

전동기의 장기 신뢰성 확보를 위한 시험 및 평가 시스템

(A Test and Evaluation System to Secure a Long Time Reliability of Motor)

김기준*, 신봉희**, 정병태**

*인천전문대학 제어계측학과, **인천전문대학 전자계산학과

요약

국내 도시 철도에 차량 견인용으로 사용되는 전동기는 인버터로 구동되는 200 kW급 3상 농형 유도 전동기를 표준 사양으로 선정하였으며 열악한 운전 조건에서도 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다. 그러나 PWM 인버터 구동은 견인 전동기에서 추가적인 고조파 발열 손실과 소음, 진동을 초래하며 더욱이 고속 스위칭에 의한 과도 전압과 빠른 상승 시간을 가진 반복 과전압은 인버터와 전동기를 연결하는 케이블 공진 현상에 의해 배가되어 정현파 구동시에 예상할 수 없었던 매우 커다란 스트레스를 절연 시스템에 가하게 되어 견인 전동기의 예상 수명에 심각한 영향을 미치고 있다. 따라서 본 연구에서는 인버터 구동 견인전동기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도 전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 장기 신뢰성 평가 기법이 절실히 필요한 사항이기 때문에 이를 제안하고자 하였다.

1. 서론

최근들어 전자 및 계측 산업의 발달로 인하여 전력 전자 기술이 활성화되고 있다. 이러한 기술의 발달로 인하여 유도 전동기의 운전 제어가 효율적으로 이루어짐에 따라 PWM 구동 방식의 인버터가 상당히 보급되고 있으며, 도시 철도 차량에 사용되는 견인 전동기 역시 인버터 구동 방식으로 설계되고 있다.

그러나, 인버터 구동시에는 일반적인 60 Hz 정현파 교류 전원으로 구동되는 전동기에서와는 다른 메카니즘으로 열화될 수 있다. 즉, 60 Hz 구동의 전동기에서 예기치 못했던 문제들이 발생되고 이에 따라 사고가 유발될 수 있다.

국내 도시 철도에서는 차량 견인용 전동기로서 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200 kW급 3상 농형 유도 전동기를 표준 사양으로 선정하여 열악한 운전 환경(진동, 고온, 먼지, 철분,

기름 등)과 최소한의 정비상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다.

그러나 PWM 인버터 구동은 견인 전동기에서 추가적인 고조파 발열 손실과 소음, 진동을 초래하며 더욱이 고속 스위칭에 의한 과도전압과 빠른 상승시간을 가진 반복 과전압은 인버터와 전동기를 연결하는 케이블 공진 현상에 의해 배가되어 정현파 구동시에 예상할 수 없었던 매우 커다란 스트레스를 절연 시스템에 가하게 되어 견인 전동기의 성능 특성과 예상 수명에 심각한 영향을 미치고 있다.

따라서 인버터 구동 견인전동기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 장기 신뢰성 평가 기법이 절실히 필요한 사항이기 때문에 본 연구에서 이를 제안하고자 한다.

2. 전동기의 열화 현상

2.1 일반적인 열화 요인 과 현상

경시적인 기기 성능의 저하라고 하는 열화(Degradation)는 통상 기기 구성 재료의 변질에 의한 품질 저하로 발생하게 된다. 특히, 유기 고분자 재료의 우수한 전기 절연성이 주목받으면서 전기 절연 재료로서의 적용은 점차 확대되어가고 있다. 유기 고분자 재료의 열화 중에서 절연 특성의 열화를 절연 열화라고 말한다.

유기 절연재료는 주목적인 전기 절연성 이외에 부품 재료로서의 역할을 하는 경우가 많으며 기계적 성능 등의 복합된 요구를 받게 됨으로서 이에 수반되는 종합적인 열화 현상은 매우 복잡하게 된다. 특히, 철도 차량용 견인전동기는 사용 용도에 따라 고속화, 대용량화로 인한 설계 전압의 상승, 빈번한 기동과 정지로 반복되는 냉열 사이클, 매우 가혹해진 열적, 기계적, 환경적 스트레스의 영향을 복합적으로 받을 수 밖에 없다.

