

부분방전에 의한 주계전기의 절연성능 평가

Insulation Performance Estimation of Main Relays by Partial Discharges

길경석[†] · 김일권[§] · 박대원[§] · 송재용* · 이강원** · 조은제***

Gyung-Suk Kil · Il-Kwon Kim · Dae-Won Park · Jae-Yong Song · Eun-Je Cho

Abstract

A new dielectric test on main relays of electric traction vehicles, the partial discharge(PD) test, is proposed. The PD test will not affect the insulation performance of specimen during the test and provide much more detailed information on insulation, the types of defects, and so on. Insulation performance of relays is estimated by discharge inception voltage(DIV), discharge extinction voltage (DEV), and apparent charge as a function of test voltage and time.

Three main relays of different manufacturing date were estimated by applying AC voltage with three patterns in ranges of 0 ~ 1,200 [V]. From the results, we could estimate insulation state and which types of defects exist in them.

Keywords : Dielectric Test, Partial Discharge, Insulation Performance, Discharge Inception Voltage, Discharge Extinction Voltage

유전체 시험, 부분방전, 절연성능, 방전개시전압, 방전소멸전압

1. 서론

고압, 저압의 전기전자부품 및 기기는 모두 절연계를 구성하고 있으며, 고압에서는 기체, 액체 또는 고체를 절연매체로 적용하고 있으나, 저압에서는 모두 고체 절연체만을 사용한다.

이들의 절연성능은 기기 및 부품의 고장발생과 수명에 직접적인 영향을 주는 주된 요소이므로 생산 및 출고 단계의 품질관리에서 절연성능을 평가하게 된다[1-3].

현재 저압용 전기전자부품 및 기기의 절연성능은 내전압 시험으로 평가하고 있다. 이 시험법은 기기 또는 부품의 사용전압의 5배 이상 높은 전압을 인가하기 때문에 시험에 의해 피시험체의 절연열화가 촉진될 수 있어 정확한 평가가 어렵고, 장기적 수명과 관계되는 미소 결함보다는 현재의 절연상태만을 판단한다. 따라서 절연성능 평가시 시험에 의해 피시험체의 절연열화를 발생시키지 않는 절연평가기술이 요구되고 있으며, 최근에는 부분방전에 의한 절연진단과 안전성 평가에 대한 연구결과가 규격화되어 가고 있다[4,5].

연구결과에 따르면, 부분방전시험은 내전압시험에서 규정된 전압의 30~70 [%]에서도 시험이 가능하기 때문에 내전압시험에 비해 피시험체의 절연열화에 대한 영향이 적으며, 부분방전에 관한 파라미터의 분석으로 절연체의 적용이나 제조상의 균일도 등 절연에 관한 다수의 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 현재까지 저전압 전기전자기기에 대한 실질적인 절연평가 기준이나 특성이 명확하지 않은 실정 이므로 이 분야에 연구가 필요하다.

본 논문에서는 전동차 제어용 주계전기(정격 DC 100 [V])를 대상으로 부분방전시험을 수행하여 결과를 비교함으로써 계전기는 물론 저압용 전기전자기기 전반에 부분방전시험의 적용 가능성을 확인하였다.

2. 절연열화와 부분방전의 발생

절연시스템의 설계시 내부에 미소한 결함이나 보이드가 존재하지 않도록 제작하는 것이 불가능하더라도 이것이 절연성능에 영향을 미치지 않아야 한다. 그러나 기기를 사용함에 따라 전기적, 열적, 기계적, 환경적 요인들에 의하여 열화가 진행되며, 미소한 결함이나 보이드에 열화가 진전되면 크기가 커질 뿐만 아니라 다수의 결함이나 보이드가 추가적으로 생성된다.

