

IGBT 인버터 구동 저압 유도전동기의 절연특성 연구

황돈하* · 박도영 · 김용주 · 구자윤* · 박태익* · 김진홍*
 한국전기연구소 전력전자연구부, *한양대학교 전기공학과, *LG산전 전동기설계팀

A Study on the Insulation Characteristics of Low-Voltage Induction Motor driven by IGBT PWM Inverter

D.H. Hwang* · D.Y. Park · Y.J. Kim · J.Y. Koo* · T.I. Park* · J.H. Kim*
 Power Electronics Division, KERI, *Hanyang University, *LG Industrial Systems

Abstract - Since the introduction of IGBT PWM inverters, many low-voltage induction motors have been driven by them. Recently, the stator winding insulation failures have attracted much concern due to high dv/dt of IGBT inverter output.

In this paper, presented are the detailed insulation test results of 26 low-voltage induction motors. Six different types of insulation techniques are applied to 26 motors. The tests include PD, tan δ, and DIV tests. Also, breakdown tests by high voltage pulses are performed.

1. 서론

전력용 스위칭 소자의 급격한 발달에 의해 고주파 스위칭 운전이 가능해짐에 따라 광범위하고 연속적인 속도제어가 가능하고, 전력절감 효과가 큰 가변속 드라이브에 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 전동기의 고정자 권선 절연에 치명적인 손상을 가져오는 것이 최근 큰 문제점으로 대두되고 있다. 특히, 고효율 운전과 20 kHz대의 고속 스위칭이 가능한 IGBT를 사용한 PWM 인버터에 의해 구동되는 유도전동기 고정자 권선의 절연과 파 사고에 대한 위험이 크게 증가하고 있지만, 아직까지 완전한 해결방법이 제시되지 못하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 인버터 스위칭 과도전압에 의한 유도전동기의 고정자 절연문제를 분석하기 위하여 엘리베이터에 채용되는 IGBT PWM 인버터 구동 310 [V]급 유도전동기를 대상으로 하여 고정자 권선의 절연특성 분석 및 절연내력 평가결과를 제시한다. 전선(Wire)과 함침방법을 다르게 한 6가지 종류의 고정자 26기를 실제 제작하여 부분방전(Partial Discharge : PD) 시험을 통한 최대 부분방전 크기(Maximum PD Magnitude)와 부분방전 개시전압(Discharge Inception Voltage : DIV)을 구하였고, 교류전류 시험을 수행하여 교류전류 변화율(ΔI)과 유전정접 변화율(Δtan δ)을 산출하여 각 전동기별로 비교 분석하였다. 이 결과를 근거로 하여 저압 유도전동기 고정자 권선의 Wire와 함침방법에 따른 절연특성을 상세히 분석함으로써 절연보강 방법을 제안하였고, 유도전동기의 공장 출고시 적용가능한 최종 절연내력 평가기준을 제안한다.

또한, 실제 인버터에서의 스위칭 썬지 및 전압상승율(dv/dt)과 동일한 파형을 발생시켜 출력전압의 크기를 가변시킬 수 있는 IGBT PWM 인버터를 제작하였으며, 이를 이용해 절연파괴 시험을 수행하여 권선종류와 함침방법에 따른 고정자 권선의 절연파괴 전압을 비교 분석하였다.

2. 인버터 구동 유도전동기 시스템

가변속 드라이브에 사용되는 전형적인 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 구성도를 그림 1에 나타내었다. 전동기의 단자에 인가되는 PWM 인버터의 출력

전압은 그림 1 (c)와 같은 형태이지만, 실제로는 그림 1 (d) 및 (e)에 나타낸 것과 같이 인버터의 스위칭시 발생하는 상승시간이 짧은, 매우 큰 전압상승율(dv/dt)을 가지는 스위칭 과도전압이 인가된다. 이러한 스위칭 썬지전압은 고정자 권선의 절연내력을 급격히 저하시키고, 결국에는 절연파괴 사고로 진전된다.

