

전동차 견인용 유도전동기 절연 설계

이정일* 이종인 김기찬 이갑재 김진호* 최영찬 박정태
 현대중공업 마북리 연구소 전력전자연구실, *현대중공업 중전기사업부 철도차량부

Insulation Design of the Induction Motor for Subway Traction

J. I. Lee, J. I. Lee, K. C. Kim, K. J. Lee, J. H. Kim, Y. C. Choi, J. T. Park
 Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd.

Abstract - In this paper, the insulation system of induction motor for subway traction was designed. In order to design the insulation system of induction motor, various types of insulation system were compared, at first, and test method was investigated in order to verify the designed insulation system. The designed insulation system was satisfied economically, technically by experimental test.

1. 서 론

전동차는 자동차와 함께 대표적인 교통수단으로 그 중요성이 날로 증가되고 있으며 이에 대한 수요가 꾸준하게 늘어나는 추세에 있다. 전동차의 늘어나는 수요에 비하여 국내 전동차 제작회사들은 자체 보유기술이 없는 상태에서 Mitsubishi, Siemens, GEC-alstom 등 선진국의 기업체에서 전동차의 주요 전장품들을 기술제휴에 의해 생산기술을 도입하여 생산, 납품하여 왔다. 이 때문에 사급자재의 사용, 막대한 기술도입료, 불리한 계약조건 등으로 인하여 채산성이 갈수록 악화되고 국제 경쟁력을 상실하고 있어 독자적인 모델 개발의 필요성이 절박한 실정이다. 전동차 부품중에서 견인전동기의 생산은 선진국의 기술제휴를 통하여 제작도면 및 부품 명세서를 제공받는 한정된 제작기술로 제한되어 있다. 결국 견인전동기의 절연시스템은 전기기기에서 신뢰성은 물론 수명에 커다란 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 포인트이며 따라서 전동차용 견인전동기에 대한 절연시스템의 독자적인 설계기술은 견인전동기의 국산화 기술 확보에 매우 중요한 요소이다.

본 논문에서는 전동기용 절연재료의 특성을 비교, 검토하고 전동차 견인용 유도전동기의 절연설계, 제작, 시험을 통하여 절연시스템의 설계기술을 확보하였다.

2. 절연재료 열화특성 및 회전기 절연재료

절연재료는 동시에 유전재료이며 특히 교류에 사용되는 경우 분극, 탈분극과 관계된 변위전류가 흐르고 이와 같은 유전특성이 절연재료의 특성과 관계된다. 절연재료에도 전압을 인가하면 약간의 전류가 흐르고, 이러한 전류의 크기에 따른 절연저항은 재료 절연의 양부와 관계된다. 또한 절연 파괴는 재료의 사용 한계전계를 제한하기 때문에 이러한 특성도 매우 중요하다. 절연재료에는 유기질 재료가 많고 절연재료는 사용 중장기간에 각종 열화를 받기 쉽다. 따라서 열화는 사용가능기간을 한정하게 된다. 이러한 열화는 절연재료에 있어 특히 중요하다. 열열화, 방전열화, 방사선 열화가 있는데 방사선 열화는 전리성방사선과 전기절연재료와의 관계가 큰 문제로 된 것은 원자료가 개발된 이래의 일이다.

2.1 열열화

유기절연재료는 산소중 또는 공기중에 가열하면, 대개

의 경우 우선 산화가 발생하고 또한 분자연결이 절단되어 열분해로 진행된다. 분해생성물의 경우, 휘발성 물질은 방산되고 중량감소로 나타난다. 그의 치수가 변화하고 쪼개지고 공극 등이 생긴다. 실제의 전기기기 등의 절연재료의 열열화는 열이외에 진동, 충격 등의 기계적 스트레스, 부분방전, 수분 등의 영향이 더해져 복잡하게 된다.