† 책임저자 : 정희원, 한국해양대학교 전기전자공학부 교수
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

§ 정희원, 한국해양대학교 대학원 박사과정

* 정희원, 국립과학수사연구소 공업연구소

** 정희원, 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단 선임연구원

*** 정희원, 부산교통공사 호포차량사업소 검사2담당

주위온도 상승이나 자기발열에 의한 절연체의 열적 스트레스는 단기간 온도시험으로 영향을 평가할 수 있지만, 이러한 가속시험으로 열화기구가 바뀌지는 않는다. 일시적 충격이나 진동 등 기계적 스트레스는 매우 짧은 기간일지라도 보이드나 크랙 등 결함을 만들어 낼 수 있으며, 이들 결함과 절연층간에 가해지는 전기적 스트레스는 부분방전을 발생시키고 절연열화를 촉진시킨다. 특히 절연재료가 급속히 박막화되고 고체 절연체에서는 절연층간이나 보이드의 존재로 절연체가 허용하는 내전압보다도 훨씬 낮은 전압에서 부분방전이 발생한다[6-8].

그림 1에서와 같이 고체 절연체 내부에 보이드가 존재하는 경우, 절연체 양단에 고전압이 인가되어 높은 전계가 형성되면 상대적으로 크기 및 유전율이 작은 보이드 내부에 전계가 집중된다.

따라서 고체에 비하여 절연내력이 낮은 보이드 내부의 기체에서 방전이 발생하며, 이로 인하여 보이드는 열적, 화학적 열화가 촉진되면 보이드의 크기가 점차 증가되어 최종적으로 절연체의 유효 절연성능이 감소하게 된다.

이와 같이 보이드 내부에서 발생하는 부분방전의 발생 메커니즘은 그림 2의 절연체 등가회로를 이용하여 설명할 수 있

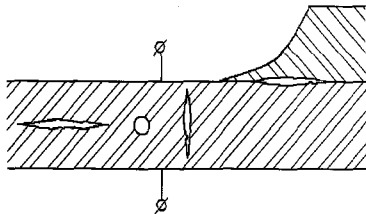
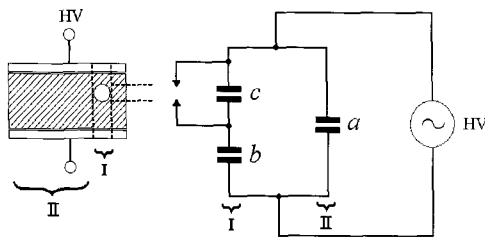
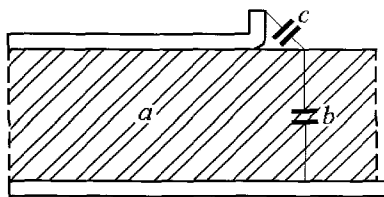


그림 1. 절연체 내부 보이드의 예



(a) 보이드 방전



(b) 연면 방전

그림 2. 보이드가 존재하는 절연체의 등가회로

다. 그림 2(a)에서 영역 I은 절연체에 결함이 존재하는 부분이며, 영역 II는 이를 제외한 절연체의 나머지 부분이다.

결함 부분에서 보이드의 정전용량은 c로 표현되며, 이것은 절연파괴 통로로서 작용하게 된다. b는 보이드와 직렬로 접속된 나머지 부분의 정전용량이고, a는 정상적인 부분의 정전용량을 나타낸다.

그림 2(b)는 연면방전의 예를 나타낸 것으로서 등가회로는 그림 2(a)와 동일하게 표현된다.

절연체에 내부 보이드나 표면에 결함이 존재하는 경우 교류 운전전압이 인가되면 결함 내의 정전용량 c에 전계가 집중적으로 가해지고 공기의 절연내력 이상이 되면 보이드 내부에서 불꽃 방전의 형태로 부분방전이 발생하게 된다.

3. 절연평가

본 논문에서는 전동차 제어회로의 핵심부품인 주계전기를 대상으로 내전압시험과 부분방전검출에 의한 절연성능 평가를 수행하였다. 본 실험에 사용된 시료의 사양은 표 1과 같다.

내전압시험은 KS R 9197(철도차량의 절연저항 및 내전압 시험방법), 건설교통부의 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준과 IEC 60664-1에 의거하여 시험하였으며, 이 때 시험전압은 계산식 (1)을 적용하였다[7,9,10].

$$U_t = 2 \times U_n + 1,000 \text{ [V]} \quad (1)$$

여기서, U_t 는 시험전압, U_n 은 피시험체의 사용전압으로 실효값을 나타낸다.

