

철도차량용 견인전동기의 수명예측 및 절연신뢰성 평가 방법에 관한 연구

왕종배*, 김상걸**, 이헌도**, 오현석**, 김기준***
 *한국철도기술연구원, **광운대학교, ***인천전문대학

A Study on the Evaluation of Reliability and Expected Life for the Insulation System of Traction Motors in Urban Transit E.M.U

Jong-Bae Wang*, Sang-Keol Kim**, Heon-Don Lee**, Hyun-Seok Oh**, Ki-Joon Kim***
 *Korea Railroad Research Institute, **Kwangwoon Univ., Junior College of Incheon

Abstract - When the traction motor for urban transit E.M.U is driven with VVVF controlled inverter, the insulation degradation factors on the 200 Class insulation system of VPI process are analyzed with considering dielectric, mechanical properties, thermal stability, chemical resistivity and compatibility. A new test method of complex accelerating degradation is proposed to evaluate the insulation reliability and the long-term life including harmonic loss and transient surge stress due to PWM inverter drive

1. 서 론

신속, 대량, 정시 수송을 장점으로 하는 도시철도는 사람의 수송을 그 목적으로 하기 때문에 운행의 안전성과 신뢰성이 그 무엇보다 중요하며, 특히 도시철도차량의 추진제어장치에 사용되는 견인전동기의 고장이나 사고는 곧바로 열차운전 정지를 초래하게 된다.

최근 IGBT와 같은 대전력 고속 스위칭에 의한 인버터의 성능개선과 VVVF 제어에 의한 유도전동기의 효율적인 운전이 가능하게 되면서, 국내 도시철도차량에 사용되는 견인전동기 역시 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200kW급 3상 농형 유도전동기를 표준사양으로 선정하여 열악한 운전환경(진동, 고온, 먼지, 철분, 기름 등)과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다.

그러나 PWM 인버터 구동은 견인전동기에서 추가적인 고조파 발열손실과 소음, 진동을 초래하며 더욱이 고속 스위칭에 의한 과도전압과 빠른 상승시간을 가진 반복 과전압은 인버터와 전동기를 연결하는 케이블 공진현상에 의해 배가되어 정현파 구동시에 예상할 수 없었던 매우 커다란 스트레스를 절연시스템에 가하게 되어 견인전동기의 성능특성과 예상수명에 심각한 영향을 미치고 있다.

따라서 기존 운영중이거나 향후 도입예정인 인버터 구동 견인전동기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 가속열화 수명평가법의 개발과 장기 신뢰성 평가 기법의 정립이 절실히 필요한 상황이다.

2. 견인 전동기의 열화기구

철도차량용 견인전동기는 고속화, 대용량화로 인한 설계전압의 상승, 빈번한 기동과 정지로 반복되는 냉열 사이클, 매우 가혹해진 열적, 기계적, 환경적 스트레스의 영향을 복합적으로 받고 있으며, 특히 견인전동기 사고 중 절연파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데 이는 부분방전을 포함한 절연열화와 관련된 사고발생기구가 지배적이며 여기에 기계적 진동과 환경적 요인이 복합된다.

2.1 일반적인 전동기 열화

견인전동기 절연시스템이 운전중에 받는 일반적인 열화요인을 검토하여 이를 표 1에 요약하였다.

표 1. 전동기의 일반적인 열화요인과 열화현상

| 열화요인 | 열화현상 | |
|--------|-----------|---|
| 열적 열화 | · 일상적 운전 | · 화학적 변화에 의한 절연층 열화 |
| | · 과부하 운전 | · 보이드나 바리의 생성 |
| 전기적 열화 | · 대지전압 | · 권선단부나 케이블 분리, 왓지 느슨 |
| | · 써이저 전압 | · 부분방전에 의한 절연체 내부 침식 tracking, treeing |
| 기계적 열화 | · 전자력, 진동 | · 반복 펄스 열화 |
| | · 냉열 사이클 | · 절연층 바리 또는 균열, 마모 |
| 환경적 열화 | · 화학약품 | · 권선 고정부 및 지지재료 분리 |
| | · 기름 | · 화학적 변화에 의한 용해 |
| | · 도전성 오손 | · 열평창에 의한 바리, 가수분해 |
| | · 흡습, 흡수 | tracking |
| | | · 덕트 마힘으로 인한 온도상승 |