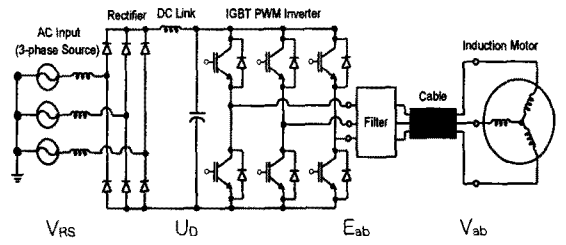


그림 1. 인버터 구동 유도전동기의 시스템 구성

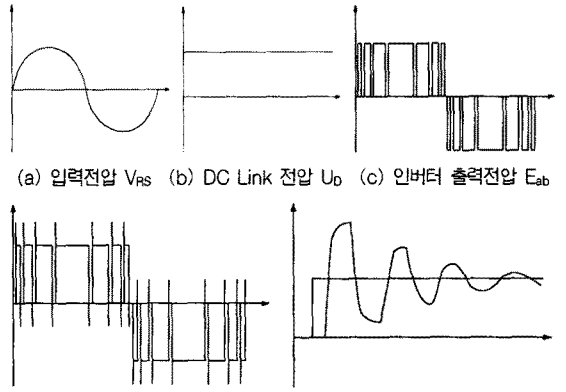


그림 2. 인버터 구동 유도전동기 시스템의 각부 전압파형

인버터 구동용 유도전동기에 대한 이러한 고정자 권선의 절연문제점을 해결하고자, 국내외적으로 인버터 스위칭시 발생하는 썬지전압의 크기 저감, 전동기 단자에 인가되는 전압상승율(dv/dt)의 억제, 과전압 저감용 필터설계 및 절연등급의 향상 기술 등에 관한 많은 연구결과가 발표되고 있으며, 대표적인 방법으로는 다음과 같은 것이 제안되고 있다.

- 인버터용 전동기에 적합한 새로운 고정자 권선 절연 시스템의 개발
- 권선에 사용되는 Magnet Wire의 절연강화
- 공극의 발생을 적극 억제하는 함침방법
- 단자에서의 과전압을 감소시키기 위한 인버터 출력 필터 채용
- 시스템의 전압을 낮게 설정
- 상승시간이 긴 가변속 드라이브의 사용
- 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이를 최적화 등

3. 절연특성 시험방법

3-1. 대상 전동기의 사양

인버터용 전동기에 대한 절연특성 시험을 위해서 제작한 유도전동기 고정자는 표 1과 같이 총 26基이며, 50 Hz, 4극, 310 V급이고, 절연등급은 최고 허용온도가 155 °C 인 F종 절연으로서 절연물은 Nomex를 사용하였다. 함침방법을 다르게 제작한 표준 Coil 사용 전동기 뿐만 아니라 국내에서 개발한 인버터 전동기 전용 전선과 Samica Film Taped Copper 전선을 사용한 고정자 권선도 제작하여 비교시험을 수행하였다.

표 1. 대상 전동기의 사양

권선종류	함침방법	전동기 번호	대 수	출력 [kW]	전압 [V]	적층길이 [mm]	주파수 [Hz]
표준 Coil (HRRW-H)	표준 1회	LG#1~LG#7	7	5.5	310	150	50
	표준 2회	LS#1~LS#3	3	5.5	310	150	50
	진공 1회	LV#1~LV#3	3	5.5	310	150	50
	진공 2회	LV#4~LV#6	3	5.5	310	150	50
Inverter 전용 Coil	표준 1회	LC#1~LC#3	3	7.5	220/380	120	60
Taped Coil	표준 1회	LI#1~LI#7	7	5.5	310	150	50

표준 Coil을 채용한 유도전동기 고정자 권선의 제작에 사용된 Enamel Wire(HRRW-H)는 $\phi 0.95$ [mm]이고, Slot Insulator, Wedge 및 상간 절연지는 T0.25의 NTN, 층간 절연지는 T0.35의 NTN, 바니쉬는 Solvent DVB-2318을 사용하였다.

3-2. 절연특성 시험의 종류 및 방법

3-2-1. 부분방전 시험 (Partial Discharge Test)

전동기 및 발전기 등의 회전기 고정자 권선에 대한 일반적인 부분방전 측정 회로도에는 그림 3과 같고, 본 연구에서는 Haefely Trench Tettex 제품의 Partial Discharge Detector(Model. TE571)를 이용하여 최대 부분방전 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)을 측정하였다.

에나멜 전선을 사용한 저전압 전동기의 경우에는 최초의 부분방전 개시전압이 중요하므로 잠음계와 1 [pC]이하의 Sensitivity가 필수적이므로 본 연구에서는 전원과 접지로부터 유입되는 외부잡음을 제거할 수 있도록 Radio Frequency Shield System 차폐실에서 실험과 Noise-Free Power Supply를 사용하여 부분방전의 정밀한 측정이 가능하도록 하였다.

