하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능 비교분석

Comparative Analysis on Insulation Performance of Traction Motors for a Hybrid Vehicle

박대원† 박찬용* 길경석§ 이강원§§

Dae-Won Park Chan-Yong Park Gyung-Suk Kil Kang-Won Lee

ABSTRACT

The purpose of this paper is to acquire the data related to insulation evaluation of hybrid vehicle traction motors. We carried out a comparative analysis on Insulation Resistance (IR) and Polarization Index (PI) of motor stators according to IEEE Std. 43 and IEC 60085-1 for insulation resistance test standard of rotating machinery. Maximum test voltage which is applied to between a phase and enclosure was set at 500 V. The IRs of the used motors were lower than those of the new ones. The PIs of the used motor were ranges from 0.74 to 1.1 and did not meet the recommendation basis 2 for insulation level H.

From the experimental results, we could prepare parameters and basis for insulation evaluation of motor stators by comparative analysis of the IR and the PI.

1. 서 론

화석연료의 고갈에 따른 고유가 현상과 환경오염의 문제로 전기철도나 하이브리드 차량에 대한 관심이 증대되고 있으며 국내외적으로 하이브리드 차량에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 전기철도나 하이브리드 차량은 견인전동기가 차량의 주요 동력원으로 사용되고 있다. 차량에서 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어 운전상태의 고신뢰성이 요구된다[1]. IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)나 FET(Field Effect Transistor)와 같은 전력용 반도체 소자의 진보와 각종 제어기술의 발달에 따라 견인전동기의 가변속 제어성능이 크기 향상되었으며, 고효율 운전이 가능해졌다. 그러나 전력용 반도체 소자의 적용에 따른 과도전압의 발생은 전동기의 고정자권선에 불규칙적인 전압분포를 야기시켜 최종적으로 견인전동기의 절연파괴를 초래할 수 있다[2-5]. 또한 전동기의 제조시 결함이나 고온, 흡습, 진동과 같은 운전환경에 의해 절연열화가 진행되고 설계시 기대수명을 갖지 못하므로 기기의 신뢰성이 저하된다. 절연은 기기의 수명과 직접적으로 관련이 있으며, 절연성능을 평가하기 위해서는 기기에 대한 정확한 절연열화기구를 이해하고 상황에 가장 적합한 절연평가가 이루어져야 한다. 절연성능을 평가하는 방법에는 절연저항시험, 직류전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 있으며, 그 중 절연저항시험은 다른 절연시험과 비교해 흡습이나 오손 등의 결함에 의한 절연저항 저하의 유무를 진단하고, 절연상태를 추정하는데 주로 사용되고 있다[6-11]. 또한 절연저항계를 이용하기 때문에 측정이 용이하며, 시험전압이 낮고 측정법이 간단하여 일반적으로 많이 이용되고 있다.

† 책임저자 : 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 박사과정
E-mail : dwpark77@hhu.ac.kr
TEL : (051)410-4893 FAX : (051)403-1127
* 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 석사과정
§ 정회원, 한국해양대학교 전기전자공학부, 교수
§§ 정회원, 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단 선임연구원

본 논문에서는 정격전압 400 V, 절연등급 H종인 하이브리드 차량용 견인전동기를 대상으로 절연저항(Insulation Resistance, IR), 성극지수(Polarization Index, PI)를 측정하였으며 회전기의 절연에 대한 규격인 IEEE Std. 43과 IEC 60085-1에 대하여 기사용 전동기와 신품 전동기에서 측정된 결과를 비교하여 절연성능을 평가하였다.

2. 절연저항측정을 통한 절연평가

일반적으로 절연저항은 피시험체에 직류전압을 인가하여 누설전류를 측정함으로써 계산된다. 인가되는 시험전압은 피시험체의 정격전압에 따라 달라지게 되며 피시험체의 전기적인 사양을 파악하는 것이 중요하다. 절연저항 측정시 사용되는 시험전압을 표 1에 나타내었다.

표 1 절연저항 측정시 권장시험전압

정격전압[V]	시험전압[V]
<1,000	500
1,000~2,500	500~1,000
2,501~5,000	1,000~2,500
5,001~12,000	2,500~5,000
>12,000	5,000~10,000

절연저항 IR은 시험전압 E와 누설전류 I_l로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$IR = \frac{E}{I_l} \quad [\Omega] \tag{1}$$

그러나 누설전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 달라지며 시간에 따라 변하기 때문에 단편적인 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 판단하기 어렵다. 그림 1과 같이 건전한 고체절연물에서는 누설전류가 극히 미소하며 흡수전류가 감소하기 때문에 절연저항은 시간에 따라 초기에는 급격히 상승하고 시간에 따라 증가하지만 열화 또는 오손된 상태에서는 시간에 따른 절연저항의 상승비율이 급격히 감소하게 된다.