2.2 인버터 구동시의 추가 열화

견인전동기의 절연구성에서 전압부담은 권선간(층간) 절연, 상간절연, 대지절연으로 나누어지며, 구조적으로 보면 슬롯부 절연, 코일엔드부 절연, 접속부 및 리드선 절연으로 나눌 수 있다. 최근의 인버터 구동에 의한 비-정현파 전압의 사용으로 커다란 전자기적 충격이 열화과정에 포함되면서 인버터 구동시의 추가 스트레스를 포함한 상호연관된 열화메카니즘의 검토가 필요하다.

(1) 고조파의 발생과 영향

인버터 출력전압에 포함된 고조파는 손실증가, 온도상승, 소음, 진동 및 EMI 등의 문제를 일으킨다.

① 전동기 과열 현상 : 고속 one pulse 운전시 저차 고조파로 인한 동손증가와 저속 PWM 변조시 고차 고조파로 인한 deep bar effect 손실은 전동기의 과열을 초래하므로 한 등급 상위의 절연등급을 갖는 전동기를 사용할 필요가 있음.

② 토오크 맥동 : 운전 주파수와는 다른 저차 고조파 토오크의 발생은 전동기의 진동과 소음을 유발하고 주로 절연물의 기계적인 충격이나 마모 손상을 입힘.

③ 자기적(magnetic) 및 구조적 불균일함 : 모든 전동기에서 이러한 불균일함이 상당히 존재하며, 특히 인버터 파형에 포함되어 있는 고주파에서는 더욱 더 심해지며 이 문제에 대한 분석은 상당히 복잡함.

④ 전자파 방해(EMI) : 높은 IGBT 스위칭 속도는 광대역의 EMI를 유발시키며, 이로 인해 제어와 기타 전자회로장치에 간섭을 일으킬 수 있음.

(2) 반사파 과전압에 의한 열화

인버터 구동 전동기 단자에 인가되는 반사파에 의한 과전압은 '인버터-케이블-전동기'로 구성되는 특수성으로 인해 나타나는 현상으로 그 원인 및 문제점을 요약하면 다음과 같다.

① 전동기 단자의 과전압 발생 : IGBT와 같은 고속 스위칭 소자는 큰 전압상승 dV/dt를 나타내며 인버터와 전동기를 연결하는 케이블이 길어지면 반사파 공진이 발생하여 인버터 직류단 전압의 거의 두 배에 달하는 과전압이 전동기에 가해진다. 이 과전압은 일종의 충격파로

전동기 권선의 초입부분에 집중되어 부분방전을 일으키고 치명적인 절연열화 또는 절연파괴를 유발한다.

② 전동기 베어링 전류 문제 : 전압상승을 dV/dt 가 높을 때 축전압이 상승하여 베어링 부위에 누설전류가 크게 흐르면 베어링 절연부의 파괴가 발생하고 이로 인해 베어링에 흠집을 만들어 열화시키게 됨.

③ 접지 전류 : 높은 dV/dt 가 전동기 권선과 전동기 프레임 사이의 커패시턴스와 관련되어 접지 도체부로 회귀하여 흐르는 큰 전류가 유발됨. 이 전류로 인해 전동기로 연결된 케이블의 전선관을 가열시키고 보호 접지전류 릴레이를 동작시키게 됨.

3. 절연신뢰성 평가 및 수명예측

3.1 기존의 절연신뢰성 평가

표 2는 현재까지 제시된 전동기 개발 단계의 신뢰성 평가와 장기 수명예측을 위한 각종 규격을 요약한 것으로서, 권선샘플(모터렛)이나 완성 전동기를 대상으로 일련의 열적 스트레스, 기계적 스트레스 및 흡습이나 침수 이후 전기적 스트레스를 주기적으로 인가하는 가속열화를 통해 수명을 평가하고 있다. 이때 열적열화는 10℃ 수명 반감칙을 적용하며, 전기적 스트레스는 60Hz 정현파 교류나 간헐적인 임펄스 인가로만 제한된다.