본 연구에서는 계전기 여자코일의 절연성능 평가를 목적으로 하였으며, 이를 위해 시험대상을 그림 3에서와 같이 계전

표 1. 계전기의 전기적 사양

구분	정격전압 [V]	코일저항 [Ω]	정전용량 [pF]	제조년월일
A	DC 100	1,643	34.79	1986년 5월
B	DC 100	1,626	34.95	2003년 7월
C	DC 100	1,616	34.87	2007년 4월

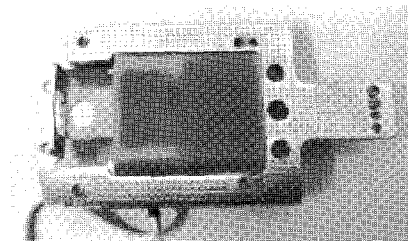
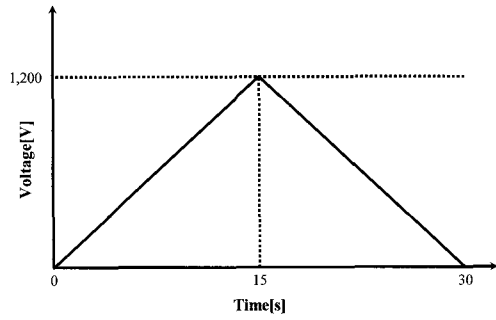
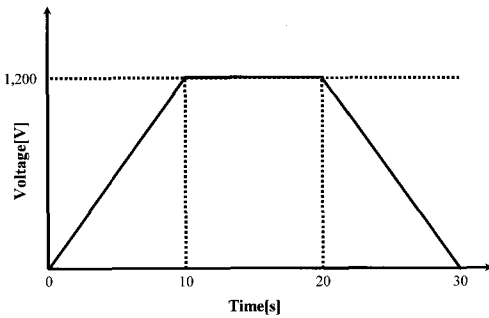


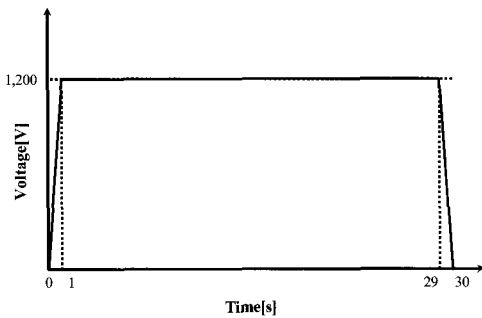
그림 3. 계전기의 여자코일



(a) 패턴 1



(b) 패턴 2



(c) 패턴 3

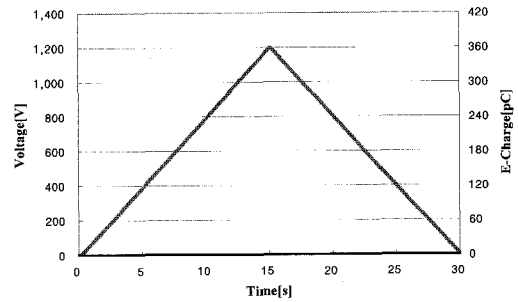
그림 4. 시험전압의 인가패턴

기의 외부 케이스를 제거하여 내부권선과 중심 금구류(가동 전극)로 제한하였다.

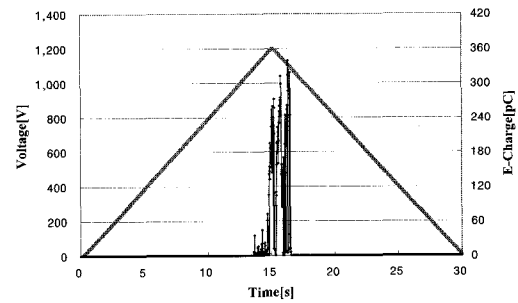
내전압시험은 전용의 내전압시험기(KIKUSUI, TOS8850A)를 이용하여 1,200 [V]를 인가하였으며, 시험결과, 3개의 시료 모두 절연상태가 양호한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 각 시료의 절연성능을 비교, 분석하기 위하여 시험전압을 최대 1,500 [V]까지 인가하였으나, 모두 정상상태를 나타내어 각 시료에 따른 절연성능의 차이를 판별할 수 없었다.