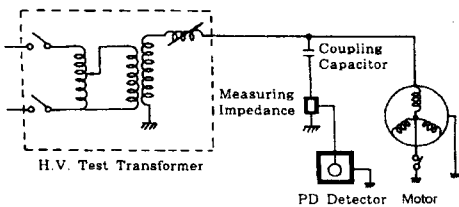


그림 3. 부분방전 측정 시스템의 구성

3-2-2. 교류전류(ΔI) 및 유전정접($\tan \delta$) 시험

교류전류 및 유전정접 측정을 위해 본 연구에서 사용한 장비는 Tettex의 Automatic Insulation Test System (Type. 2818-QA)으로서 전압인가와 함께 교류전류 및 $\tan \delta$ 를 동시에 측정하였다. 교류전류 시험을 통해 인가 전압에 따른 전류특성을 나타내는 전류변화율(ΔI)을 산출하였고, 유전정접 시험에서는 정격 상전압에서의 $\tan \delta$ 와 부분방전이 발생하지 않는 낮은 전압에서의 $\tan \delta$ 와의 차

이인 $\Delta \tan \delta$ (유전정접 변화율)를 파라메타로 사용한다.

3-2-3. 절연파괴 시험 (Breakdown Test)

본 연구에서는 전동기가 실제 운전중일 때 가해지는 스위칭 펄스에 따른 과도전압에 의해서 스트레스를 받아 절연파괴되는 현상을 분석하고자 통상적인 AC 또는 DC 내전압 시험 대신에 절연이 파괴되는 전압까지 모의 스위칭 펄스를 권선에 인가하는 펄스 파괴시험을 수행하였다.

그림 4는 실제 제작한 IGBT PWM 인버터의 블록도를 나타내고 있으며, 전원에 영향을 주지 않도록 절연변압기를 사용하였고, Diode 정류기, DC Link단 및 PWM 인버터로 주회로를 구성하였으며, 높은 주파수의 스위칭 써지전압을 전동기에 인가하기 위해서 고주파 변압기를 사용하였다. 그림 5는 고주파 변압기에서의 인버터 출력파형을 실측한 것을 나타내고 있으며 양극성(Bipolar) 펄스전압이므로 최고 13 [kV](peak to peak)까지 가능하다.

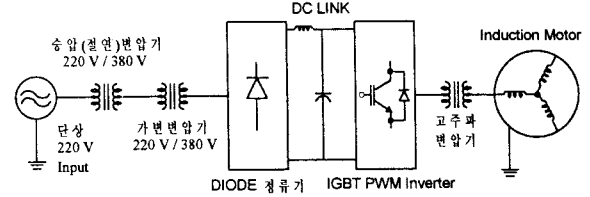


그림 4. 스위칭 서지전압 모의를 위한 인버터의 블록도

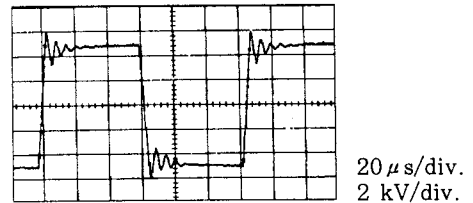


그림 5. 인버터 출력전압의 예 (V_{pp} : 12 kV)

4. 절연특성 시험결과

4-1. 교류전류 및 유전정접 시험결과 분석

권선(Wire) 종류와 함침방법을 다르게 제작한 6개 형태의 유도전동기 고정자 권선에 대한 교류전류 및 유전정접 시험결과를 그림 6과 그림 7에 나타내었다.

그림 6의 교류전류 변화율 ΔI_1 은 1,300 [V], ΔI_2 는 1,250 [V]에서의 전류값을 추정하여 산출한 것을 나타내고 있다. LG(표준전선 사용, 표준함침 1회) 및 LC (인버터 전용 전선, 표준함침 1회) 전동기의 ΔI 가 가장 큰 값을 나타내고 있으며, Samica Film Taped Copper Wire를 사용한 LI 전동기가 가장 작은 ΔI 값을 보여주고 있다. LS(표준전선 사용, 표준함침 2회)와 LV(표준전선, 진공함침 1회/2회)의 경우에도 ΔI 가 비교적 작게 나타남을 알 수 있다.

