

## 부분방전 측정에 의한 하이브리드차량 견인전동기의 절연성능평가

### Evaluation on Insulation Performance of Traction Motors for a Hybrid Vehicle by Partial Discharge Measurement

박대원\* · 박찬용\*\* · 최재성\*\* · 길경석<sup>†</sup> · 이강원\*\*\*

Dae-Won Park · Chan-Yong Park · Jae-Sung Choi · Gyung-Suk Kil · Kang-Won Lee

**Abstract** This paper dealt with the insulation evaluation by a measurement of partial discharge (PD) on traction motors used in a hybrid vehicle. The PD method has been accepted as an effective and a non-destructive technique to evaluate insulation performance of low-voltage electric and electronic devices. In this paper, the PD measurement system which was manufactured with a coupling network, a low noise amplifier, and an associated electronics is described. The PD measurement system has the frequency bandwidth of 1 [MHz] ~ 30 [MHz] at -3 [dB] and the stable sensitivity of 19 [mV/pC] for the traction motor. From the experimental results, discharge inception voltage (DIV) and apparent charge (q) were 1,100 [V<sub>rms</sub>] and 105 [pC] for the used motor, and 1,400 [V<sub>rms</sub>] and 84 [pC] for the new one. By comparing the DIV and q, we could evaluate the insulation condition for the traction motors.

**Keywords** : Insulation evaluation, Partial discharge (PD), Traction motor, Hybrid vehicle, Coupling network, Discharge inception voltage (DIV), Apparent charge (q)

**요 지** 본 논문에서는 부분방전 측정에 의한 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연평가에 대하여 기술하였다. 부분방전법은 효과적인 비파괴시험으로 저압용 전기전자기기의 절연성능평가에 사용되어 왔다. 부분방전 측정시스템은 결합회로망, 저잡음 증폭회로 및 주변 전자회로로 구성되며, 주변 잡음의 영향을 최소화하기 위하여 차폐함내에 설치하였다. 교정실험으로부터 부분방전 측정시스템의 주파수 대역은 1[MHz]~30[MHz] (-3[dB]), 감도는 19[mV/pC]로 평가되었다. 기사용 전동기와 신품 전동기에서 방전개시전압(DIV)과 겘보기 전하량(q)을 측정한 결과, 기사용 전동기의 방전개시전압은 1,100[V<sub>rms</sub>], 겘보기 전하량은 105[pC], 신품 전동기에서의 방전개시전압은 1,400[V<sub>rms</sub>], 겘보기 전하량은 84 [pC]이었다. 방전개시전압과 전하량을 비교함으로써 견인전동기의 절연상태를 평가할 수 있었다.

**주요어** : 절연평가, 부분방전, 견인전동기, 하이브리드 차량, 결합회로망, 방전개시전압, 겘보기 전하량

## 1. 서론

현대사회 최대의 이슈인 기후변화 및 에너지절감과 관련하여 전기철도와 하이브리드 차량에 대한 관심이 고조되면서 이에 대한 연구도 전 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 하이브리드 차량은 두 개 이상의 동력원을 사용하는 것으로 주로 엔진, 연료전지 및 전동기를 조합하여 사용하고

있으며, 차세대 운송수단으로서 각광을 받고 있다. 이들은 구동장치로 견인전동기를 사용하며, 인버터의 사용으로 가변속 제어성능이 크게 향상되었으나 운전조건에서는 절연을 위협받고 있어 이에 대한 신뢰성 확보가 요구된다. 인버터 구동 견인전동기에서는 고속 스위칭소자의 동작에 의해 [ $\mu$ s]당 최고 수 천 [V]의 과도전압이 발생할 수 있으며, 견인전동기의 고정자권선에 불규칙적인 전압분포를 야기시켜 절연파괴를 초래할 수 있다[1-7]. 또한 제조시 결함 및 고온, 흡습, 진동과 같은 운전환경에 의해 절연성능이 저하될 수 있으므로 이에 대한 평가와 분석이 필요하다.