표 2. 기존 절연신뢰성 평가관련 규격 요약

| 규격 | 중요 내용 |
|------|--|
| IEC | 34-18 Sect.31 Test procedures for form-wound winding - Thermal evaluation and classification of insulation systems used in machines. 전동기 형권의 열적 열화 수명평가 시험으로서 절연등급에 따른 열열화→진동시험→습기/침수 시험→전압시험→진단시험의 주기적 시험 진행. |
| | 34-18 Sect.32 Electrical evaluation and classification of insulation systems used in machines. 전동기 형코일의 전기적 열화 수명평가 시험으로서 전압 레벨에 따라 전기적 열화→전압시험(주절연/권선간)→진단시험의 주기적 시험 진행. 절연파괴자료의 Weibull 분포를 이용하여 전동기의 전기적 열화 수명을 평가함. |
| | 34-15 Impulse voltage withstand levels of rotating a.c. machines with form-wound stator coils. 전동기 형코일의 상-대지간 임펄스 전압 내리 평가를 위한 샘플 코일의 주절연과 턴간 절연에 인가되는 임펄스 전압시험 절차 및 전압 규정. |
| IEEE | 275 Recommended practice for thermal evaluation of insulation systems for AC electric machinery employing form-wound preinsulated stator coils for machines rated 6,900 V and below 전동기 형코일 절연에 대한 정격 온도에서의 예상수명 판단. IEC 34-18-31과 유사. |
| | 522 Guide for testing turn-to-turn insulation on form-wound stator coils for AC rotating machines 전동기 형코일의 턴간 절연에 대한 낙뢰 및 스위칭 서여지의 인가전압파형 규정. IEC 34-15 보다 구체적으로 임펄스 전압파형을 정의. |
| | 792 Trial-use recommended practice for the evaluation of the impulse voltage capability of insulation systems for AC electric machinery employing form-wound stator coils 전동기 형코일의 대지절연 및 턴간 절연에 대한 임펄스 시험 및 예상수명 판단. IEEE 275에 기술된 열 및 전기적 열화를 수행한 후 진동 및 임펄스 시험 실시하고, IEEE 522에 나타난 임펄스 파형을 이용하여 절연파괴 시험 실시. |

3.2 인버터 구동의 복합열화 절연신뢰성 평가

최근 인버터 구동에 따른 전동기 절연시스템의 고조파와 반사파 과전압 문제에 관해 IEC 792나 NEMA MG-31 등의 규격에서 시험적인 시도를 소개하고 있지만, 불행히도 수kHz를 넘는 고속 스위칭시 권선절연의 안전한계와 예상수명을 보장하는 과도최대반복전압(V_m)과 상승율(dV/dt)을 규정하지는 못하고 있다. 또한 이들 규격은 저전압 비형권 전동기를 대상으로 한 것으로서 사용재료와 절연구성이 현저히 다른 고정자 형코일 권선의 견인전동기에 대해 이를 그대로 적용하기는 어려운 실정이다.

따라서 본 연구는 권선샘플을 이용한 200Class 절연에 대한 열적 열화와 PWM 인버터 과전압 파형을 모의한 전기적 열화를 복합하여 수행할 수 있는 새로운 절연신뢰성 및 수명평가법을 제안한다.

(1) 열적 열화 수명평가

10℃ 수명반감칙에 의거한 열적 열화시험은 최고 허용온도 보다 높은 온도에서 각 선택 온도 차이가 20℃ 이상이 되도록 3가지 이상의 온도에서 열화시켜야 한다. 열화온도를 높게 선택하면 시험기간은 단축되지만 신뢰성에 대한 오차가 늘어나므로 적절한 온도를 선택하여 신뢰성과 시험시간에 대한 잇점을 살려야 한다.

현재 200class 형코일 권선샘플 절연에 대해 230℃ -17.5일, 250℃-5일, 270℃-1.5일 주기를 선정하여 총 10주기의 열적 열화 시험을 진행중에 있다.