그림 7에서는 유전정접($\tan \delta$)의 변화율인 $\Delta \tan \delta$ 를 도시하였고, $\Delta \tan \delta 1$ 과 $\Delta \tan \delta 2$ 는 각각 1,300 [V] 및 1,250 [V]에서의 $\tan \delta$ 와 310 [V]에서의 $\tan \delta$ 와의 차이를 나타내고 있다. $\Delta \tan \delta$ 도 마찬가지로 LI 전동기의 값이 가장 작고, LS 전동기도 상당히 작음을 볼 수 있다. 반면에, LG 및 LV 전동기의 경우에는 $\Delta \tan \delta$ 가 매우 크다는 것을 볼 수 있다. 특이한 점은 진공함침을 1회한 것(LV#1, #2, #3)보다는 오히려 2회한 전동기(LV#4, #5, #6)의 $\Delta \tan \delta$ 가 전반적으로 더 큰 것을 볼 수 있다.

4-2. 부분방전 및 절연파괴 시험결과 분석

그림 8은 각각의 전동기별 부분방전 개시전압(DIV) 측정결과를 나타낸 것으로서, DIV_1, DIV_2 및 DIV_3는

각각 최대 부분방전 크기가 10, 100, 1,000 [pC]이 될 때의 인가전압을 나타내고 있다. LI 전동기의 DIV가 가장 큰 것을 볼 수 있고, 진공합침한 LV 전동기가 가장 낮은 DIV를 나타내어 가장 빨리 부분방전이 발생하는 것을 알 수 있다. 나머지 전동기는 비슷한 크기의 DIV를 나타내고 있다.

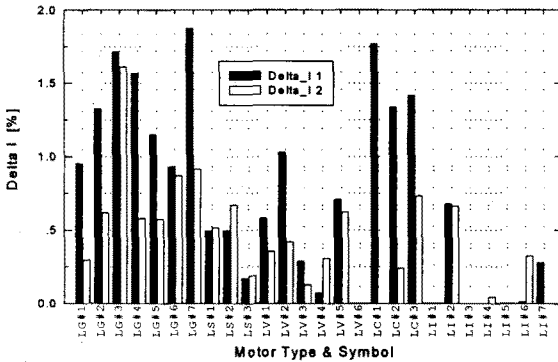


그림 6. 전동기별 교류전류 시험결과 (ΔI)

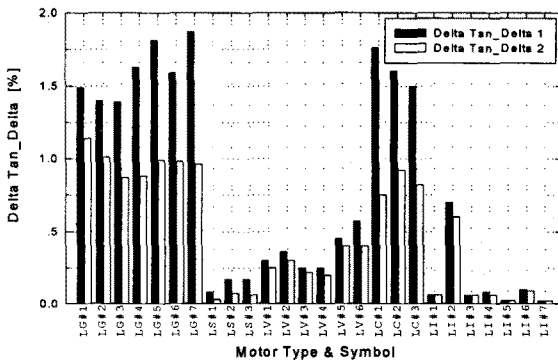


그림 7. 전동기별 유전정접 시험결과 ($\Delta \tan \delta$)

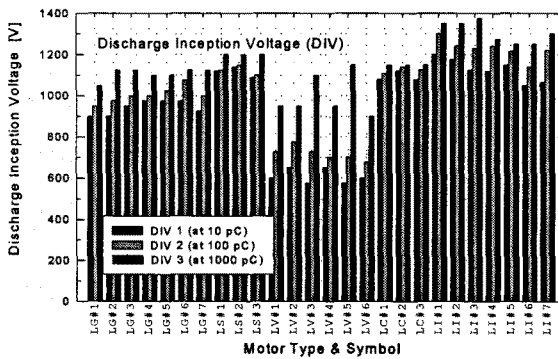


그림 8. 전동기별 부분방전 개시전압 측정결과 (DIV)

