

복합열화에 의한 형권 고정자권선의 절연신뢰성에 관한 연구

A Study on the Insulation Reliability of Form-Wound Stator Windings by Complex Degradation

이헌돈*, 김상걸*, 오현석*, 왕종배**, 김기준***, 이준웅****

(Heon-don Lee*, Sang-keol Kim*, Hyun-seok Oh*, Jong-bae Wang**, Ki-jun Kim***, Joon-Ung Lee****)

Abstract

PWM inverter-fed traction motor is able to occur problems by additive transient surge stress and harmonic loss in contrast with motor driven by 60Hz sine wave alternating source. Therefore in this paper, test method and standard of existed already were investigate, "thermal + electric" complex degradation test that considered additive degradation occurred by inverter drive carried out in order to obtain insulation reliability of traction motor driven by inverter. It seems that this test method confers large value of application at reliability estimation which the subject of complete motor not windings sample from now on.

Key Words(중요용어) : transient surge stress, harmonic loss, complex degradation, traction motor

1. 서 론

최근 전력전자 기술의 발달로 인해 유도전동기의 운전제어가 효율적으로 이루어짐에 따라 PWM 구동 방식의 인버터가 상당히 보급되고 있으며, 도시철도 차량에 사용되는 견인전동기 역시 인버터 구동 방식으로 설계되고 있다.^{1~2)}

그러나, 인버터 구동시에는 일반적인 60 Hz 정현파 교류 전원으로 구동되는 전동에서와는 다른 메카니즘으로 열화될 수 있다. 즉, 60 Hz 구동의 전동기에서 예기치 못했던 반사파 과전압에 의한 문제와 고조파에 의한 문제들이 발생되고 이에 따라 사고가 유발될 수 있다.^{3~4)} 이러한 문제점들은 주로 저전압, 소형 전동기를 운전할 때 발생할 수 있는 것으로, 세계적으로 이에 대한 연구가 주종을 이루고 있다.

따라서 본 연구에서는 PWM 인버터로 구동되는 전

동기의 절연신뢰성을 확보하기 위하여 기존의 시험 방법 및 규격을 검토하고, 인버터 구동시 나타나는 추가적인 열화로 발생하는 문제점을 고려한 복합열화 시험방법으로 형권 고정자 권선의 열화특성을 고찰하고 이 결과로부터 수명을 예측⁵⁾하여 장기 절연신뢰성을 확보하고자 한다.

2. 실험

2.1 권선샘플 제작

현재 철도차량용 견인전동기의 절연시스템은 사용 재료의 절감과 고온 고전압하의 절연에 대응하기 위해 폴리이미드(Kapton) 소선 절연과 실리콘 수지를 주체로 한 C종 즉 200 Class 절연의 적용이 확대되는 추세이고, 써어지 전압과 코로나에 의한 영향을 고려하여 비록 전동기의 정격전압이 1100V 이라 할 지라도 3300V급으로 설계되고 있다.

따라서 본 연구에서는 견인전동기의 복합열화 시험을 위해 200 Class 절연을 보증하는 주절연(소선절연), 대지절연, 엔드턴 절연구성을 구성하여 silicone

* 광운대학교 전기공학과

** 한국철도기술연구원

*** 인천전문대학교 제어계측과

**** 한국전기전자재료학회장

수지의 VPI 함침처리를 통해 권선샘플을 제작하였고, 이에 적용된 절연절차 및 재료의 특성은 표 1에, 실험에 이용된 권선샘플은 그림 1에 나타내었다.

표 2.1 권선전동기용 200 Class 절연재료의 특성

| 품명 | 사양 및 규격 | |
|--------------------|------------------------|-----------------------------------|
| 1. 200class 절연자재 | 소선절연물 | Kapton코팅처리 |
| | 대지절연물 | Kapton Film Nomex-aramid paper |
| | 주절연물 | Silicone resin |
| | 슬롯웬지 | Epoxy-glass tape 적층판 |
| | 모의철심용 동판 | 두께: 1.5 mm |
| 2. 절연처리 및 형코일 샘플제작 | 턴절연 시험용 인출선 처리 | 소선별 인출선 절연보강 처리 |
| | 모의철심을 가진 샘플코일 제작 | 동판슬롯구조의 모의 철심 및 형코일 샘플 제작 |
| 3. VPI 함침처리 | Silicone Resin 진공함침 | 함침 60°C-3hr 건조 200°C-16hr |

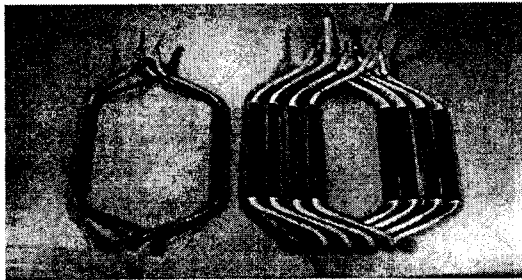


그림 2.1 권선 샘플

2.2 복합 열화 시험

2.2.1 기준전압 레벨 결정

IEEE 792-1987에 따라 상승시간 0.7μsec일 때의 반사파 비율 1.3배를 고려하여 1,270V_{rms}를 기준 전압 1 pu로 결정하였고, 각 상권선 초입부분의 대지절연은 이 전압을 경험하게 된다.