(2) 열+전기 복합열화 수명평가

① 기준 전압 레벨(pu) 결정

그림 1은 dc link 전압 1500V 인가시 견인전동기 단자에서의 과도전압 파형으로 최대 피크전압 V_m 은 2700V이고 상승시간은 0.7μs 정도로 전형적인 IGBT 구동시의 특성을 보여주고 있다. IEEE 792-1987에 따라 그림 2에서 상승시간 0.7μsec일때의 반사파 비율 1.3배를 고려하여 전기적 열화에 필요한 기준 전압레벨(pu)을 산정하면

1) 인버터 출력 피크 전압

$$U_{peak} = 1,500V(\text{가선}) + 600V(\text{spike전압}) = 2,100V$$

2) 반사파를 고려한 전동기 입력의 순간 피크전압

$$U_{Lpeak} = 1.3 \times 2,100 V = 2,700V$$

3) 인버터 구동 전동기 입력의 상 피크전압 변환

$$U_{Ppeak} = 2,700V \times 2/3 = 1,800V$$

4) 인버터 구동 전동기 입력의 상 실효전압

$$U_{Prms} = 1,800V / 1.414 = 1,270V_{rms}$$

로 계산된 1,270V_{rms}가 1 pu로서 기준 전압이며, 각 상 권선 초입부분의 대지절연은 이 전압을 경험하게 된다.

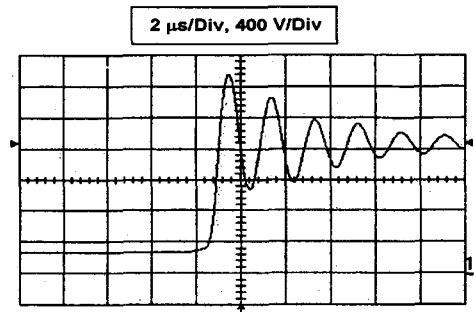


그림 1. 200kW, 1100V (1500Vdc) 견인전동기의 PWM 인버터 구동시 단자간 과전압 파형

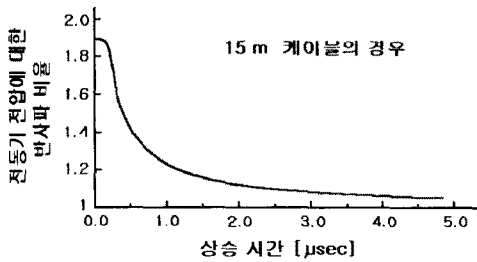


그림 2. 상승시간에 따른 반사파 과전압 비율

② PWM 임펄스 전압 모의

반사파 과전압은 주로 PWM 운전시 문제로 되며(최대 스위칭 주파수 800Hz) 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.

③ 열화 조건 및 주기 선정

| 그룹 | 전압 열화조건 | 열적 열화조건 | 열화 주기[일] | | | | | | | | | |
|----|-------------------------------|----------------|----------|---|---|----|----|----|-----|-----|--|--|
| 1 | 4.5kV _{rms} (3수준) | 235°C (3수준) | 0 | 4 | 8 | 16 | 32 | 64 | | | | |
| 2 | 4.5kV _{rms} (3수준) | 상온 | 0 | | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | | | |
| 3 | 전압인가 없음 | 235°C (3수준) | 0 | | 8 | 16 | 32 | 64 | 128 | | | |
| 4 | 3.8kV _{rms} (1수준) | 215°C (1수준) | 0 | | | 16 | 32 | 64 | 128 | 256 | | |

- 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
- 4) 시험절차

- 1) 열화시험: 특정 파악을 위한 절연파괴 시험
- 2) 열화진행: 주기별 열 열화후 상온에서 전압 열화
- 3) PWM 임펄스 모의전압 인가
- 4) 기계적 진동 인가
- 5) 임펄스 파괴시험(턴-턴절연, 대지절연)
- 6) 각 그룹별 나머지 시료에 대하여 2)~5)항 반복

(3) 수명 예측

이상과 같은 방법으로 인버터 구동 견인전동기의 열/전압 열화 시험을 수행한 후, 턴-턴 절연 및 대지 절연에 대해 각각 새로 축을 임펄스 파괴전압, 가로 축을 열 열화 일수로 하여 각 열화 그룹별로 plotting하고 직선을 그어 최저 허용전압 수준과 만나는 점을 표기하면 이 점이 열, 전기 복합열화에서의 예상 수명이 된다.