그림 9~11은 전동기별 최대 부분방전 크기를 나타낸 것으로서, 왼쪽 축은 검은 막대그래프(■), 오른쪽 축은 흰 막대그래프(□)를 나타내고 있다. LI 전동기가 모든 전압에서의 Qm값이 가장 작음을 볼 수 있고, LV 전동기의 경우에는 인가전압이 900 [V]와 1,000 [V]에서의 최대 부분방전 크기를 나타내는 Qm_1과 Qm_2가 가장 크게 측정되었다. LC 전동기는 Qm_1과 Qm_2의 경우에는 상당히 작은 Qm값을 나타내고 있으나, 1,200 [V]에서의 최대 부분방전 크기인 Qm_3는 급격히 커짐을 볼 수 있다. LG 전동기와 LS 전동기의 Qm값을 비교해 보면 인가전압 1,000 [V]까지는 진공합침 2회 처리한 LS 전동기의 최대 부분방전 크기가 상대적으로 매우 적게 측정

되었으나, 1,200 [V]에서의 부분방전 크기(Qm_3)는 비슷함을 볼 수 있다.

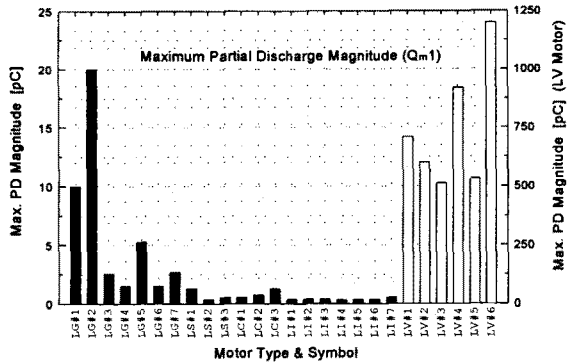


그림 9. 전동기별 최대 부분방전 측정결과 (Qm1)

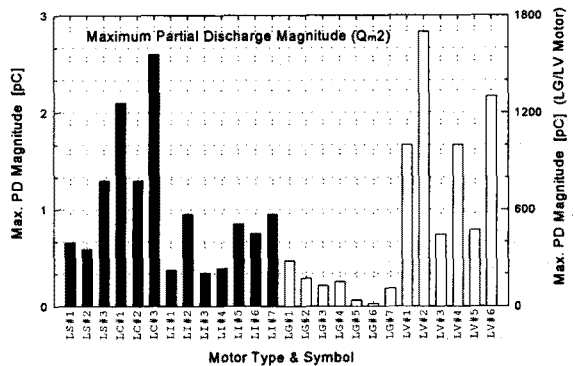


그림 10. 전동기별 최대 부분방전 측정결과 (Qm2)

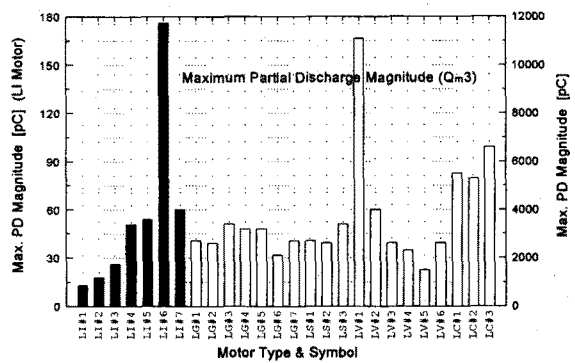


그림 11. 전동기별 최대 부분방전 측정결과 (Qm3)

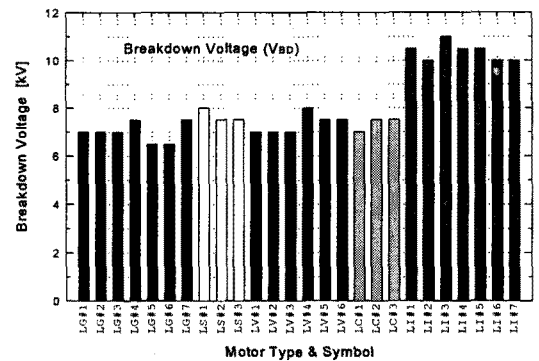


그림 12. 전동기별 절연파피 전압 측정결과 (VBD)

그림 12에 나타난 스위칭 썬치에 의한 절연파괴 전압은 LI 전동기가 10 [kV] 이상의 전압에서 파괴되어 절연이 가장 양호한 것으로 나타났고, 나머지 전동기는 대부분 7 [kV] 내외에서 파괴되었고, 표준합침 2회 및 진공합침 2회 처리한 전동기의 절연파괴 전압이 상대적으로 약간 높게 나타났다.

4-3. 시험결과 종합분석

이상의 시험결과를 요약하여, 전동기별로 수행한 각각의 절연특성 분석시험에 대해서 특성이 양호한 순서로 번호를 매겨 표 2에 나타내었다.

