.3 Dacron-Mylar-Dacron의 상절연(Phase Insulation)으로 구성되었다.

3.2. 부분방전, 유전정접 및 교류전류 시험

Haefely Trench Tettex사의 디지털 부분방전 측정기인 Partial discharge detector (Model TE571)을 이용하여 수행한 부분방전 시험으로부터 최대 부분방전 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)을 측정하였다. 부분방전 시험은 높은 측정 정밀도와 전원과 접지 등으로부터 유입되는 외부잡음의 제거가 필수적이므로 그림 5와 같이 Radio frequency shield room에서 Noise-free power supply를 사용하여 잡음제거와 1 [pC] 이하의 Sensitivity를 갖도록 하였다.

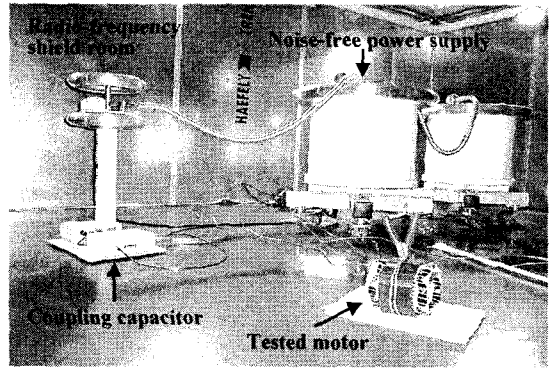


그림 4. 부분방전 측정 시스템의 구성
Fig. 4. Configuration of PD measuring system

또한, 유전정접($\tan\delta$)과 교류전류 시험을 위해 Tettex사의 Automatic insulation test system (Type 2818-QA)를 사용하여 전압인가와 함께 교류전류 및 유전정접을 동시에 측정하였다. 교류전류 시험에 의하여 인가전압에 따른 전류특성을 나타내는 전류변화율(ΔI)을 구하였고, 유전정접 시험을 통해 부분방전이 발생하지 않는 낮은 전압에서의 $\tan\delta_0$ 와 일정전압에서의 $\tan\delta$ 와의 차이를 나타내는 유전정접 변화율($\Delta\tan\delta$)을 산출하였다.

3.3. 절연파괴 시험

유도전동기가 실제 운전중일 때 가해지는 스위칭 써지에 따른 펄스전압에 의해 권선이 절연파괴되는 현상을 분석하기 위해서, 절연이 파괴되는 전압까지 모의 스위칭 펄스를 전동기 권선에 인가하는 펄스 파괴시험을 수행하였다.

그림 5는 스위칭 펄스 전압 모의를 위해 실제 제작한 고압 펄스 발생기의 구성도를 나타내고 있다. 전원에 영향을 주지 않도록 절연변압기를 입력단에 사용하였고, 입력전원을 정류하는 다이오드 정류기, DC Link 전압을 안정한 680 [V] DC로 승압시키는 DC-DC 컨버터를 위한 IGBT PWM 인버터, 고주파 변압기 및 정류기, 그리

고 DC 전압을 최고 20 [kV]의 펄스로 승압하기 위한 고압 펄스 발생기로 구성되어 있다.

그림 6은 펄스 발생기의 출력전압을 실측한 것으로서, 상승시간이 200 [ns]이고, 피크값이 18 [kV]인 펄스 파형을 나타내고 있다.

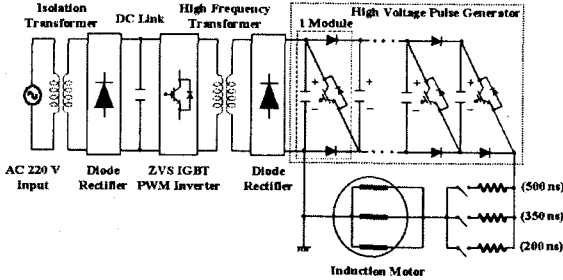


그림 5. 고압 펄스 발생기의 블록도
Fig. 5. Block diagram of high-voltage pulse generator

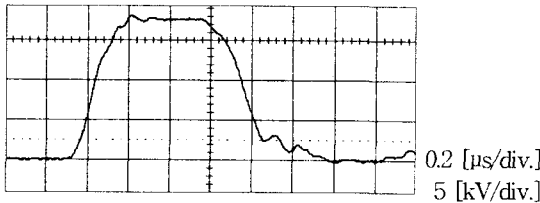


그림 6. 고압 펄스 발생기의 출력전압 실측파형
Fig. 6. Waveform of high-voltage pulse

4. 절연특성 시험결과

4.1. 유전정접 및 교류전류 시험결과

표 1과 같이 5가지의 함침방법을 적용하여 제작한 유도전동기 고정자 권선에 대한 유전정접 및 교류전류 시험결과를 그림 7과 그림 8에 나타내었다.