견인 전동기 사고 중 절연 파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데 이는 부분 방전을 포함한 절연 열화와 관련된 사고 발생 기구가 지배적이며 여기에 기계적 진동과 환경적 요인이 복합된다.

견인전동기 절연 시스템이 운전중에 받는 일반적인 열화 요인을 검토하여 이를 표 1에 요약하였다.

표 1. 전동기의 일반적인 열화요인과 열화현상

열화요인	열화현상
열적 열화	화학적 변화에 의한 절연층 열화
	보이드나 박리의 생성
	권선단부나 케이블 분리, 웬지 느슨
전기적 열화	부분방전에 의한 절연체 내부 침식
	tracking, treeing
기계적 열화	반복 펄스 열화
	절연층 박리 또는 균열, 마모
환경적 열화	권선 고정부 및 지지재료 분리
	화학적 변화에 의한 용해
	열팽창에 의한 박리, 가수분해
	tracking
	덕트 막힘으로 인한 온도상승

2.2 인버터 구동시의 추가 열화

전동기 절연 구성에서 전압 부담은 권선간(층간) 절연, 상간 절연, 대지 절연으로 나누어지며, 구조적으로 보면 슬롯부 절연, 코일 엔드부 절연, 접속부 및 리드선 절연으로 나눌 수 있다. 최근의 인버터 구동에 의한 비정현파 전압의 사용으로 커다란 전자기적 충격이 열화 과정에 포함되면서 인버터 구동시에는 다음과 같은 추가 스트레스가 발생한다.

2.2.1 고조파의 발생과 영향

인버터 출력 전압에 포함된 고조파는 손실 증가, 온도 상승, 소음, 진동 및 EMI 등의 문제를 일으킨다.

□ 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 절연정격을 갖는 전동기를 사용할 필요가 있음.

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

□ 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.

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

2.2.2 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.

□ 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 권선의 초입

부분에 집중되어 부분방전을 일으키고 치명적인 절연열화 또는 절연파괴를 유발한다.

□ 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.

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

3. 전동기의 절연 시스템

전동기의 절연 시스템은 전동기 구성이나 운전 에 있어서 가장 중요한 성분중 하나이며, 전동기의 만족스런 운전 수명과 신뢰성은 그 기능을 수행하는 절연 시스템의 능력 정도에 크게 의존한다. 절연 시스템은 그다지 마모되지 않는다는 측면에서 열화가 없는 것으로 고려되는 경우도 있으나, 사실 취급이나 정비 과정에서 가장 손상받기 쉬운 부분이고 정상 및 비정상 동작과 환경적인 조건에서 가장 열화를 받기 쉬운 부분이다.

전동기 절연시스템을 선택할 때에는 전기 및 기계적 설계, 정상 및 비정상 동작 그리고 경험하게 될 환경조건 등을 고려하여야 한다. 한 시스템에 대한 재료선택의 요소는 그들의 유전특성, 열안정성 및 열전달, 기계적 특성, 진행과정, 화학적 저항 및 절연시스템과 관련되는 재료와의 적합성 등을 포함한다.

절연 강도 특성은 절연체 유전 특성중 가장 중요한 것이며, 특히 440V 이상에서 동작하는 대형 산업용 기기에서는 필수적인 요소이다. 전동기 절연에 사용되는 기본 재료들은 지극히 높은 파괴값을 가지고 있지만 실제로 전동기 절연 설계 시에는 이 값들을 이용하지는 않는다. 일례로, 마이카-절연 코일은 대형기에서 mil당 60V 이상의 스트레스를 받지 않도록 설계하고 있다.

이와 같이 기본재료의 특성과 실제 설계값의 커다란 차이는 기본적인 재료에서 변수가 많을 뿐 아니라, 불완정성, 제조공정, 설계 및 응용에서의 고려사항들에 의해 발생된다. 재료의 적절한 전압내력 특성과 강도의 고려, 한 시스템 내

여러 재료의 전압-스트레스 한계 조합 그리고 열화 인자의 경험 등이 실제적인 동작전압 수준을 결정하는데 도움을 주며, 이로써 운전 신뢰성을 보증하고 절연시스템의 수명과 전동기 수명을 보증할 수 있다.