2.2.2 PWM 임펄스 전압모의

반사파 과전압은 주로 PWM 운전시 문제로 되며 전동차의 주행패턴을 고려할 때 전체 운행시간의 1/3정도를 차지한다. 따라서 전동기 수명 25년 동안의 PWM 펄스전압 모의는 반사파 과전압 열화가 수십 kHz까지는 인가 주파수에 선형적으로 비례하는 것으로 알려져 있으므로, 임펄스 파형의 주파수를 kHz 단위로 높여 가속 열화시킬 수 있는 인버터 모의전원을 이용한다.

따라서, 전동기 작동시에 발생하는 스위칭 임펄스

전압을 모의하기 위해, 각 열화 주기마다 5년 동안의 운전 임펄스 모의 전압을 인가한다. 이 모의 전압은 하루에 20번 전동기가 동작된다고 보면 5년간 36,000번의 파도가 0.1~0.2μs인 스위칭 임펄스가 인가되는 것이므로, 60Hz 교류전압으로 환산하여 전압 레벨 2의 조건인 3.25pu (= 4.1 kV_{rms})로 10분간 인가하게 된다.

2.2.3 열화 조건 및 주기 선정

본 연구에서는 4개의 열화그룹으로 나누어 표 2에 있는 열화주기에 따라 복합열화를 수행하였다.

표 2.2 열화조건 및 주기

| 그룹 | 전압 열화 | 열 열화 | 열화 주기 [일] | | | | | |
|----|---------------------------------|------------------|-----------|---|---|----|----|----|
| | | | 0 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |
| 1 | 4.5 kV _{rms} (3 레벨) | 235 °C (3 레벨) | 0 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 |
| 2 | 4.5 kV _{rms} (3 레벨) | 상온 (0 레벨) | 0 | X | 8 | 16 | 32 | 64 |
| 3 | 전압인가 없음.(0 레벨) | 235 °C (3 레벨) | 0 | X | 8 | 16 | 32 | 64 |
| 4 | 3.8 kV _{rms} (1 레벨) | 215 °C (1 레벨) | 0 | X | X | 16 | 32 | 64 |

1) 전압열화 수준 1=3pu=3.8kV_{rms}

전압열화 수준 3=3.5pu=4.5kV_{rms}

2) 온도열화 수준 1=215°C, 수준 3=235°C

2.2.4 임펄스 절연파괴 시험의 조건

최저 허용전압 수준은 일반적으로 임펄스 내전압 레벨을 교류 내전압의 3 배로 보는 경우가 많으므로, 본 연구에서는 임펄스 절연파괴 스텝 시험의 시작 전압을 대지절연에 대해 5pu(9.0kV_{peak})로 결정하였다.

2.2.5 시험 절차

이상과 같이 선택한 열화 조건 및 임펄스 시험전압을 이용한 열/전압 복합시험 절차는 그림 2와 같다.

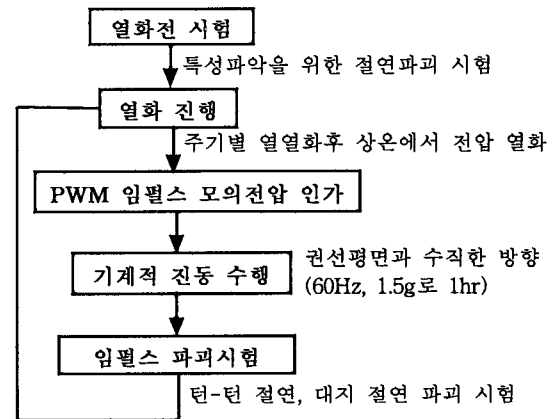


그림 2.2 복합열화시험 절차

3. 실험결과 및 검토

3.1 절연저항 특성

그림 3.1은 DC 1000V를 인가한 경우 열화 주기에 따른 각 그룹 별 절연저항 1분값의 변화를 나타낸 것이다.