표 2. 전동기별 절연특성의 양호순서

Parameter Motor	교류전류 변화율	유전정점 변화율		부분방전 개시전압			최대 부분방전 크기			절연파괴 전압		
		ΔI_1	ΔI_2	ΔT_1	ΔT_2	DI V1	DI V2	DI V3	Qm 1		Qm 2	Qm 3
표준Coil 합침 1회 (7基)	LG	5	6	5	6	4	4	4	4	4	3	6
표준Coil 합침 1회 (3基)	LS	2	5	2	2	2	2	2	2	2	2	2
표준Coil VPI 1회 (3基)	LV	4	4	3	3	5	5	6	5	5	5	5
표준Coil VPI 2회 (3基)	LV	3	2	4	4	6	6	5	6	6	4	3
진공Coil 합침 1회 (3基)	LC	6	3	6	5	3	3	3	3	3	6	4
Taped Coil 합침 1회 (7基)	LI	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

표 2에서와 같이 Samica Film Taped Copper 전선을 채용한 LI 전동기의 절연특성이 모든 항목에 있어서 가장 좋은 것으로 나타났다. 국내에서 개발중인 인버터용 전동기 전용의 전선을 사용한 LC 전동기의 경우, 교류전류 및 유전정점 측정결과를 양호하지 않은 것으로 나타났지만, 최대 부분방전 크기(Qm)와 부분방전 개시전압(DIV)의 특성은 상당히 양호한 것으로 나타났다. 그러나 1,200 [V] 이상의 전압에서는 부분방전의 크기가 급격히 증가하여 큰 단점이 있음을 확인하였다.

동일한 표준전선을 사용했지만 합침횟수를 1회 및 2회로 다르게 제작한 LG 및 LS 전동기의 경우에는 예상했던 바와 마찬가지로 합침을 2회하여 제작한 전동기의 절연특성이 전반적으로 양호하게 나타났다.

진공합침(VPI)을 한 LV 전동기의 경우, $\Delta \tan \delta$ 와 ΔI 가 표준합침 1회 처리한 전동기보다는 절연특성이 좋게 측정되었으나, 표준합침 2회 보다는 특성이 좋지 못하였으며, 부분방전 시험결과는 다른 어떤 전동기 보다도 절연상태가 가장 좋지 않은 것으로 나타났고, 특히, 부분방전 개시전압의 경우에는 극히 불량한 것으로 측정되었다. 다만 진공합침 2회 처리한 전동기의 경우에는 1,200 [V]에서 측정된 최대 부분방전 크기인 Qm₃만이 비교적 적게 나타났다.

4-4. 절연내력 평가기준 설정

저압 유도전동기 고정자 권선의 경우에는 에나멜 전선을 사용하므로 부분방전이 거의 발생하지 않아야만 절연이 양호한 상태로 판정할 수 있다. 따라서 부분방전이 최초로 발생하는 전압의 크기가 중요한 파라미터로 취급된다.

표준 Coil을 사용하고 표준합침을 1회 처리한 LG 전동기에 있어서 10 [pC]에서의 부분방전 개시전압(DIV)을 기준으로 하면, 그림 8에서와 같이 850 [V]가 한계전압이 된다. 따라서 인버터 스위칭 썬치전압의 크기를 850 [V] 이하로 저감시켜야 함을 알 수 있다. 또한, 부분방전이 1 [pC] 미만으로 전혀 발생하지 않는 한계전압을 기준으로 하면 800 [V] 미만이 되어야 한다. 그러나 여기서 실효성을 의미하는 850 [V] 또는 800 [V]는 AC 60

[Hz] 정현파에 대한 기준이므로 PWM 스위칭 썬치전압의 상승시간에 따른 진행파 및 반사파에 기인하는 고정자 권선 내부에서의 전압상승은 고려되지 않았다.

그림 13과 그림 14는 표준합침을 1회 처리한 정격 310 [V]급 LG#1~LG#7 전동기에 대한 최대 부분방전 크기에 대한 전압별 분포를 자세히 나타내고 있다. 그림 13에서 LG#1의 정극성(+) Qm값을 제외하면, 인가전압이 900 [V]인 지점에서 10 [pC] 이상의 부분방전이 발생하는 전동기가 있음을 볼 수 있다. 따라서 유도전동기에 대한 공장에서의 최종 절연내력 평가시 900 [V]에서 10 [pC] 이상의 부분방전이 검출되지 않도록 해야 할 것으로 판단된다.