부분방전시험은 IEC 60270(부분방전 측정)에 정의된 교정 방법 및 시험조건을 만족하는 시험기(KIKUSUI, KPD2050)를 사용하여 시험전압의 인가패턴에 따른 방전전하량, 방전 개시 및 소멸전압을 측정·분석하였다[11].

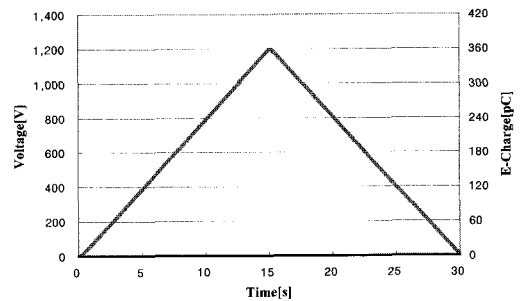
시험전압은 상승시간 및 최대전압의 지속시간에 대한 검출 특성을 비교, 분석하기 위하여 그림 4에서와 같이 3가지의 패



(a) 시료 A



(b) 시료 B



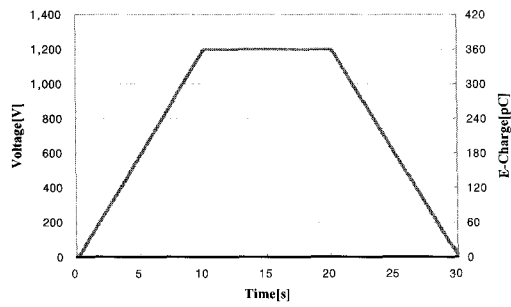
(c) 시료 C

그림 5. 패턴 1의 시험전압에서 부분방전시험 결과

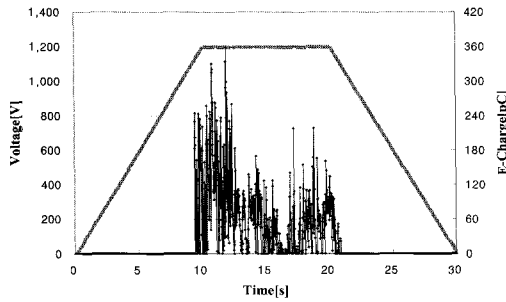
턴으로 선정하였다. 또한 최대시험전압은 각 시료의 절연성능 및 검출할 수 있는 방전전하량을 고려하여 내전압시험과 동일한 1,200 [V]로, 인가시간은 내전압시험보다 짧은 30 [s]로 설정하였다.

그림 4의 각 시험전압을 계전기 내부권선과 중심 금구류에 인가하여 시험한 결과를 그림 5~7에 나타내었다. 패턴 1의 시험전압을 인가한 경우, 그림 5와 같이 시료 A와 시료 C에서는 방전전하가 검출되지 않았으나, 시료 B에서는 최대시험전압 부근에서 최대 339 [pC]이 관측되었다.

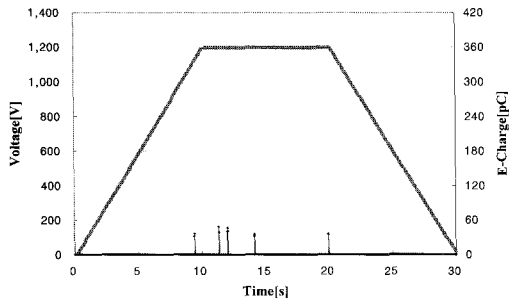
패턴 2의 시험전압 인가시 그림 6에서와 같이 시료 A에서는 부분방전이 발생하지 않았다. 그러나 시료 B의 경우, 전압 인가로부터 9.4 [s] 경과 후 최대전압에서 스트레스가 지속되면서 최대 359 [pC]의 방전펄스가 기록되었으며, 시료 C에서는 최대 48.5 [pC]의 방전펄스가 측정되었다.