전동기의 절연성능을 평가하는 방법에는 내전압시험, 서지시험, 절연저항측정시험 및 유전정접시험 등이 있으나

<sup>†</sup> 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 교수  
E-mail : kilgs@hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4414 FAX : (051)403-1127

<sup>\*</sup> 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 박사과정

<sup>\*\*</sup> 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부 석사과정

<sup>\*\*\*</sup> 정회원, 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단 선임연구원

현재는 내전압시험과 절연저항의 측정만으로 절연성능을 평가하고 있다. 내전압시험은 피시험체에 비교적 높은 전압을 인가하므로 절연물의 성능저하를 초래하며, 절연저항 시험은 절연체 내부 결함을 검출하기 어렵다. 따라서 시험 전압을 가능한 낮게 설정하여 피시험기의 절연성능에 영향을 주지 않으면서 효과적으로 평가할 수 있는 방법이 요구되고 있다[8-12]. 본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인 전동기의 절연성능을 평가하기 위하여 부분방전 측정시스템을 설계·제작하였으며, 1일 12시간씩 5년간 운행에 사용된 기사용 전동기와 신품 전동기를 대상으로 방전개시전압(DIV)과 겹보기 전하량(q)을 측정하여 절연상태를 비교·분석하였다.

## 2. 부분방전 측정시스템

### 2.1 설계 및 제작

일반적으로 부분방전 신호는 상승시간이 수~수 십 ns 정도의 고주파 펄스형태로 발생하기 때문에 이를 검출하기 위해서는 결합콘덴서 및 검출임피던스로 구성되는 결합회로망이 필요하다[13,14]. 본 논문에서는 인가전압인 상용주파수 전압은 완전히 차단하고, 부분방전 신호만을 통과시키는 고역통과필터의 특성의 결합회로망을 구성하였다. Fig. 1에 결합회로망의 기본회로와 주파수특성을 나타내었다.

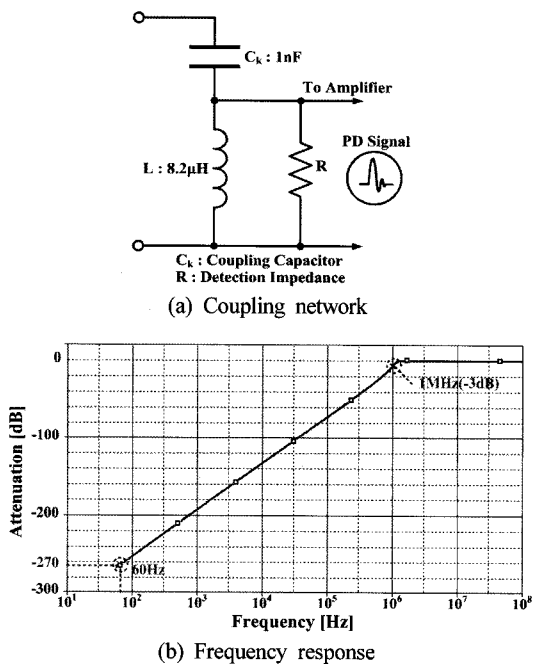
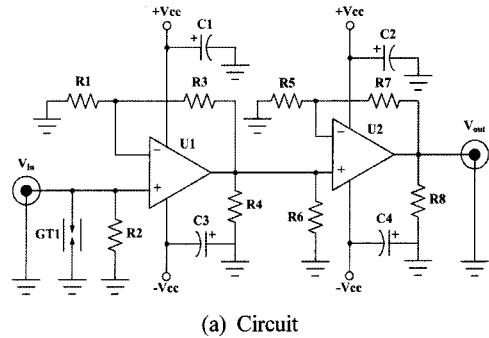
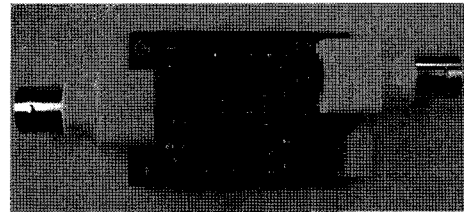


Fig. 1. Coupling network and its frequency response

결합회로망은 60[Hz] 상용주파수 전압을 -270[dB]로 감쇄시키며, -3[dB]가 되는 차단주파수는 1[MHz]로 부분방전 신호를 검출할 수 있는 특성을 갖는다. 부분방전신호는 크기가 매우 작아 외부 노이즈의 영향을 받기 쉬우므로 외부잡음의 영향을 최소화 하기위해 측정회로를 차폐함내에 설치하였다. 또한 미소 부분방전신호를 증폭하기 위해 주파수 범위 DC~420[MHz]인 연산증폭기를 사용하여 Fig. 2와 같이 2단 증폭회로를 구성하였다.



(a) Circuit



(b) Photograph

Fig. 2. The Prototype amplifier

증폭회로의 주파수응답은 신호발생기를 이용하여 정현파 입력전압에 대한 출력전압의 비율로서 평가하였다. 설계·제작한 증폭회로의 이득은 40[dB]이며, -3[dB]의 주파수 대역은 100[kHz]~30[MHz]로 결합회로망에서 전달된 부분방전 펄스를 감쇄없이 증폭시킬 수 있는 특성이다.

