

철도차량용 견인전동기의 절연진단기술현황

왕종배^o, 최규형, 박현준, 김명룡, 이수길
한국철도기술연구원 표준화사업단 추진제어장치개발팀

Present Status of Insulation Diagoniosis Technology on Traction Motor for Rolling Stock

Jong-Bae Wang^o, Gyu-Hyung Choi, Hyun-Jun Park, Myung-Yong Kim, Su-Gil Lee
Propulsion System Team, Urban Tansit Standardization Division,
Korea Railroad Research Institute(KRRI)

Abstract - 본 논문에서는 철도차량용 견인전동기의 열적, 기계적, 전기적 열화 및 환경열화 등의 절연열화 메카니즘에 대해서 검토하였으며, 전동기 주절연물의 전반적인 열화경향 파악과 국부적열화 검출을 위해 현재 적용되고 있는 절연저항, $\tan \delta$, 직류성분, 정전용량 판정 및 부분방전 시험 등의 각종 절연진단 시험법과 최종적인 교류전압파괴 강도와와의 상관성을 추정하는 진단기술의 현황과 그 유용성을 소개한다.

1. 서 론

철도차량용 견인전동기는 고속화, 대용량화로 인한 설계전압의 상승, 빈번한 기동과 정지로 반복되는 냉열 사이클, 매우 가혹해진 열적, 기계적, 환경적 스트레스의 영향을 지배적으로 받고 있다. 견인전동기 사고종 절연파괴가 많은 비율을 점유하고 있는데, 절연시스템의 성능과 사용조건에 따라 결정되는 절연수명을 정확하게 파악하여 사고에 이르기 전에 이를 보수, 유지해 가는 것이 운전의 신뢰성과 안정성 확보면에서 매우 중요하다.¹⁾

현재 국내에 도입된 철도차량용 견인 전동기는 형식과 전압 및 설계사양이 매우 다양하고 초기특성이나 열화특성이 다르기 때문에 사고발생기구를 일반화하는 것은 불가능 하지만, 고전압 기기에서는 분명히 부분방전을 포함한 절연열화와 관련된 사고발생기구가 지배적이며 여기에 기계적 진동과 환경적 요인이 복합된다. 또한 권선형태 및 구조에 의한 영향을 받아 특히 전폐형 전동기는 좀더 가혹한 절연적 제한을 가진다.

앞으로 절연시스템의 신뢰성과 안정성 확보를 위해 절연시험 및 진단과정에서 온도 및 습도에 의한 영향을 고려한 지속적인 자료의 수집과 판단 기준의 확립이 절실하며, 예방보전 측면에서 적절한 절연진단 시험 및 평가기술의 개발과 데이터베이스화에 의한 진단 및 감시 시스템 구성을 통한 평가 정확도의 향상이 강하게 요망된다.

2. 전동기의 절연열화

철도차량용 견인전동기의 절연구성에서 우선 부담해야할 전압의 종류는 권선간(층간) 절연, 상간 절연, 대지절연으로 나누어 지며, 구조적으로 보면 슬롯부 절연, 코일엔드부 절연, 접속부 및 리드선 절연으로 나누어 진다.

표 1. 전동기의 각종 절연열화요인과 현상

열화요인		열화현상
열열화	통상운전	화학 반응촉진
	과부하운전	보이드, 박리생성
		권선단부 균열
		고정부 헐거움
전압열화	정상대지전압	부분방전 침식
	이상찌지전압	트래킹열화
기계적열화	운전 전자력	반복펄스 열화
	기계적 진동	절연층 박리, 균열
	냉열사이클	철심-코일간 마모
환경열화	화학약품	권선고정부 균열
	기름	화학적 용해
	도전성물질	열팽창 박리, 균열
	흡습, 흡수	습열, 가수분해
		트래킹 열화
		통풍구 막힘 온도상승

이들 중 어느 부분이라도 절연기능을 잃어버리면 전동기 절연파괴 사고에 이르게 된다. 즉, 절연 사고는 복합적으로 인가되는 국부적 스트레스가 절연 약점부에 작용하여 전기적 강도를 초과하는 경우 급격히 발생한다. 그림 1은 열화된 절연물의 절연강도 및 수명저하를 나타낸 것이며, 그림 2는 IEEE 연구그룹에 의해 발표된 권선내압인가 기기의 전압내력곡선이다. 전압상승이 5 μ s보다 빠를 경우에 나타나는 현저한 내력 감소는 상당한 전압이 권선(층)간 절연에 축적되며, 낙뢰나 급격한 스위칭 켜지 조건의 경우에 큰 영향이 나타날 것임을 암시하고 있다.

최근의 인버터 구동에 의한 비-정현과 전압의 사용은 열화과정에 더 많은 악영향을 미칠 수 있는 전자기적 충격을 더해 주고 있는데, 다음 두가지 중요한 상호연관된 열화메카니즘에 의한 영향을 받는다.²⁾

(1) **열적효과** : 인버터 구동 공급전압에 포함된 고조파의 존재는 절연구성에 부수적인 고조파 손실을 일으키는데, 절연물의 복소유전율이 주파수의 함수이기 때문이다. 결과적으로 온도 T가 상승하여 Arrhenius식에 따라 dR/dt 의 비율로 열화가 증가된다.

$$\frac{dR}{dt} = Ae^{W/kt}$$

여기서 W는 이 과정의 활성화 에너지이다.