유전정접의 변화율인 $\Delta \tan \delta$ 를 나타낸 그림 7에서, $\Delta \tan \delta 1$ 과 $\Delta \tan \delta 2$ 는 각각 1,300 [V]와 1,500 [V]에서의 $\tan \delta$ 와 600 [V]에서의 $\tan \delta$ 와의 차이를 나타내고 있다. 진공가압 함침(VPI)으로 제작한 전동기의 $\Delta \tan \delta$ 가 표준 함침(SI)보다 작음을 볼 수 있고, 표준함침 전동기는 함침횟수가 증가할수록 $\Delta \tan \delta$ 가 감소하여 절연특성이 더 좋은 것으로 나타났다.

그림 8에서의 교류전류 변화율 $\Delta I1$ 은 1,300 [V], $\Delta I2$ 는 1,500 [V]에서의 전류값을 추정하여 계산한 것을 나타내고, V1(VPI 1회) 전동기의 ΔI 가 가장 작고, S1(SI 1회) 전동기의 ΔI 가 가장 큰 것을 볼 수 있다. 그러나 V2(VPI 2회) 전동기는 유전정접 특성과는 다르게 S3(SI 3회) 전동기의 ΔI 크기와 유사하고, 특히 1,200 [V]에서의 $\Delta I1$ 은 S1을 제외한 다른 전동기보다 더 큰 것을 알 수 있다.

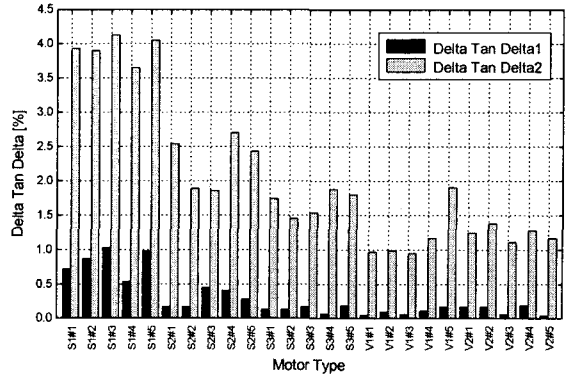


그림 7. 유전정접 시험결과 ($\Delta \tan \delta$)
Fig. 7. Test result of tan delta ($\Delta \tan \delta$)

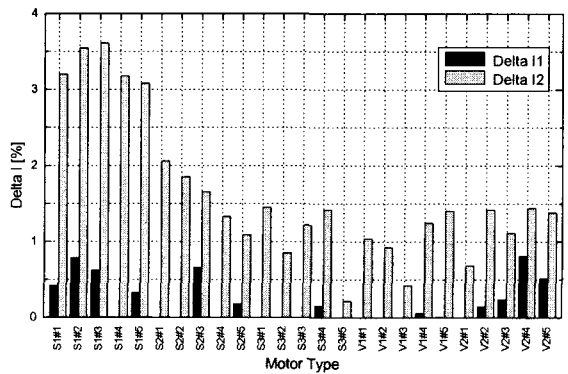


그림 8. 교류전류 시험결과 (ΔI)
Fig. 8. Test result of AC current (ΔI)

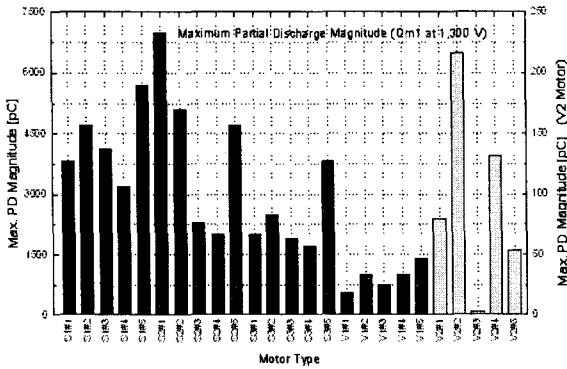
4.2. 부분방전 및 절연파괴 시험결과

그림 9의 (a)와 (b)는 각각 인가전압이 1,300 [V] 및 1,500 [V]일 때 측정된 유도전동기 고정자 권선의 최대 부분방전 크기(Q_m)를 나타낸 것으로서, 왼쪽 축은 검은 막대그래프(■), 오른쪽 축은 회색 막대그래프(▨)를 나타내고 있다.