(a) 시료 A



(b) 시료 B



(c) 시료 C

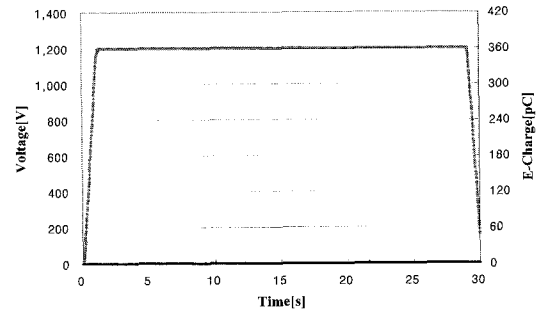
그림 6. 패턴 2의 시험전압에서 부분방전시험 결과

시료 B는 시료 C에 비해 방전펄스의 크기가 수 배 이상 크게 나타났으며, 부분방전이 최대전압이 유지되는 10 [s] 동안 지속적으로 발생하는 것을 확인하였다.

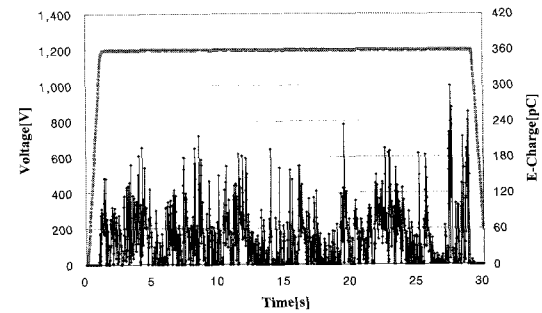
이는 시료 B가 시료 C에 비해 다수의 큰 결함이 존재하며, 절연열화가 진행되었음을 의미한다. 또한, 시료 B가 신제품인 시료 C에 비해 약 4년 정도 사용된 기사용품임을 감안하면 사용기간에 따라 열화가 다소 진행되었다고 할 수 있으며, 동일계통에 설치된 20여년간 열화된 시료 A에 비하면 상대적으로 절연성능이 낮다는 것을 알 수 있다.

이처럼 부분방전시험은 비록 내전압시험을 통과한 제품이더라도 각각의 절연성능 비교가 가능하며, 방전전하량의 크기만으로도 절연상태를 비교, 분석할 수 있었다.

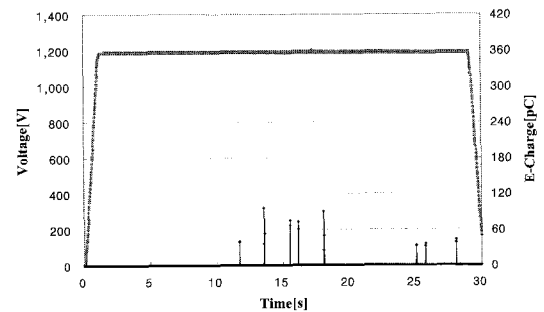
패턴 3의 시험전압을 인가하는 경우, 그림 7에서와 같이 시료 A에서는 방전펄스를 관측할 수 없었으며, 시료 B의 DIV



(a) 시료 A



(b) 시료 B



(c) 시료 C

그림 7. 패턴 3의 시험전압에서 부분방전시험 결과

는 1.05 [kV], 시료 C는 1.19 [kV]를 나타내었다.

또한, 시료 B는 최대전압의 지속시간 즉, 절연층간 전계 스트레스의 인가시간이 길어짐에 따라, 방전펄스가 간헐적으로 발생하는 시료 C와는 달리 지속적인 방전펄스가 관측되었다. 이는 열적 또는 전기적 스트레스를 장시간 받는다면 시료 B는 급격히 열화가 진행될 수 있음을 나타내는 것으로 절연수명도 시료 A와 C에 비해 현저히 짧을 것으로 예상된다.