4. 가속 시험 및 수명 평가 시스템

제품에 부착된 전기부품의 수명이나 고장율을 단기간에 평가하는 것은 매우 중요하다. 신뢰성 시험에서는 실제 사용조건에서 받는 스트레스를 모의한 시험을 실시하지만 통상 수명에 이르기까지 대단히 긴 시간이 걸린다. 특히 전력용 기기의 경우 수십년 이상을 요하기 때문에 실용적이지 못하다. 이 때문에 단기간에 수명 특성을 평가할 수 있는 가속 시험이 필요하다.

가속시험은 JIS Z 8115에서 “시험시간을 단축할 목적으로 기준조건보다 엄격한 조건에서 실시하는 시험. 비고 : 이 시험은 고장 모드 및 그 원인이 변하지 않는 것이 필요하다”로 정의되어 있다.

일반적으로 가속 수명 시험, 가속 열화 시험, 촉진 열화 시험 또는 촉진 수명 시험으로 구분된다. 표 2에 신뢰성 시험의 분류를 제시하지만 가속시험은 본래 신뢰성 시험의 일부를 구성하는 것이다. 이제 가속시험은 단순히 수명예측이나 고장율 예측을 가능하게 하는 것뿐만 아니라 열화과정을 비파괴적으로 추적하여 열화 메커니즘을 해명하는 것에 의해 실용시의 보수진단에 기여하는 것도 가능하다.

열화기구가 단순한 경우는 가속시험이 비교적 용이하지만, 실제 전기 부품에서는 많은 스트레스가 복잡하게 연계되어 작용하기 때문에 수명이나 고장율의 예측이 어렵다. 이러한 경우 지배적인 열화인자가 무엇인가를 도출하여 그 지배적 열화인자에 주목한 보다 단순한 계로서 시험을 실시하는 것이 좋다. 또한 사용 실적이 있는 전기부품을 동시에 시험하여 결과를 비교하면 참고가 된다.

현재 전기부품의 가속시험으로서 공인된 방법은 없지만, 관계하는 기술자가 스스로 미리 시험법을 개발하고 있는 실정이다. 특히 역사가 짧거나 소량 로트 생산 기종의 전기부품에서는 이 경향이 강하다.

앞으로 새로운 가속시험법의 개발이 매우 중요

하다고 생각되지만 무턱대고 스트레스나 빈도를 올리는 것은 안되며 고장발생의 기구를 해명하여 물리·화학적 법칙에 따른 합리적인 시험법을 개발하는 것이 요체이다.

표 2. 신뢰성 시험의 분류

신뢰성 시험법	장소적	스트레스 강도	시간적 스트레스 인가법	
			수명시험	파괴시험
신뢰성 시험법	1. 현장시험 (Field test)			
	2. 모의 시험	파괴시험	수명시험	1. 정상동작 상태 시험 수명종료까지 실시
			수명시험	2. 가속수명시험 스트레스 인가시간 또는 빈도를 증가하여 수명시간을 단축한다.
			수명시험	3. 강제 열화시험 (Forced life test) 시간이외의 스트레스 인자를 가속하게 하여 고의로 열화시킴.
			한계시험	4. 보존시험 스트레스 인가를 하지 않고 어떤 환경에 방치한다.
	비파괴시험	동작시험 (Operating test)		
		보존시험	1. 환경시험	2. 정상사용상태 시험

정밀진단에서 수명진단은 설비, 장치 및 부품의 성능이나 형상을 계측하여 조사하고, 성능의 저하 정도나 열화의 정도, 이상 징후를 판단함과 동시에 결함의 위치, 장소 등을 판단하거나 또는 잔여수명을 추정하는 것이다.

그림 1은 수명진단의 원리를 나타낸 것으로, 전기, 전자 부품에 요구되는 기계적 강도, 전기적 강도, 내열성능 등의 기능량은 경년열화와 함께 점차로 저하해 간다. 한편, 이들 부품의 기계적, 전기적, 화학적인 특성을 나타내는 상태량은 일반적으로 경년열화와 함께 나빠진다.