Fuch 등의 3상 유도기에 대한 연구에서 제시된 전형적인 예에서⁴⁾ 단지 3°C의 온도상승으로 5.8%의 가중적인 고조파 인자가 계산되어 열열화만으로도 50% 수명감소를 초래한다. 그러나 Arrhenius곡선의 지수적인 특성은 열화메카니즘을 매우 민감하게 만들어 7°C의 온도상승이면 전형적인 활성화 에너지 $W=1.76 \times 10^{-19}$ [J]인 경우 전동기의 수명을 50% 감소시키기에 충분하다. 다른 측면으로 고려하면 농형 유도전동기의 연속정격에서 동일한 온도상승에 대해 10~11%의 토그 감소를 나타낸다. 만일 저속에서 일정토크가 유지 되려면 이에 필요한 감쇄는 더욱 커진다.

(2) **부분방전특성** : 고압 기기의 경우 유전적 수명은 부분방전이 만들어내는 열화에 의해 종종 지배된다. 이 부분방전은 권선 도입부 첫째와 셋째턴 사이에 나타나며, 때로는 2000pC의 높은 수준이 지속되기도 한다. 지속적으로 축적된 손상은 국부적인 에너지 분산에 의존하며, 이 분산은 다시말해 방전의 크기 및 반복비율과 연관된다.

만일 인가전압이 고조파를 매우 많이 포함하고 있다면, 방전특성은 전압 역전부마다 보이드 표면에 포획된 전하로 인해 기인되는 것으로 논의 된다. 최근 Bennett의 연구는⁵⁾이런 파형조건에서 전압내력을 인식하는 방법을 서술하고 있다. 이 파형 1주기당 방전횟수를 정현파일 때 예상되는 비율로서 결정한 것으로 방전여기 전압 V_f 가 최소전압 변동폭의 절반이라는 가정하에서 손쉽게 적용할 수 있다. 정현과 조건의 L_0 에 대한 인버터 구동시 L의 수명비율은 다음과 같다.

$$L/L_0 = \frac{V_p - 2V_f}{\sum V_{max} - \sum V_{min} - 2pV_f}$$

여기서 V_{pp} 는 전체 최대-최대 전압, p는 1주기당 피크쌍의 수, V_{max} 와 V_{min} 은 각기 전압 변동의 크기이다.

부분방전 열화만이 열화기구로 작용하는 조건에서, 고조파 파형을 포함한 전압내력은 정현과에 비해 동일 V_{pp} 전압에서 단지 72%만이 될 것이라는 결론이 나온다. 고전압 기기의 경우 열화에는 열적 효과 및 방전효과가 전부 함께 작용하므로, 이론적인 접근방법에 전주어 볼 때 인버터-공급 기기는 심각한 수명의 손실을 겪게되는 것으로 예상된다.

(3) 기계적 요인

대부분의 회전기 절연사고는 기계적인 요인을 가진다. 부적절한 지지(bracing)나 단락 작용력에 의한 도체의 움직임은 마모를 일으키고 슬롯라이너는 진동 및 방전 침식의 효과가 조합된 영향으로 손상된다. 이런 관점에서 고조파를 많이 함유한 에너지를 인가하면 진동을 유발시키는 자속이 발생하여 이 메카니즘을 더욱 악화시킨다. 분석결과 매우 많고 상이한 진동모드가 가능하며, 분명히 직접적이지 못하지만 그러나 어느 순간에서는 인버터-공급 기기의 폐기를 촉진할 수 있는 측면이 있다.

3. 전동기의 절연진단

3.1 $\tan \delta$ 와 절연저항에 대한 온-습도의 영향

주전동기는 전기부와 자기부의 절연상태 체크를 위해 ① 절연저항, ② $\tan \delta$, ③ 절연내압시험, ④ 직류분 시험, ⑤ 부분방전시험 등 각종 시험이 실시된다

일본의 RTRI가 약 1년간 150대의 견인전동기에 대해서 $\tan \delta$ 및 절연저항과 그 때의 온도 및 습도를 측정 한 결과를 소개하면¹⁾, $\tan \delta$ 는 수 %에서 20% 정도 까지 변화하며 절연저항은 동절기 1000MΩ 이지만 하절기에는 수 MΩ이하로 저하한 것을 알 수 있다. 이것은 측정시기에 따른 보정의 필요성을 부각시키고 있다.

그 보정은 $\tan \delta$ 나 절연저항(대수)이 온도나 습도의 일차함수라는 가정에서 출발한다. 즉,

$$\tan \delta = aT + bH + c$$

여기서, T:온도, H:상대습도이며, a:온도관련 상수, b:습도관련상수, c:절연조건 상수이다.