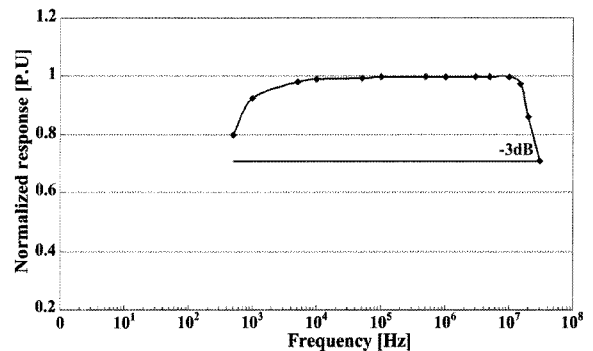
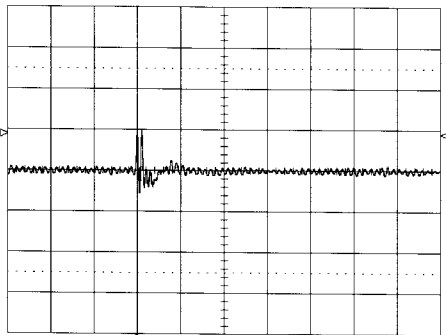


Fig. 3. Frequency response of the PD amplifier

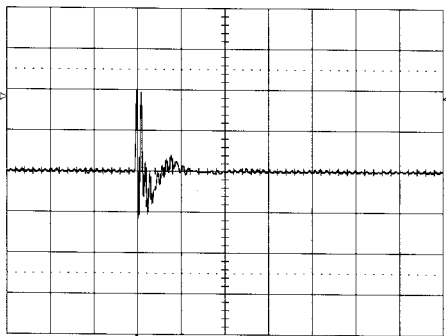
## 2.2 교정실험

측정시스템의 감도를 산출하기 위하여 전용의 교정기 CAL 1A(PD Diagnostix, 1[pC] ~ 100[pC])를 이용하여 교정실험을 수행하였다. 교정펄스신호는 선로 길이, 교정기의 설치 위치, 전동기의 구조적 특성에 따라 펄스의 형태 및 크기가 달라지므로 동일한 조건에서 실험을 수행하였으며, 차폐함 내에서 잡음레벨은 3.19[mV<sub>p-p</sub>]로 측정되었다. Fig. 4에 교정펄스에 대한 측정시스템의 검출파형을 나타내었으며, 측정감도는 Fig. 5 및 Table 1과 같다.



[200 mV/div, 500 ns/div]

(a) 10 [pC]



[500 mV/div, 500 ns/div]

(b) 50 [pC]

Fig. 4. Typical waveforms of calibration pulse

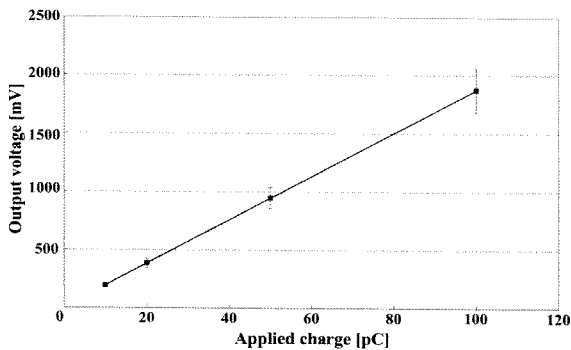


Fig. 5. Output voltage as a function of applied charge

교정실험결과, 부분방전 측정시스템은 10[pC]에서 100 [pC]까지 선형적인 출력특성을 나타내었으며, 측정감도는 약 19[mV/pC]로 산출되었다.

Table 1. Calibration results

Applied Charge [pC]	Output voltage [mV]	Sensitivity [mV/pC]
10	197	19.7
20	386	19.3
50	938	18.9
100	1,890	18.9

## 3. 측정 및 분석

부분방전 측정시스템을 이용하여 하이브리드 차량용 견인전동기(3상 400[V] 52마력)에서 부분방전을 측정하였으며, 실험계의 구성은 Fig. 6과 같다.