전기, 전자 부품의 기능량이 여유한도 수준까지 저하하면 수명을 다하기 때문에 예방, 예지보

전 활동을 통해 기능량이 이상 수준까지 저하한 시점에서 이상을 검출하고, 부품의 교환 또는 수리를 실시하는 것에 의해 설비, 시스템에 고장을 일으키지 않도록 사용 가능한 상태를 유지하는 것이다.

전기, 전자 부품의 기능량은 예를 들면, 기계강도, 절연과괴전압 등의 물리량은 운전중인 설비, 기기, 시스템에서 직접 측정하는 것이 곤란한 경우가 많다. 따라서 기능량과 함수관계에 있는 상태량을 만들어서 이 상태량을 측정하는 것에 의해 기능량을 추정하는 방법이 사용되고 있다.

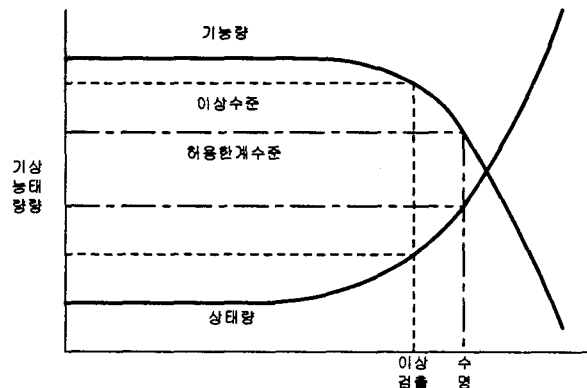


그림 1. 수명 진단의 원리

5. 수명평가법의 제안

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

5.1 기준 전압 레벨 결정

그림 4.14은 dc link 전압 1500V 인가시 견인 전동기 단자에서의 과도전압 파형으로 최대 피크 전압 V_m 은 2700V이고 상승시간은 $0.7\mu s$ 정도로 전형적인 IGBT 구동시의 특성을 보여주고 있다. IEEE 792-1987에 따라 그림 4.15에서 상승시간 $0.7\mu sec$ 일 때의 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

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

(3) 인버터 구동 전동기 입력의 상 피크전압 변환

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

(4) 인버터 구동 전동기 입력의 상 실효전압

$$U_{Prms} = 1,800\text{V} / 1.414 = 1,270\text{V}_{rms}$$

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

5.2 PWM 임펄스 전압 모의

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

아울러, 이 시험에서는 전동기 작동시에 발생하는 스위칭 임펄스 전압이 전동기에 인가되는 것을 모의하기 위해, 각 열화 주기마다 5년 동안의 운전 임펄스 모의 전압을 인가한다. 이 모의 전압은 하루에 20번 전동기가 동작된다고 보면 5년간 36,000번의 파두가 0.1~0.2μs인 스위칭 임펄스가 인가되는 것이므로, 60Hz 교류전압으로 환산하여 전압 레벨 2의 조건인 3.25pu (= 3.25 × 1,270 V_{rms} = 4.1 kV_{rms})로 10분간 인가하게 된다.

5.3 열화 조건 및 주기 선정

IEEE 792-1987에서는 열적 열화레벨과 전기적 열화 레벨 각각 2 개씩을 복합열화 조건으로 선택하며, 가장 추천하는 복합열화 레벨은 레벨 1 과 레벨 3이다. 한 복합열화 레벨 간의 차이는 레벨이 올라갈수록 수명이 절반으로 줄어든다는 의미를 갖고 있다. 따라서, '열적 열화레벨 3 / 전기적 열화레벨 3'은 '열적 열화레벨 1 / 전기적 열화레벨 1'에 비해 수명이 1/2 × 1/2 = 1/4 로 줄어들게 된다. 한편, '열적 열화레벨 3 / 전기적 열화레벨 0'이나 '열적 열화레벨 0 / 전기적 열화레벨 3'은 '열적 열화레벨 1 / 전기적 열화레벨 1'에 비

해 수명이 1/2로 줄어드는 것을 의미한다. 또한, 규격에 의하면, 전압 열화와 열 열화를 조합하여 4 개의 그룹으로 구성하여 각 열화주기에 따라 시험하도록 되어 있다. 견인 전동기에 대해 이러한 열화 조건을 다음 표 3과 같이 결정할 수 있다.