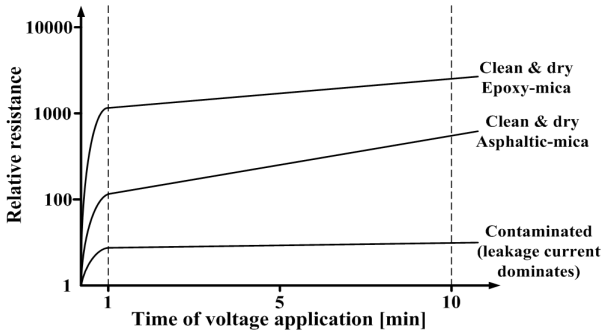


그림 1 시험전압의 인가시간에 따른 절연저항의 변화

이러한 누설전류 또는 절연저항의 시간변화를 나타내는 지표로서 성극지수가 사용되며 이를 이용하여 절연물의 상태를 판정한다. 성극지수는 1분 후의 절연저항 IR_1과 10분 후의 절연저항 IR_{10}의 비로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있으며 절연등급에 따른 최소 성극지수를 표 2에 나타내었다[12,13].

$$PI = \frac{IR_{10}}{IR_1} \tag{2}$$

표 2 절연등급에 따른 최소권장 성극지수

절연등급	최소 성극지수
Class A	1.5
Class B	2.0
Class F	2.0
Class H	2.0

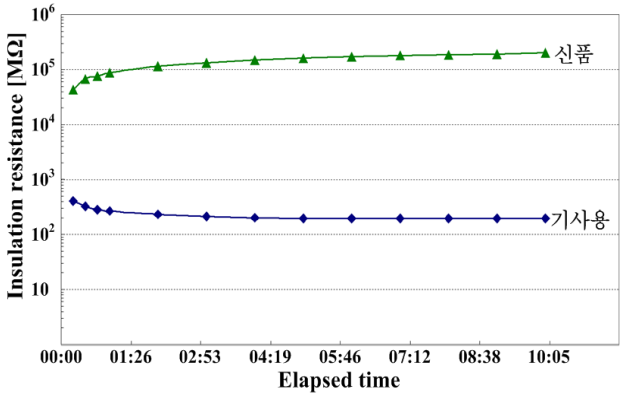
3. 측정 및 분석

본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연상태를 평가하기 위하여 기사용품과 신품을 대상으로 절연저항 및 성극지수를 측정, 분석하였다. 측정에 사용된 견인전동기의 사양은 표 2와 같다.

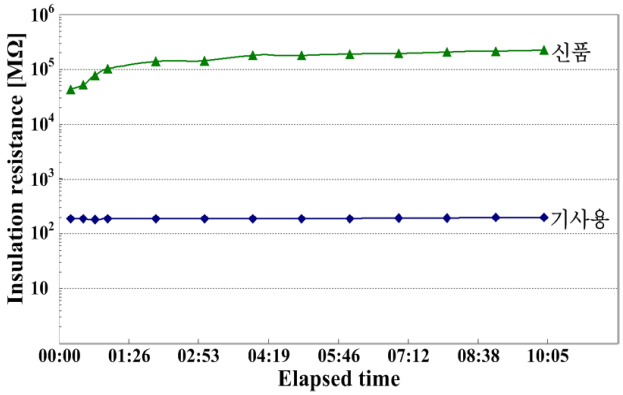
표 3 견인전동기의 사양

형 식	3상 6극 유도전동기
절연등급	H종
직류링크전압	480 [V]
정격전압/전류	400 [V]/82.7[A]

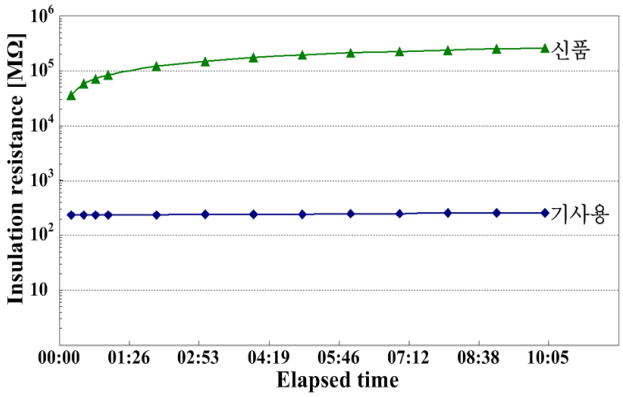
유도전동기의 정격전압이 400 V이므로 IEEE Std. 43에 의거하여 기사용 전동기와 신품 전동기의 각 상(U, V, W)과 외함에 시험전압 500 V를 인가하여 절연저항을 측정하였으며 측정결과를 그림 2에 나타내었다.