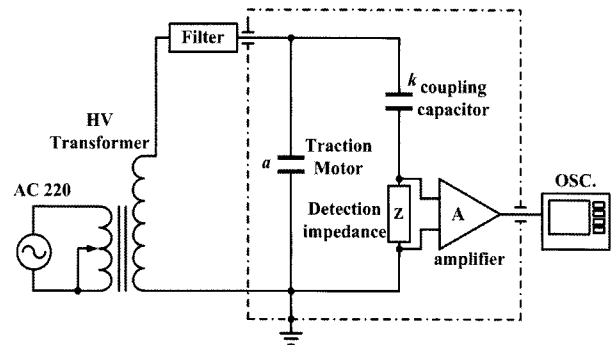


Fig. 6. Configuration of the experimental apparatus

견인전동기의 고정자 권선과 외함간에 고전압 변압기 (220[V]/5[kV], 30[mA])를 연결하고, 전압을 서서히 증가시키면서 부분방전을 측정하였다. 방전개시전압(discharge inception voltage, DIV)과 겉보기 전하량(apparent charge)의 관계로부터 기사용 전동기와 신품 전동기의 절연상태를 비교·분석하였다.

인가전압에 따라 검출된 부분방전파형의 예를 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 기사용 전동기의 DIV는 1,100[V<sub>rms</sub>]이었으며, 이때의 방전펄스의 크기는 2[V<sub>max</sub>]로 이는 105 [pC]에 해당한다. 신품 전동기에서 DIV는 1,400[V<sub>rms</sub>], 겉보기 전하량은 84[pC]에 해당하는 1.6[V<sub>max</sub>]가 측정되었다.

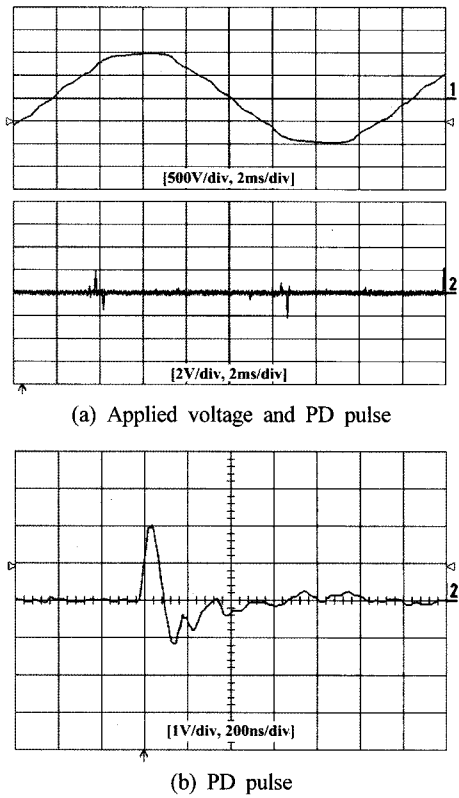


Fig. 7. Typical PD waveforms detected in a used motor

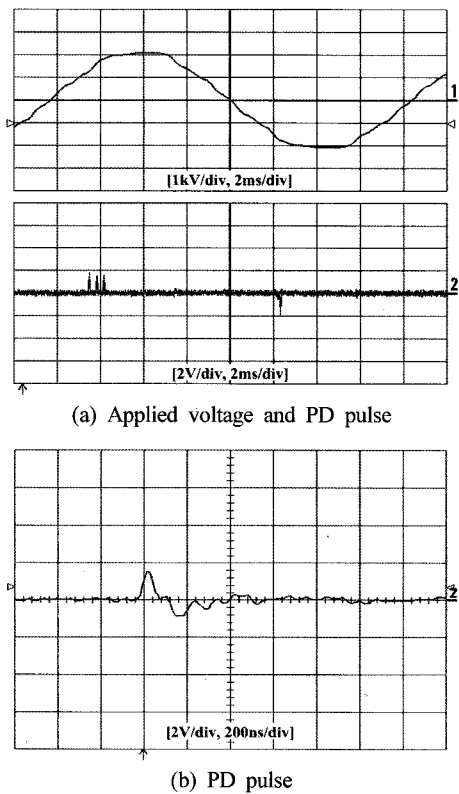


Fig. 8. Typical PD waveforms detected in a new motor

실험결과로부터 기사용 전동기는 신품 전동기와 비교하여 방전개시전압은 낮고 방전전하량은 크게 나타남을 알 수 있다. 이상에서와 같이 부분방전 측정에 의한 방법은 1,800[V<sub>rms</sub>]를 인가하는 내전압시험보다 낮은 전압레벨에서 절연성능 평가가 가능하여, 피시험체의 절연성능에 영향을 미치지 않으므로 시험후에도 사용이 가능하다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능평가를 위하여 부분방전 측정시스템을 설계·제작하였으며, 교정실험을 통하여 감도를 산출하고 기사용 전동기와 신품 전동기를 대상으로 DIV와 겉보기 전하량을 측정하였다.