표 3. 4 개 열화 그룹 및 열화 주기

그룹이름	전압 열화조건	열 열화 조건	열화 주기 [일]							
			0	4	8	16	32	64	128	256
1 그룹	4.5 kV _{rms} (3레벨)	235 °C (3레벨)	0	4	8	16	32	64	X	X
2 그룹	4.5 kV _{rms} (3레벨)	상온 (0레벨)	0	X	8	16	32	64	128	X
3 그룹	전압인가 없음.(0레벨)	235 °C (3레벨)	0	X	8	16	32	64	128	X
4 그룹	3.8 kV _{rms} (1레벨)	215 °C (1레벨)	0	X	X	16	32	64	128	256

- (1) 전압열화 레벨
 열화 전압레벨 1 (3 pu) = 3 × 1,270 V_{rms} = 3,810 V_{rms} ≈ 3.8 kV_{rms}
 열화 전압레벨 3 (3.5 pu) = 3.5 × 1,270 V_{rms} = 4,445 V_{rms} ≈ 4.5 kV_{rms}
- (2) 열 열화 레벨 (IEC 34-18-31의 200 °C class 참조)
 열화 온도레벨 1 = 215 °C
 열화 온도레벨 3 = 235 °C
- (3) 임펄스 절연파괴 시험의 조건
 - 턴-턴 절연 절연파괴 임펄스 스텝 시험
 - 턴과 턴 사이의 절연마다 인가
 - 전압 파형
 파두 : 0.1 ~ 0.2 μsec
 파미 : 파두의 10 배 이상
 - 시작전압 : 3 pu (3,810 V_{rms}) × 1.414 = 5.4 kV_{peak}
 - 스텝당 인가 횟수 : 3 회
 - 전압 스텝 : 절연파괴시까지 0.54 kV_{peak} (시작 전압의 1/10)
 - 대지절연 절연파괴 임펄스 스텝 시험
 - 턴을 한데 묶고, 턴과 형틀(접지됨) 사이에 인가

- 전압 파형
 파두 : 1 ~ 5 μ sec
 파미 : 파두의 10 배 이상
- 시작전압 : 5 pu (6,350 V_{rms}) \times 1.414 =
 9.0 kV_{peak}
- 스텝당 인가 횟수 : 3 회
- 전압 스텝 : 절연파괴시까지 0.9 kV_{peak}

6. 결론

국내 도시 철도에서는 차량 견인용 전동기로서 VVVF 제어 PWM 인버터로 구동되는 200 kW급 3상 농형 유도 전동기를 표준 사양으로 선정하여 열악한 운전 환경과 최소한의 정비 상태에서 20년을 상회하는 운전 수명을 보장하도록 규정하고 있다.

따라서 본 연구에서는 인버터 구동 견인전동기의 운전수명을 보장하기 위해서는 기존의 시험 방법에 포함되지 않은 PWM 가변속 구동에 따른 고조파 손실과 과도 전압 충격의 문제점을 고려한 새로운 장기 신뢰성 평가 기법이 절실히 필요한 상황이기에 때문에 이를 제안하였다.

참 고 문 헌

1. IEC Document 349-2
2. IEC Document 34-15
3. IEC Document 34-17
4. IEC Document 34-18-31
5. IEC Document 34-18-32
6. G.C.Stone, H.G.Sedding, B.A. Lloyd and B.K. Gupta. "The Ability of Diagnostic Tests to Estimate The Remaining Life of Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 3, No.4, p.833-841, Dec. 1998
7. J.E. Timperley, J.R. Michalec. "Estimating the Remaining Service Life of Asphalt-Mica Stator Insulation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 9, No.4, p.656-693 Dec. 1994
8. B.K. Gupta and I.M. Culbert. "Assessment of Insulation Condition in Rotating Stators", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 7, No.3, p.500-508 Sep. 1992