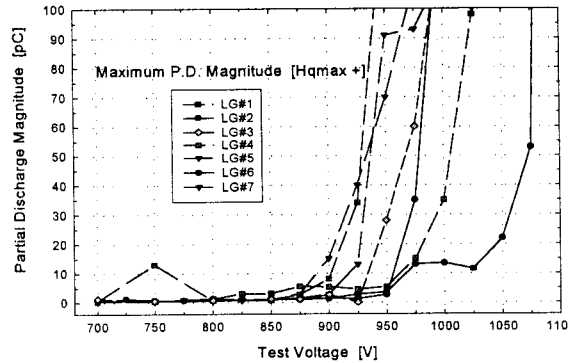


그림 13. 표준합침 1회 고정자 권선의 최대 부분방전 크기 분포 (Qm+)

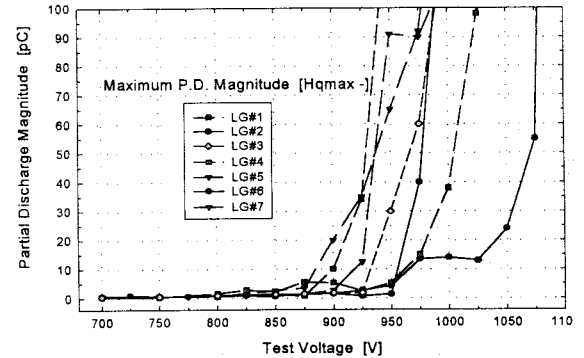


그림 14. 표준합침 1회 고정자 권선의 최대 부분방전 크기 분포 (Qm-)

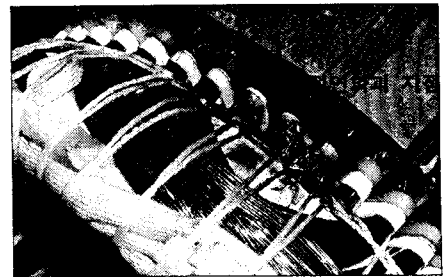


그림 15. 표준합침 1회 고정자 권선의 절연파피 (LG#6)

한편, 상(Phase)과 접지(Frame) 사이에 스위칭 썬치를 인가하여 수행한 절연파괴 시험에 있어서 절연파괴 메카니즘을 분석해 보면, 예상한대로 모든 전동기가 그림 15의 사진에서와 같이 슬롯출구(Slot Exit) 지점에서 절연파괴가 발생하였다. 이것은 슬롯출구 부분이 전계집중이 가장 심하기 때문이며, 따라서 이 부분의 전계완화와 절연보강 방법을 강구해야 할 것으로 사료된다.

5. 결론 및 향후의 과제

본 연구에서는 전선(Wire)과 함침방법을 다르게 제작한 6가지 종류의 엘리베이터에 채용되는 5.5 [kW]급 저압 유도전동기 고정자를 26基 제작하여 각각의 전동기별로 부분방전, 유전정접, 교류전류 시험과 스위칭 과도전압에 의한 절연파괴 시험을 수행함으로써 절연처리 방법에 따른 절연특성의 상세한 분석결과를 제시하였다.

또한, 저압 유도전동기 고정자 권선에 대한 부분방전 크기에 의한 절연내력 평가기준을 설정하기 위하여 고정자 권선의 절연에 손상을 주지 않는 한계전압으로서 IGBT PWM 인버터의 출력전압에 대한 제한치를 제시하였다.

이상과 같은 연구를 통해서 얻어진 주요 결과와 제안사항을 아래에 정리하였다.