측정시스템의 외부잡음에 대한 평가결과, 잡음레벨은 최대 3.19[mV<sub>pp</sub>]로 측정되었으며, 교정실험에 의해 산출된 측정시스템의 감도는 19[mV/pC]으로 나타났다. 인가전압은 피시험체의 절연성능을 저하시키지 않는 범위로서 내전압시험의 인가전압인 1,800[V<sub>rms</sub>]보다 낮게 설정하였다. 기사용 전동기와 신품 전동기에서 부분방전을 측정된 결과, 기사용 전동기에서는 1,100[V<sub>rms</sub>]에서 부분방전이 발생하였으며, 105[pC]의 겉보기 전하량이 검출되었다. 신품 전동기에서는 기사용 전동기보다 다소 높은 1,400[V<sub>rms</sub>]에서 부분방전이 발생하였으며 겉보기 전하량은 84[pC]이 검출되었다.

실험결과, 내전압시험보다 80[%] 이하의 낮은 전압을 인가하여 피시험체에 영향을 미치지 않고 절연성능을 평가할 수 있었으며, 기사용 전동기는 신품 전동기에 비해 낮은 전압에서 큰 방전전하량이 검출되어 절연상태가 좋지 못한 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

#### 참고문헌

1. H. Brandes and J. A. Allison (2000), "Insulating Systems for Inverter-Driven Motors; Status and Developments", Power Engineering Journal, Vol.14, No.4, pp.164-168.
2. L. Gubbala, A. Von Jouanne, P. N. Enjeti, C. Singh, H. A. Toliyat (1995), "Voltage Distribution in the Windings of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages", Power Electronics Specialists Conference, 1995. PESC'95, 26th Annual IEEE, Vol.1, pp.579-585.

3. Christopher J. Melhorn, Le Tang (1997), "Transients Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol.33, No.4, pp.1065-1072.
  4. G. Suresh, H.A. Toliyat, D.A. Rendusara, P.N. Enjeti (1999), "Predicting the transient Effects of PWM Voltage Waveform on the Stator Winding of Random Wound Induction motors", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.14, No.1, pp.23-30.
  5. A. H. Bonnett (1996), "Analysis of the impact of pulse-width modulated inverter voltage waveforms on AC induction motors", IEEE Trans. on IAS, Vol.32, pp.386-392.
  6. Martin Kaufhold, Herbert Auinger, Matthias Berth, Joachim Speck, and Martin Eberhardt (2000), "Electrical Stress and Failure Mechanism of the Winding Insulation in PWM-Inverter-Fed Low-Voltage Induction Motors", IEEE Transactions on Insulation Electrical Vol.47, No.2, pp.396-402.
  7. 길경석, 류길수, 박대원, 조영진, 천상규, 최수연 (2007), "인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석", 한국철도학회 논문집, 제10권 제6호, pp.650-654.
  8. A. Cavallini, M. Conti, A. Contin, and G. C. Montanari (2003), "Advanced PD Inference in On-Field Measurements. Part 2: Identification of Defects in Solid Insulation Systems", IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.10, No.3, p.527.
  9. R. C ndela, G. Mrelli and R. Schifani (2000), "PD Recognition by Means of Statical and Fractal Parameters and a Neural Network", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.7, No.1, pp.87-94.
  10. G. C. Stone, T. E. Goodeve, H. G. Sedding and W. McDermid (1995), "Unusual PD Pulse Phase Distributions in Operating Machines", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol.2, No.4, pp.567-577.
  11. Gyung-Suk Kil, Jae-Yong Song, Jae-Man Song, Don-Ha Hwang, Dong-Sik Kang, Yong-Ju Kim (2006), "Study on a Partial Discharge Test for Low-Voltage Electronic Components", Journal of Korean Physical Society, Vol.49, No.6, pp.2311-2315.
  12. 길경석, 송재용, 문승보, 차명수, 황돈하, 강동식 (2006), "저압용 전기전자기기에 부분방전시험의 적용을 위한 기초연구", 한국 전기전자재료학회논문지, 제19권 제6호, pp.586-590.
  13. F. H. Kreuger (1989), "Partial Discharge Detection in High-Voltage Equipment", p.129.
  14. IEC 60270 Publication(2001), "High-Voltage Test Techniques -Partial Discharge Measurement".
- 접수일(2008년 10월 7일), 수정일(2008년 12월 4일),  
게재확정일(2009년 4월 9일)