그림에서 보는 바와 같이 절연저항 값이 열화 주기에 따라 증가하다가 32일을 경계로 다시 감소하는 경향이 나타나는데, 이는 제작된 샘플의 미경화가 32일까지의 열화기간을 거치면서 완전 경화상태로 됨에 따라 오히려 구조적인 안정화가 이루어졌음을 알 수 있다. 그리고 32일 이후로는 복합열화에 따른 절연재료의 열화로 인해 절연저항값이 감소하여 나타났고, 64일 까지의 열화기간 동안 측정값이 절연저항의 합격기준인 10[MΩ]이하로 감소하지 않았으므로 절연상태가 양호하다고 판단된다.

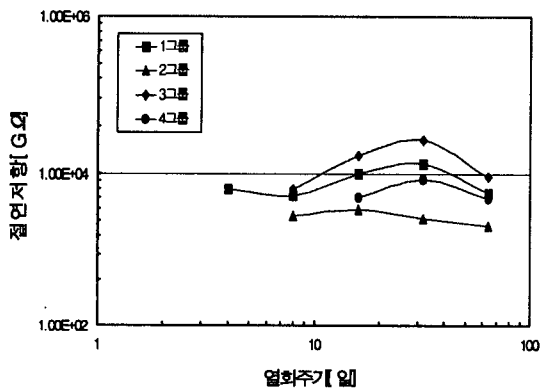


그림 3.1 절연저항 1분치 비교

3.2 성극지수 특성

그림 3.2는 각 열화 그룹의 열화주기별 성극지수를 나타낸 것으로 성극지수는 절연저항 1분값과 10분값의 비이다. 이 성극지수는 권선 상태와 절연등급 및 기기 형식에 따라 1~7까지로 나누는데, 보통 2 이상이면 양호한 것으로 판단한다.

특히 절연저항값은 온도 및 습도에 많은 영향을 받기 때문에 성극지수로 절연 상태를 파악하는 경우도 있다.

그림에서 알 수 있듯이 각 그룹별 열화주기에 따른 성극지수도 절연저항과 마찬가지로 32일을 경계로 증가하다가 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 64일의 열화기간 동안 성극지수가 2 이상이므로 절연상태가 양호하다는 것을 알 수 있었다.

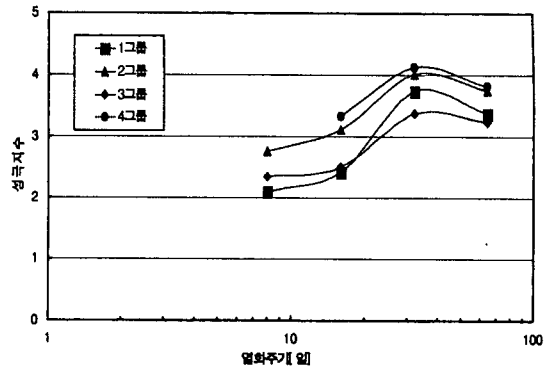


그림 3.2 열화주기별 성극지수(PI)의 비교

3.3 유전손실 특성

그림 3.3은 열화주기 32일 때에 각 그룹별 인가전압에 따른 유전손실 특성을 나타낸 것으로 인가전압이 증가함에 따라 유전손실이 미소한 증가를 보이는데, 이는 절연물 중의 공극내 부분방전으로 인하여 방전전류가 흘러 전력손실이 생긴 것으로 설명될 수 있다.

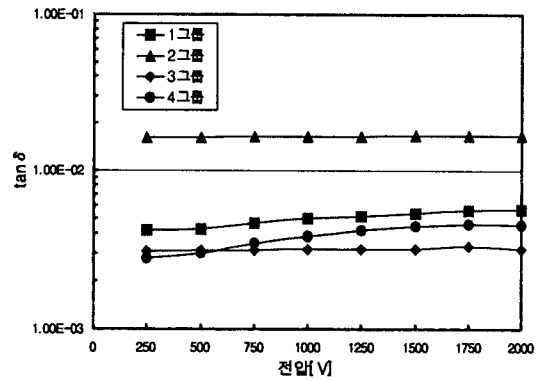


그림 3.3 인가전압에 따른 유전손실 특성

그리고 그림 3.4에 DC 1000V를 인가하였을 때, 각 그룹별 열화주기에 따른 유전손실 특성을 나타내었다. 그림을 살펴보면 열화주기가 증가함에 따라 유전손실이 증가하는 경향을 보여주는데, 이는 열화주기의 진행에 따른 절연성능의 저하로 유전손실이 증가하는 것으로 사료된다.

또한, 열적 열화만 준 3그룹보다 2그룹의 유전손실 ($\tan \delta$)이 높게 나타나는데, 이는 절연저항과 마찬가지로 유전손실 또한 열적 열화보다 전기적 열화에 지배적이라고 사료된다.