2.2 방전열화

절연재료 내부에 공극 등의 결함이 있거나 표면 또는 그 근방에 국부적인 전계가 집중되면 그 부분에 국부적인 방전이 발생한다 이러한 방전이 발생하면 유기절연재료는 침식되거나 변질되어 도전성을 띠게되어 열화되고, 결국에는 절연파괴에 이르게 되는데 방전의 양식에 따라 부분방전 열화, 트래킹(tracking) 열화, 트리잉(treeing) 열화, 아크 열화로 분류된다.(1) 부분방전(코로나) 열화 : 절연재료내부의 공극중 또는 금속(전극)과 절연재료 사이에 있는 갭 중 또는 절연재료의 표면에 집합 부분 등에 전계가 집중되어, 그 부분에 부분방전이 발생하고 따라서 재료가 열화하는 현상이다.(2) 트래킹(tracking) 열화 : 트래킹이라는 것은 절연재료 표면상의 전위차가 있는 부분에 탄화 도전로(track)를 형성하고 절연재료가 절연성을 잃어버리는 현상으로 트래킹에 대한 저항성(내구성)을 내트래킹성이라고 부른다.(3) 트리잉(treeing) 열화 : 고체절연재료중 국부적인 전계가 집중되는 곳이 있어, 거기서부터 고체주의 수지상의 방전흔적(tree)이 형성되고 순차진행하는 현상을 트리잉(treeing)이라고 한다.(4) 아크(arc) 열화 : 절연재료가 아크방전되면 그의 열작용으로 열분해되거나, 용해, 탄화물이 생성되거나 하여 절연능력이 저하하는 현상을 아크 열화라 한다.

2.3 회전기와 절연재료

전기기기의 성능과 절연재료의 성능은 밀접한 관계를 가지고 있으며, 일반적으로 다음과 같은 특성을 갖는 절연재료가 요구되고 있다.

- ① 내열성의 향상 (기기의 소형화)
 - ② 고절연특성 재료의 개발 (기기의 소형화, 고성능화, 신뢰성 향상)
 - ③ 작업성이 우수한 재료와 절연처리방법의 개발 (절연처리 에너지 절약)
 - ④ 솔벤트레스, 고농도 바니시 및 수용성 바니시 개발 (자원절약, 에너지절약, 무공해, 안전대책) 등
- 고정자 코일의 각부에 사용되는 절연재료의 개요는 표 2.1에 모았다.

회전기가 설치된 환경은 다양한데, 가혹한 환경하에서 사용되는 경우가 많고 에너지 절약이 요구로부터 필요시 경제적 운전을 위해 기동정지가 빈번히 행해지고 있다. 또한 차단기의 진보에 의한 모션 차단, 재투입이 순시적으로 행해지는 등 돌입전류에 의해 권선은 기계적 소크 및 씨지를 받는 기회가 많아 코일절연에서는 내환경성이 우수한 절연재료와 절연처리법의 채용이 요망되고, 전기적, 열적인 강도이외에 기계적 강도에 대한 관심이 높다.

적층철심 중에 자속이 변화하면 전압이 유기되고 와전류가 흐르기 때문에 대형기에서는 규소강판사이를 바나시 처리한 절연을 하고 있다.

표 2.1 고정자 코일 절연재료의 목적 및 기능

부품	목적 및 기능
웨이 및 웨이판 스페이서 슬롯 저장 스페이서	코일을 슬롯내에 강고히 보지하는 것 (진동방지)
소선절연	전류에 의한 표피효과와 와전류손을 방지하기 위해, 소도체로 분할하고, 각각을 절연하는 것
주절연(대지절연)	대지용 코일절연
사이드 스페이서	코일의 슬롯내 진동방지, 파판상으로 형성된 스프링힘으로 코일을 고정한다.

3. 전동차용 견인전동기의 절연시스템 설계

절연시스템의 설계대상인 전동차용 견인전동기의 사양은 다음과 같다.