최저 허용전압 수준은 일반적으로 임펄스 내전압 레벨을 교류 내전압의 3 배로 보는 경우가 많으므로, 본 연구에서는 임펄스 절연파괴 스텝 시험의 시작 전압으로 고려하여 턴-턴 절연에 대해서는 3pu(5.4kV_{peak})로, 대지절연에 대해서는 5pu(9.0kV_{peak})로 결정하였다.

그림 3은 각 그룹들 간의 예상되는 관련성을 나타낸 것으로, 실제 시험에서 이러한 직선 비례적인 결과가 나온다면 열/전압 복합 열화가 적절히 수행된 것으로서 열적 열화와 전기적 열화 각 그룹간에 확실한 연관성을 갖는다고 볼 수 있다.

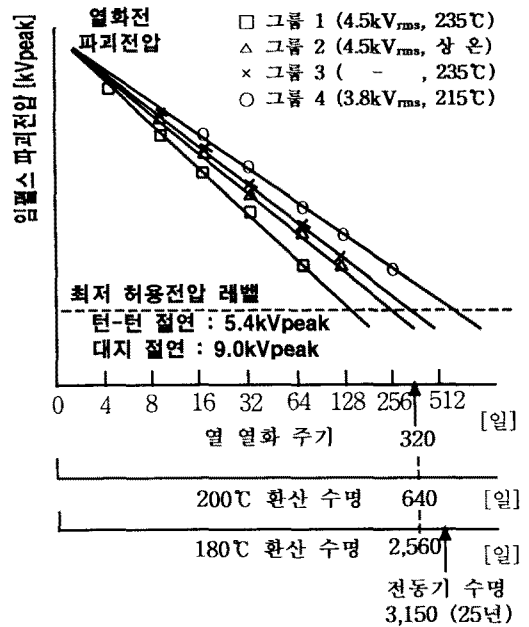


그림 3. 복합 열화시험에 의한 장기수명 평가 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 철도차량용 견인전동기가 인버터로 구동될 때 고조파로 인한 발열, 진동 등의 열화 문제와 PWM 반사파 과전압을 분석하였고 기존 규격의 문제점을 검토하여 인버터 구동시의 추가 스트레스를 포함한 새로운 복합열화 가속시험법을 제시하였다. 본 연구에서 제시한 시험, 평가법은 200 Class 고정자 형코일 권선 구조를 가진 철도차량용 견인전동기 개발단계의 절연신뢰성 평가와 장기 예상수명을 평가하는데 적용할 수 있는 것으로 기대되며, 향후 환경조건을 포함하여 샘플링선이 아닌 전동기 완성품을 대상으로 한 절연신뢰성 평가 및 고장진단에서 활용 가치가 클 것으로 사료된다.

(참고 문헌)

- [1] Austine H. Bonnett, "Analysis of the Impact of PWM Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.32, No.2, pp.386-392, 1996
- [2] A. Jouanne, etc, "Filtering Techniques to Minimize the Effect of long Motors Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive System", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol.32, No.4, pp.919-925, 1996
- [4] Satoshi Ogasawara, "가변속 AC drive의 누설전류, 써지전압, 축전압과 그 대책", 日本 電學論D, 118권 9호, pp.975-980, 평성 10년
- [5] Paul T. Finlatson, "Output Filters for PWM Drives with Induction Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- [6] Austien H. Bonnett, "Available Insulation Systems for PWM Inverter-Fed Motors", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1998.
- [7] Les Manz, "Motor Insulation System Quality for IGBT drives", IEEE Ind. App. Mag., Jan./Feb. 1997.
- [8] 일본규격협회, "전기전자 부품의 수명진단", 1991
- [9] Gregory C. Stone & L. Edward Braswell, "Motor Insulation System", Motors Handbook, pp.427-456, Marcel Dekker, Inc., 1995
- [10] 한국철도기술연구원, '98 도시철도차량 표준화, 국산화 연구: 추진 제어장치 연구개발 (전동차 AC견인전동기 표준설계)