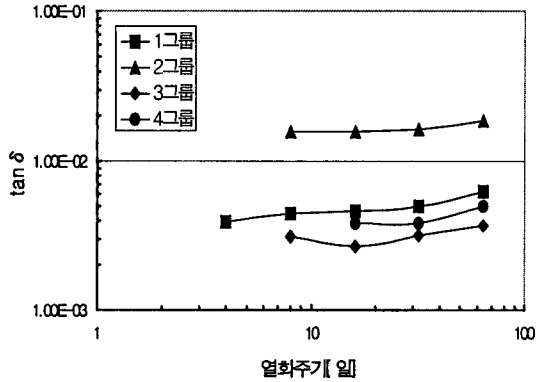


그림 3.4 각 그룹의 열화주기별 유전손실 특성

3.4 수명예측

그림 3.5는 복합열화에 의한 형권 고정자 권선 샘플의 장기수명 곡선을 나타낸 것으로, 먼저 가장 열악한 조건인 전압레벨 3수준(4.5kV_{rms})과 열적열화레벨 3수준(235℃)이 적용되는 그룹 1은 150일의 예상 수명이 도출된다. 이것을 온도와 전압을 고려하여 살펴보면, 온도의 경우 10[℃] 수명 반감법칙에 따라 220[℃]일 때에는 두 배 즉, 300일 이상의 예상수명이 기대된다. 또한 실제 전동기 운전시의 온도인 180[℃] 정도로 환산하면, 220[℃]의 16배 즉, 4800일로 생각할 수 있는데, 여기에 전압에 의한 반감을 고려하면 다시 2배가 되어 9,600일(약 26년) 이상의 수명이 기대되고, 현재 국내 도시철도차량에 사용되는 견인전동기는 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200kW급 3상 농형 유도전동기로 열악한 운전 환경과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전수명을 보장하여야 하는데, 실험 결과 이를 만족하므로 장기신뢰성을 기대할 수 있다.

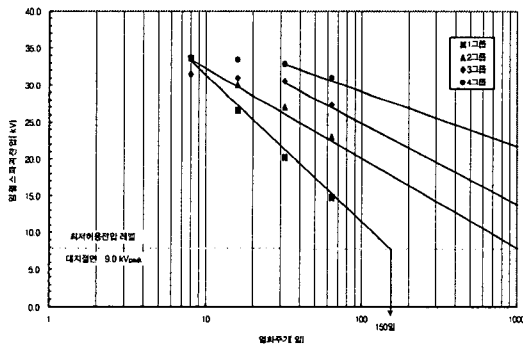


그림 3.5 복합열화 시험에서 장기수명 곡선

그리고 1그룹 보다 열화레벨이 낮은 2, 3, 4 그룹 또한 25년 이상의 수명이 보장된다고 할 수 있으므로 만족할 만한 장기 신뢰성이 보장된다고 할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 인버터 구동 견인전동기의 절연신뢰성을 보장하기 위해 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 고조파 손실과 과도전압의 문제점을 고려하였으며, 열+전기 복합열화 시험을 통해 형권 고정자 권선의 절연신뢰성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 절연저항특성 및 성극지수

- 절연저항값이 32일을 경계로 증가하다 다시 감소하는 경향을 보이는 것은 제작된 샘플의 미경화가 32일 까지의 열화기간을 거치면서 완전경화 상태로 구조적인 안정화가 이루어졌음을 알 수 있었다.

- 64일 까지의 열화기간 동안 측정값이 절연저항의 합격기준인 10[MΩ]이하로 감소하지 않았고 성극지수 또한 2이상이므로 절연상태가 양호하다고 판단된다.

2. 유전손실(tan δ)특성

- 인가전압의 증가에 따른 유전손실의 증가는 절연물 중의 공극내 부분방전으로 인하여 방전전류가 흘러 전력손실이 생긴 것으로 사료된다.

- 열화주기에 따라 절연성능의 저하로 유전손실의 증가를 나타내었다.

3. 수명예측

- 모든 그룹의 예상 수명이 25년 이상을 보장하므로 장기신뢰성을 확보할 수 있었고, 향후 샘플 권선이 아닌 전동기 완성품을 대상으로 한 절연신뢰성 평가에 활용가치가 클 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) IEEE 792-1987, Trial-use recommended practice for the evaluation of the impulse voltage capability of insulation systems for AC electric machinery employing form-wound stator coils.
- 2) NEMA Standard MG-1Part 30.
- 3) Satoshi Ogasawara, "가변속 AC drive의 누설전류, 써지전류, 써지전압, 축전압과 그 대책", 日本電學論D, 118권 9호, pp.975-980, 평성 10년.
- 4) 한국철도기술연구원, '98 도시철도차량 표준화, 국산화연구:추진제어장치연구개발(전동차 AC 견인전동기 표준설계).
- 5) 일본규격협회, "전기전자부품의 수명진단", 1991.