부분방전시험 결과, 시료 B와 C에서만 부분방전이 검출되었으며, 시험전압의 인가형태에 따른 최대방전전하량, DIV와 DEV는 표 2 및 표 3과 같이 측정되었다.

이는 시험전압의 상승, 하강시간에 따른 DIV와 DEV는 큰 차이가 없었지만, 최대시험전압의 지속시간에 따라 방전전하량의 크기 및 발생빈도는 구별되는 특징을 나타내었다.

표 2. 시료 B의 부분방전 시험결과

시험전압 패턴	최대방전전하량 [pC]	DIV [kV]	DEV [kV]
패턴 1	339	1.15	1.16
패턴 2	359	1.19	1.18
패턴 3	299	1.05	1.17

표 3. 시료 C의 부분방전 시험결과

시험전압 패턴	최대방전전하량 [pC]	DIV [kV]	DEV [kV]
패턴 1	0	-	-
패턴 2	48.5	1.11	1.19
패턴 3	95.8	1.19	1.19

따라서 부분방전시험에 있어서 절연성능 평가에 영향을 주는 요소는 시험전압의 상승, 하강시간보다 최대시험전압의 인가시간이며, 이를 평가의 주요 변수로 활용할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 논문은 전동차 주계전기의 절연상태를 파악하기 위하여 여자코일 일단자와 외부 금구사이에 내전압시험 및 부분방전 시험을 수행하였으며, 시험전압의 인가 패턴에 따른 방전 파라미터를 비교, 분석하였다.

각 시료는 기준 시험전압의 125 [%]인 1,500 [V]를 인가한 내전압시험에서도 절연성능에 이상유무 및 차이를 확인할 수 없었다. 그러나 본 연구에서 제안한 시험전압의 세 가지 인가 패턴에 따라 각 시료의 방전 파라미터는 차이를 나타내었으며, 절연성능은 시료 A, 시료 C, 시료 B의 순으로 양호하게 나타났다.

특히, 시험전압의 상승, 하강시간에 따른 DIV와 DEV의 뚜렷한 변화가 관측되지 않았으며, 최대시험전압의 지속시간이 증가함에 따라 각 시료의 방전펄스의 크기 및 횟수가 비례적으로 증가하였다. 따라서 부분방전시험을 이용한 절연성능 평가시 최대시험전압의 지속시간이 주요 변수로 활용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부 지역혁신 인력양성사업과 건설교통부 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. KS C 2127, 1996, 절연 재료의 내전압 시험 방법, Korean Standards Association.
2. A. Kelen and M. G. Danikas. (1994). "Evidence and presumption in PD diagnostics", IEEE Trans. on DEI, Vol. 2, No. 5, pp.780.
3. A. Lapp and H. G. Kranz. (2000). "The use of CIGRE data form at for PD diagnosis application", IEEE Trans. on DEI, Vol. 7, No. 1, pp.102.
4. W. Pfeiffer. (1991). "Partial-discharge testing of components for low-voltage equipment", IEEE Trans. on DI, Vol. 31, No. 4, pp.247.
5. A. Mbaye, F. Grigorescu, T. Lebey, and Bui Ai. (1996). "Existence of partial discharges in low-voltage induction machines supplied by PWM drives", IEEE Trans. on DEI, Vol. 3, No. 4, pp.554.
6. IEC 60-1, 1995, Medical electrical equipment-Part 1: General requirements for safety, International Electrotechnical Commission.
7. IEC 60664-1, 2002, Insulation coordination for equipment within low-voltage systems - Part 1: Principles, requirements and tests, International Electrotechnical Commission.
8. IEC 61558-1, 2005, Safety of power transformers, power supplies, reactors, and similar products, International Electrotechnical Commission.
9. KS R 9197, 1996, 철도차량의 절연저항 및 내전압 시험방법, Korean Standards Association.
10. 건설교통부 고시, 2000, 도시철도차량의 성능시험에 관한 기준, 건설교통부.
11. IEC 60270, 2001, High-voltage test techniques - Partial discharge measurement, International Electrotechnical Commission.

(2007년 7월 4일 논문접수, 2007년 8월 6일 심사완료)