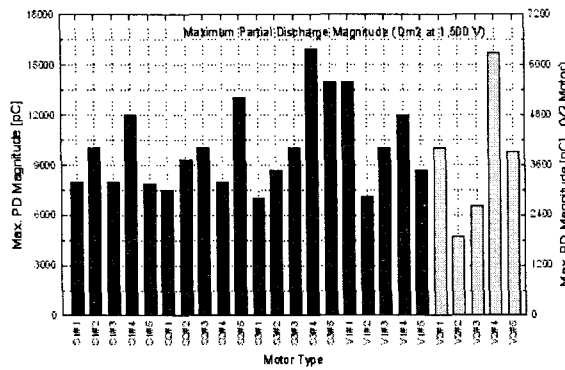
V2 전동기의 Q_m 값이 가장 작은 것을 볼 수 있고, V1 및 S3 전동기의 경우에는 1,300 [V]에 비해서 1,500 [V]에서의 Q_m 값이 크게 증가하고 있다.

그림 10은 각 전동기에 대한 부분방전 개시전압(DIV)의 측정결과이고, DIV1, DIV2 및 DIV3는 각각 최대 부분방전 크기가 10, 100, 1,000 [pC]이 될 때의 인가전압을 나타낸다.

그림 11은 각 전동기의 최대 부분방전 크기를 평균하여 나타낸 것으로서, 전압이 증가함에 따라 부분방전이 커지는 것을 전동기별로 쉽게 확인할 수 있다. 그림 10과 그림 11에서 V2 전동기의 DIV가 가장 큰 것을 볼 수 있고, S1 전동기가 가장 낮은 DIV를 나타내어 가장 빨리 부분방전이 발생한다는 것을 알 수 있다.



(a) 1,300 [V]에서의 최대 부분방전 크기 (Qm1)
 (a) Max. PD magnitude (Qm1) at 1,300 [V]



(b) 1,500 [V]에서의 최대 부분방전 크기 (Qm2)
 (b) Max. PD magnitude (Qm2) at 1,500 [V]

그림 9. 부분방전 시험결과 (Qm)
 Fig. 9. Test results of partial discharge (Qm)

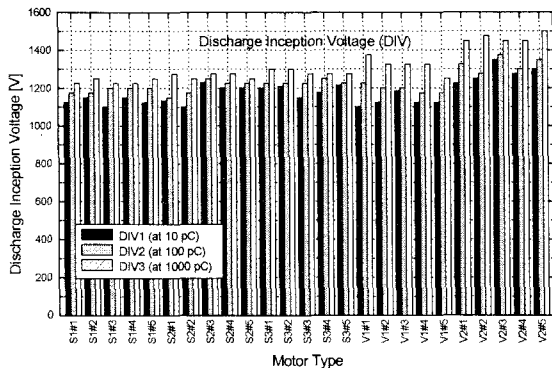


그림 10. 부분방전 개시전압 시험결과 (DIV)
 Fig. 10. Test results of discharge inception voltage (DIV)

그림 12는 그림 5의 고압 펄스 발생기를 이용하여 수행한 모의 스위칭 써지에 의한 절연파괴 전압을 나타내고, V1 및 V2의 진공가압 함침한 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 높고, 표준함침 전동기의 경우에는 10 [kV] 내외에서 파괴되었다는 것을 알 수 있다.

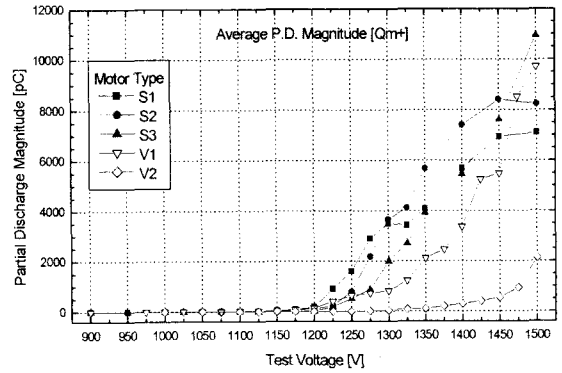


그림 11. 최대 부분방전 크기의 평균치
 Fig. 11. Average value of max. PD magnitude

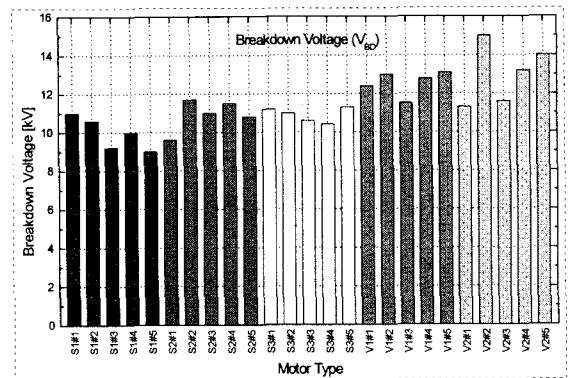


그림 12. 절연파괴 전압 측정결과 (V_{BD})
 Fig. 12. Test results of breakdown voltage (V_{BD})