1. 고정자 권선의 절연상태를 악화시키는 주된 요인인 부분방전이 5 [pC] 미만의 크기로 거의 발생되지 않도록 하기 위해서는 IGBT PWM 인버터의 스위칭 과도전압을 850 [V] 이하로 저감시켜야 한다.
2. 공장출고시의 최종 절연내력 평가시에는 외부잡음의 영향을 고려하여 부분방전 검출기로 측정이 가능한 크기인 10 [pC]이 인가전압 900 [V]에서 측정되면 절연상태가 양호하지 않은 것으로 판단된다.
3. 6가지 종류의 전동기 중에서 Samica Film Taped Copper 전선을 채용한 고정자 권선의 절연특성이 모든 측면에서 가장 좋은 것으로 나타났고, 국내 개발중인 인버터용 전동기 전용전선의 경우, 부분방전 특성은 대체로 양호한 것으로 나타났지만 그의 유전정접 등의 특성은 좋지 않게 측정되었다. 또한, 1,200 [V] 이상의 전압에서는 부분방전이 크게 증가하는 단점이 있다.
4. 절연파괴 시험을 수행한 모든 전동기가 전계집중이 심하여 전기적으로 가장 취약한 부분인 고정자 권선의 슬롯출구에서 절연파괴 되었으므로 이 부분에 대한 전계 완화와 절연보강이 요구된다.
5. 진공압력 함침(VPI) 처리한 전동기의 경우에는 예상과는 달리 절연특성, 특히 부분방전 특성이 매우 좋지 않게 나타나서 저압 유도전동기에서는 큰 효과를 기대하기 어려운 것으로 판단되었지만, 진공함침 방법상의 문제가 존재했는 지의 여부를 확인할 필요가 있다.
6. 표준전선을 사용하고 일반적인 표준함침을 2회한 전동기의 경우에는 전반적인 절연특성이 상당히 양호하게 나타나서 제작공정상의 용이함과 특성향상을 고려하면, 이 방법을 적극 권장하는 바이다.

향후의 당면과제로서는 PWM 전압파형에 따른 반사파 및 고조파에 의한 절연 스트레스 분석과 경년열화에 의한 고정자 권선의 절연상태 평가기술의 개발을 통해서 저가의 절연수명 예측 및 On-Line 진단 시스템의 개발이 필요하다. 또한, 펄스 상승시간, 전압상승 및 케이블 길이에 따른 절연특성의 변화와 절연파괴 메카니즘의 정밀한 분석 및 과전압(dv/dt)의 억제와 임피던스 Matching을 위한 저가의 인버터 출력필터(Series Reactor, LCR 필터 또는 R-C 필터) 개발이 필요할 것으로 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] A.H. Bonnett, "Available Insulation Systems for PWM Inverter-Fed Motors", IEEE IA Magazine, Vol. 4, No. 1, pp. 14-26, Jan./Feb. 1998.
- [2] Erik Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", IEEE T-IA, Vol. 28, No. 5, pp. 1095-1101, Sep./Oct. 1992.
- [3] Weijun Yin, "Failure Mechanism of Winding Insulations in Inverter-Fed Motors", IEEE EI Magazine, Vol. 13, No. 6, pp. 19-23, Nov./Dec. 1997
- [4] Christopher J. Melhorn and Le Tang, "Transient Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE T-IA, Vol. 33, No. 4, pp. 1065-1072, July/August 1997.
- [5] Annette von Jouanne and Prasad N. Enjeti, "Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate The Effects of Long Motor Leads in ASD Applications", IEEE T-IA, Vol. 33, No. 5, pp. 1138-1145, 1997.
- [6] A. Mabaye et al., "Electrical Stresses Applied to Stator Insulation in Low-Voltage Induction Motors Fed by PWM Drives", IEE Proc. EPA, Vol. 144, No. 3, pp. 191-198, 1997.
- [7] Weijun Yin, "Dielectric Properties of an Improved Magnet Wire or Inverter Fed Motors", IEEE EI Magazine, Vol. 13, No. 4, pp. 17-23, July/Aug. 1997.
- [8] A.H. Bonnett, "A Comparison Between Insulation Systems Available for PWM-Inverter-Fed Motors", IEEE T-IA, Vol. 33, No. 5, pp. 1331-1341, Sep./Oct. 1997.
- [9] Ressel J. Kerkman, et al., "Interaction of Drive Modulation and Cable Parameters on AC Motor Transients", IEEE T-IA, Vol. 33, No. 3, pp. 722-731, May/June 1997.
- [10] John M. Bentley and Patrick J. Link, "Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives", IEEE T-IA, Vol. 33, No. 2, pp. 342-358, Mar./Apr. 1997, Jan./Feb. 1997.
- [11] M. Kaufhold et al., "Failure Mechanism of the Interturn Insulation of Low Voltage Electric Machines Fed by Pulse-Controlled Inverters", IEEE EI Magazine, Vol. 12, No. 5, pp. 9-16, Sep./Oct. 1997.