표 3.1 전동차용 견인전동기 사양

종류	농형 유도전동기
정격의 종류	연속정격
정격 출력	210 kW
정격 전압	1100 V
정격 전류	135 A
정격 회전수	2200 rpm
극수	4 극
절연종별	H 중
질량	650 kg

우선 절연시스템의 기술적, 경제적 요구사항을 검토하는 것이 필요하다

3.1 절연시스템의 요구조건

우선 절연시스템의 기술적, 경제적 요구사항을 검토하는 것이 필요하다

3.1.1 절연시스템의 기술적 요구사항

열적으로 지정된 온도조건에서 견디야 하고, 연속온도 및 단시간 과부하온도, 반복되는 온도 사이클에 견디야 한다. 또한 권선으로부터 적당하게 열을 방출해야 한다. 기계적으로는 진동, 침식(abrasion), 충격에 강한 저항력이 있어야 하며, 적당한 인장력, 압착력 (compressive strength), 전단력(shear strength)와 도체와의 접착이 좋아야 한다. 전기적으로는 절연내력이 높아야 하고 코로나(corona) 및 트래킹(tracking) 저항이 좋아야 한다. 환경적으로는 습기와 오염에 강한 저항을 지녀야 하고 화학제품 및 기름 등에 강한 저항을 지녀야 한다. 그리고 합침수지와 절연 tape는 서로 호환되어야 하며, 신뢰성이 있어야 한다.

3.1.2 절연시스템의 경제적 요구사항

우선, 제조적 측면에서 볼 때, 작업성이 좋아야하고 절연자재의 가격이 적당하며, 생산원가가 낮고, 절연자재는 호환성이 좋고, 환경공해가 없고 절연자재의 조달이 쉬워야 한다. 유지보수측면에서 볼 때 절연시스템의 수명이 길어야 하고, 특별한 유지보수가 필요없는 것이 좋고 수리하기가 쉬워야 한다.

3.2 주요 절연재료 비교

전동차용 견인전동기의 절연 시스템에서 가장 중요한 진공합침 수지와 소선절연에 대해 비교 검토 하였다.

3.2.1 진공합침 수지

진공가압합침기술은 성형 코일을 절연, 슬롯에 삽입한 후 예비가열을 하여 습기를 완전히 제거하고, 합침 탱크에 넣어 진공 탈기 및 합침 수지 주입후 진공 탈기, 가압을 함으로써 슬롯부는 물론 결선부에도 약점이 없는 균일한 양질의 절연층을 형성하는 것이다. 합침수지에

대한 점도, 진공시간, 진공도, 가압시간, 가열건조시간 등을 조정하여 최적의 합침조건을 설정하는 것은 매우 중요하며 이를 정량적으로 점검하려면 정전용량, 유전정접 등을 측정한다. 차량용 견인전동기 합침 수지는 절연 파괴 강도, 점도, 내열성, 절연저항, 열 전도도 및 경제성, 작업성을 고려하여 최적의 절연시스템을 구성하는 것이 필요하다. 표 3.2는 진공합침수지의 주요 특성 비교표이다.

표 3.2 진공합침수지 특성비교

구분	Catalysed Epoxy (사균자재)	Polyester imide (ISOLA)	Silicon Resin (ISOLA)	비고
내열등급	H	H	C200	
점도	100-200	150	200	낮을 것
B.D.V kV/mm	25 min	130 min	90	클 것
Curing조건	16h	4h	8h	짧을 것
가격 \$/gal	50	30	240	경제성

3.2.2 코로나 방지재료

절연재료는 아니지만 고압절연시스템의 장기 신뢰성에 깊게 관련을 가지는 재료에 코로나 방지재료가 있는데 절연층 내부의 코로나를 방지하기 위해 코일전체를 무용제 합침수지로 진공합침하든가, 고압력으로 프레스하여 보이드없는 절연구성을 갖게 하는 것이 필요하다. 그러나 코일을 철심에 삽입하는 경우 철심과 절연물 사이에 약간의 공극이 생기는 것은 공작상 피할 수 없다. 도체에 전압이 걸리는 경우, 이러한 좁은 공극의 전계는 비유전율의 차이에 의해 높게 되어 이러한 공극중에 절연파괴가 되고 부분방전(코로나)이 발생한다. 이러한 재료는 코로나 방지재료로 불리고 특히 인버터 구동전압에서 사용되는 회전기의 절연설계에서 이러한 부분에서의 코로나 발생을 억제하는 배려가 필요하다.