5. 결론

본 논문에서는 다양한 함침방법에 의해서 5가지 종류의 5 HP 저압 유도전동기 고정자 25기를 제작하여 각각의 전동기에 대한 부분방전, 유전정접, 교류전류 시험과 스위칭 써지전압에 의한 절연파괴 시험을 수행함으로써 절연처리 방법에 따른 절연특성을 분석하였다. 각각의 전동기별로 수행한 절연특성 시험결과를 요약하여 특성이 양호한 순서로 번호를 매겨 표 2에 나타내었고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 진공가압 함침(VPI)을 2회 처리한 V2 전동기가 전반적으로 우수한 절연특성을 나타내고, 진공가압 함침 1회한 V1 전동기의 경우, DIV 특성이 좋지 않아서 상대적으로 낮은 전압에서 부분방전이 발생하였다.
- (2) Varnish dipping의 표준함침(SI) 전동기의 경우에는 함침횟수가 증가할수록 절연특성이 향상됨을 확인하였다.

- (3) 스위칭 펄스에 의한 절연과피 전압과 부분방전 특성이 가장 유사한 결과를 나타내므로 부분방전의 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)이 인버터용 전동기의 절연수명에 가장 중요한 파라메타라고 판단된다.
- (4) 절연내력을 악화시키는 주된 요인인 부분방전이 10 [pC] 이상의 크기로 발생되지 않도록 하기 위해서는 유도전동기 단자에서의 과도전압을 1,000 [V] 이하로 저감시켜야 한다.
- (5) 절연특성 분석을 위한 파라메타의 특성이 일치하지 않는 것은 VPI에서의 진공도, 바니쉬 건조를 위한 가열(Bake) 온도와 시간 등의 함침조건이 원인일 가능성이 크다.

표 2. 유도전동기의 절연특성 양호순서
Table 2. The Insulation characteristics of the induction motors

(1; Best, 5 ; Worst)

Motor	Parameter	Change in AC current (ΔI)				Change in dissipation factor ($\Delta \tan \delta$)			Discharge inception voltage (DIV)			Maximum partial discharge magnitude (Qm)		Break-down voltage (V _{BD})
		Sym-bol	ΔI_1	ΔI_2	ΔT_1	ΔT_2	DIV ₁	DIV ₂	DIV ₃	Qm ₁	Qm ₂			
SI Once	S1	5	5	5	5	5	5	5	5	4	5			
SI Twice	S2	3	4	4	4	3	3	4	4	3	4			
SI 3 times	S3	2	2	3	3	2	2	3	3	5	3			
VPI Once	V1	1	1	1	1	4	4	2	2	2	2			
VPI Twice	V2	4	3	2	2	1	1	1	1	1	1			

- [1] Erik Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, pp. 1095-1101, Sep./Oct. 1992.
- [2] 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 Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, pp. 1138-1145, Sep./Oct. 1997.
- [3] J. M. Bentley and P. J. Link, "Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, pp. 342-358, Mar./Apr. 1997.
- [4] A.H. Bonnett, "A Comparison Between Insulation Systems Available for PWM-Inverter-Fed Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, pp. 1331-1341, Sep./Oct. 1997.
- [5] R.J. Kerkman, D. Leggate, and G.L. Skibinski, "Interaction of Drive Modulation and Cable Parameters on AC Motor Transients", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, No. 3, pp. 722-731, May/June 1997.
- [6] Weijun Yin, "Failure Mechanism of Winding Insulations in Inverter-Fed Motors", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 6, pp. 18-23, Nov./Dec. 1997.
- [7] 황돈하, 김용주, 이인우, 배성우, 김동희, 노재균, "IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에서의 과도전압 분포특성", 전력전자학회 논문지, 제8권 제4호, pp. 351-358, 2003. 8.
- [8] D.H. Hwang, et al., "Assessing the Insulation Characteristics for Stator Winding of Low-Voltage Induction Motors for Adjustable-Speed Drive Applications", 2003 IEEE Industry Applications Conference (38th IAS Annual Meeting), Salt Lake City, USA, Vol. 1, pp. 432-438, Oct. 12-16, 2003.
- [9] M. Kauffhold, G. Bomer, M. Eberhardt, and J. Speck, "Failure Mechanism of the Intertum Insulation of Low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 12, No. 5, pp. 9-16, Sep./Oct. 1996.
- [10] A. Mabaye, et al., "Electrical Stresses Applied to Stator Insulation in Low-Voltage Induction Motors Fed by PWM Drives", IEE Proceedings of Electrical Power Applications, Vol. 144, No. 3, pp. 191-198, May 1997.