절연저항에 대해서는 최대와 최소의 차이가 크기 때문에 대수준급을 사용한 아래와 같은 보정식을 사용한다.

$$\log(\text{절연저항}) = aT + bH + c$$

계산치가 실제 측정 자료와 어느정도 일치하는가를 알아보기 위해 상기 1년분의 자료에 대하여 상관분석을 실시한 결과 그림 3에서 $\tan \delta$ 와 절연저항에 대한 상관함수는 0.91~0.99 사이로 대단히 양호한 것을 볼 수 있다.

따라서 주어진 온도, 습도의 영향을 1차식으로 근사화하여 나타내어도 충분히 유효한 것임을 알 수 있으며, 여기서 a, b의 값은 절연구성이 같은 주전동기, 즉 동일 형식의 전동기에서는 각기 같다고 고려되며, 그 값을 실험적으로 구하게 되면 형식에 따른 보정계수 일람이 완성된다.

표 2. 절연특성에 미치는 온도와 습도의 영향

시험방법	온도/1℃	상대습도/1%
tan δ (500V)	0.111	0.094
log(절연저항)	-0.03959	-0.0285

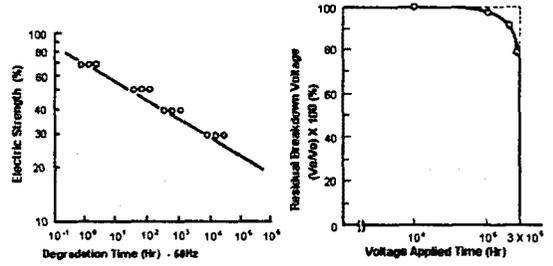


그림 1. Mica절연의 열화에 따른 전압내력곡선

3.2 각종 절연진단시험의 유효성 검증

주전동기에 대한 사전 절연진단 시험항목의 유효성을 평가하기 위해 절연저항, tan δ, 직류성분, 정전용량 판정 및 부분방전 시험 결과를 절연파괴 결과와 상관성 분석을 실시한 결과, tan δ (500V)와 직류성분시험이 비교적 높은 상관도를 지니고 있어 절연조건을 이해하는데 가장 유용한 방법임을 알 수 있다.

4. 결론 및 제안

1. 절연열화과정에서 기계적 요인의 이해를 근거로 할 때 인버터 공급-유도기의 동작은 절연의 전압내력에 영향을 미칠 수 있으며 기기 수명에 심각한 충격을 가할 수 있다.
2. 현재 측정되고 있는 tan δ 및 절연저항은 측정시의 기온, 습도에 강하게 영향을 받으므로 그 영향을 정량화하여 측정치를 보정한 수치로써 판단하여야 한다.
3. 최근 절연기술의 발달로 200℃를 넘는 C종 절연이 도입되어 보다 소형, 고성능인 전동기가 제작되고 있으며, 새로운 절연방식과 재료변화에 따른 절연진단 기법이나 판단기준의 확립이 시급하다.
4. 측정치의 시간적인 변화는 매우 중요한 판단기준으로 고려되어 주전동기의 탄생 부터 정기검사 기록 자료를 참조하여 그 변화에 따라 판단하는 것이 타당하다.

참고문헌

1. H.Hata, "Improvement of insulation tests for traction motors", QR. RTRI, Vol.38, No.1, pp.31-35, 1997
2. Magsoft社, "고효율모터 설계강좌", pp.78-85, 1996
3. S. Toth, Proc. Conf. Diel. Mats., Meas and App., Cambridge, U.K., IEE, pp. 327-330, 1975
4. F.F. Fuchs al, Trans. IEEE, Vol. PWRD-1, pp.310-317, 1986.
5. A.I. Bennett, Ann.Rep.Conf. on Elect.Ins. and Doel. Phen., pp. 80-88, 1987

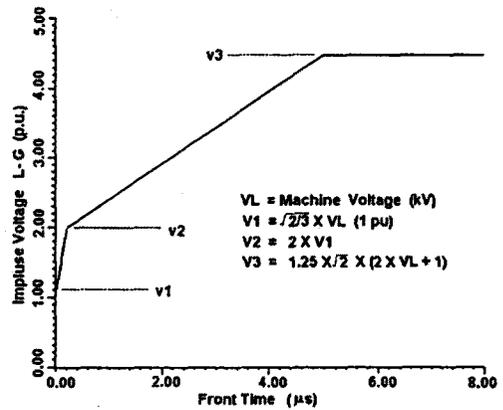


그림 2. 임펄스 전압내력

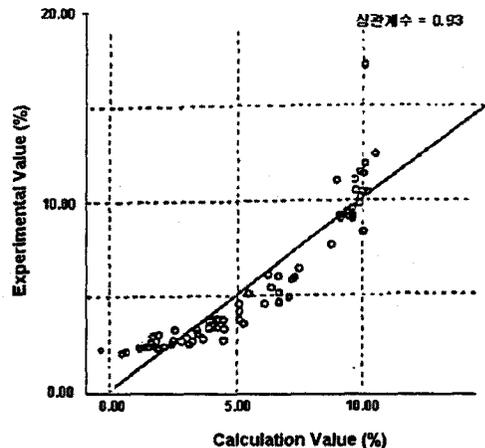


그림 3. tan δ 실측치와 계산치의 상관곡선