3.3 절연시스템 설계

회전기는 보통 절연재료만으로 평가되지는 않고 각종 열화요인에 대해 충분한 신뢰성을 확보하기 위해 회전기 절연 시스템 전체의 평가가 중요하다. 회전기 절연의 특징은 다종다양의 고체 절연재료로 성립되어 있다. 다음 표는 전동차용 견인전동기의 절연설계 모델이다.

표 3.3 절연설계 결과

구분	모델	기존모델 (A)	설계모델 (B)	비고
정격		200kW,4P,1100V	210kW,4P,1100V	
절연 사양	V P I Resin	Imide Epoxy	Polyesterimide	
	소선절연	H-DGC	H-DGC	
	주절연	Mica Kapton	Mica CR Kapton	
		Kapton Tape	Kapton Tape	
내열 등급	H Class	H Class	180K	
구동방식		GTO VVVF INV.	IGBT VVVF INV.	T/M용

절연시스템의 신뢰성 측면에서는 silicon resin을 적용하는 것이 유리하나, 경제성을 고려하여 polyesterimide를 사용하였고 인버터 구동시의 절연에 강한 mica CR kapton 재료를 사용하여 설계하였다.

4. 절연시스템 시험

여러 가지 시험법이 있는데 특성 시험과 내구성 시험으로 나눌 수 있으며 내구성 시험은 수명과 관계되는 매우 중요한 것이다.

4.1 성극시험

절연물에 직류전압을 인가했을 때의 절연저항-시간특성 또는 전류-시간특성으로부터 전열물의 열화나 흡습 등 절연물의 결함을 판정하기 위함이다. 절연물이 열화되거나 누설전류가 증가하여 시간에 따른 전류의 감쇠율이 낮아진다. 이러한 시간 특성을 나타내는 지표로서 성극지수(Polarization Index)를 사용하여 절연물의 흡습과 오손 등을 판정한다.

$$\text{성극지수}(P.I.) = \frac{\text{전압인가1분후의전류}}{\text{전압인가10분후의전류}} \text{ 또는 } \frac{\text{전압인가10분후의절연저항}}{\text{전압인가1분후의절연저항}}$$

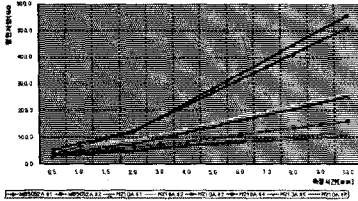


그림 4.1 성극지수 시험결과

4.2 유전정접 시험

일반적으로 절연물에 교류전압을 인가하면 손실이 발생한다. 이 손실은 누설전류에 의한 손실, 유전정접에 기인하는 손실과 부분방전에 의한 손실로 분류할 수 있다. 이러한 손실에 의해 전전류는 충전 전류성분보다 뒤지게 된다. 이 각도를 유전손각, 정접을 유전정접이라고 한다. 절연물내에서 소비되는 유전손은 $W = \omega CV \tan \delta$ 가 된다. $\tan \delta$ 값은 절연물 고유의 값으로 절연물의 상태를 나타내는데 사용하나, 국부적인 상태라기보다는 평균적인 상태를 나타낸다. 또한 절연물의 성상(수지의 경화정도 등), 불순물의 잔류정도, 노화, 보이드 등의 결함부위에서의 부분방전에 의해 고유의 값과 달라지게 되므로 절연물의 품질관리나 열화의 판정에 널리 사용되고 있다.

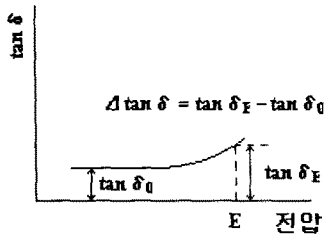


그림 4.2 인가 전압과 $\tan \delta$ 와의 관계 유전정접 시험결과는 그림 4.3 와 같다.

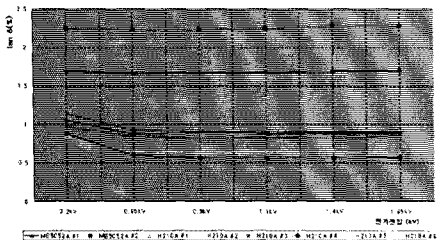


그림 4.3 인가전압 및 $\tan \delta$ 시험특성

4.3 교류전류 시험

절연물에 직류전압을 인가시 전류-시간특성으로 절연 상태를 평가하기 위한 시험이다. 교류전압을 절연물에 인가하면 전압상승에 비례해서 충전전류가 증가하며, 이때 절연층 내에 결함이 존재하여 부분방전 현상이 발생하게 되면 미소공극을 단락시켜 충전전류가 급격히 증가한다. 이러한 전류 급증전압 및 전류 급증율로부터 절연물의 흡습 및 열화의 정도 또는 부분방전 발생현황 등을 진단할 수 있다. 교류 전압인가시 전류특성은 그림 4.4와 같다.

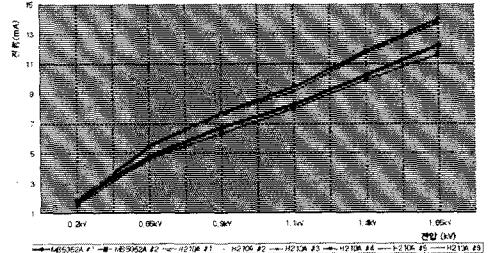


그림 4.4 교류 전류 시험

4.4 부분방전 시험

소선절연 및 절연물에 국부적으로 진행되는 보이드의 함유정도, 부분방전의 크기 등을 추정하기 위해 실시하고, $E/\sqrt{3}$ 에서 최대부분 방전 전하량(Qmax)을 측정하고 잔존파괴전압은 다음식을 사용하여 추정한다.

전류증가율 :

$$\Delta I = \frac{I - I_0}{I_0} \times 100\%$$

$\tan \delta$ 변화율 :

$$\Delta \tan \delta = \tan \delta_1 - \tan \delta_0$$

방전파라미터 :

$$\Delta = \Delta I + \Delta \tan \delta$$

잔존파괴전압 :

$$V_r = 100 - 2(\Delta - 0.8) - k \log \left(\frac{Q_{\max}}{1.5 \times 10^{-9}} \right)$$

부분방전시험 결과 및 잔존파괴전압은 표 4.1과 같다.

표 4.1 부분방전시험 결과

시험 항목	측정 결과
최대방전 전하량 (Qmax at $E/\sqrt{3}$)	정격전압(E)범위내에서 부분방전의 발생없음
부분방전개시 전압(CIV) (Corona Inception Voltage)	정격전압(E)범위내에서 부분방전의 발생없음
잔존 파괴 전압	100 %

5. 결 론

전동차 견인용 유도전동기에 절연설계를 위해 기존 절연시스템을 검토하였으며 적합한 절연 시스템을 선정, 견인전동기 절연설계를 하였다. 견인전동기에 대한 절연설계를 확보함으로써 견인전동기의 국산화기술 비율의 증가에 일익을 담당하게 되었다. 내구성시험결과는 추후 발표예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] 日野太郎, "절기절연재료 선택포인트", 일본규격협회, 1992
- [2] 秦廣의, "철도차량용주전동기의절연진단시험의검증", 전학론 D, 117권, 12호, 1511-1516, 1997.
- [3] 登古의, "열간압연용 대형직류전동기의 절연열화진단", 三菱電機技報, vol. 58, No.10, 35-38, 1984.