(a) U상-외함



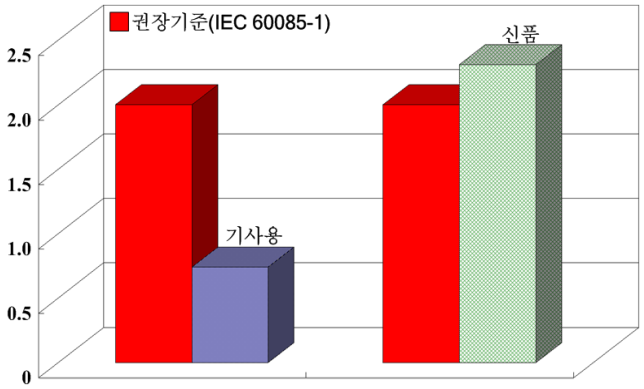
(b) V상-외함



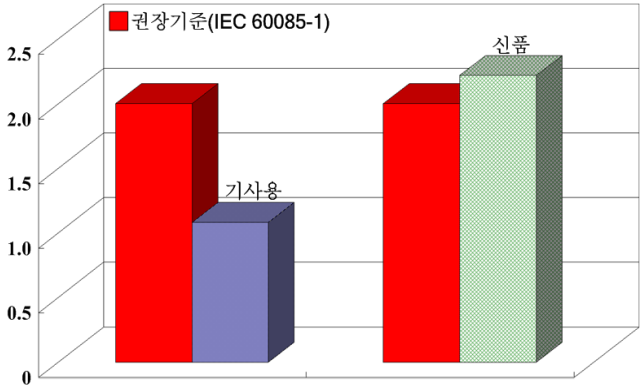
(c) W상-외함

그림 2 절연저항의 측정결과

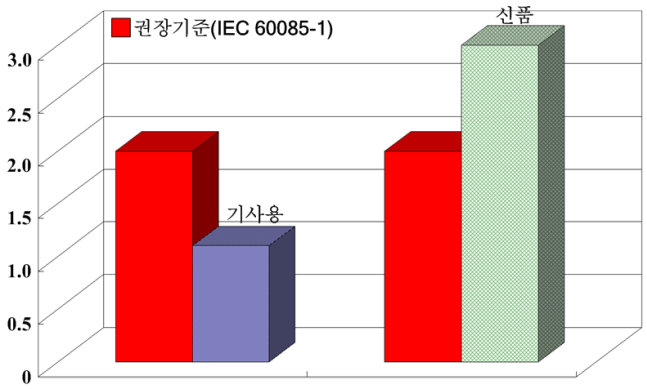
시간에 따른 절연저항의 측정결과, 기사용 전동기에서는 200~300 MΩ 정도로 신품 전동기에 비해 전체적으로 낮은 절연저항을 나타내었으며 10분 동안 절연저항이 감소 또는 유지하였으나 신품전동기에서는 기사용 전동기에 비해 높은 절연저항을 나타내었으며 시험전압을 인가하는 동안 절연저항이 증가하는 추세를 나타내었다. 또한 시간에 따라 측정된 절연저항을 이용하여 성극지수를 산출하였으며 절연저항의 시간변화와 비교하여 IEC 60085-1에 제시된 절연등급별 권장기준에 따라 절연상태를 평가하였다. 성극지수의 측정결과를 그림 3에 나타내었다.



(a) U상-외함



(b) V상-외함



(c) W상-외함

그림 3 성극지수의 측정결과

성극지수의 측정결과, 기사용 전동기에서는 U, V, W상에서 각각 0.74, 1.08, 1.1 로 최소 권장기준에 미달하는 결과를 나타냈으며 신품 전동기에서는 U, V, W상에서 2.31, 2.22, 3으로 2이상의 성극지수가 측정되어 절연상태가 양호한 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 논문에서는 하이브리드 차량용 유도전동기의 절연성능평가기준을 마련하기 위해 기사용 및 신품 전동기를 대상으로 시간에 따른 절연저항의 변화와 유전흡수율, 성극지수를 측정하고 그 결과를 비교하였다. 실험은 절연저항시험 규격인 IEEE Std. 43 및 IEC 60085-1에 따라 각 상과 외함 사이에 시험전압 DC 500 V을 인가하여 수행하였다. 시간에 따른 절연저항의 측정결과, 기사용 전동기에서는 200~300 MΩ 정도로 측정되었으며 신품 전동기에서는 수 백 GΩ의 높은 절연저항이 측정되었다. 그러나 절연저항은 피시험체의 크기나 구조에 따라 다르게 나타나므로 단순히 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 평가하기 어렵다. 따라서 시간에 따른 절연저항의 변화 및 성극지수를 측정하여 전동기의 절연상태를 평가하였다.

시간에 따라 측정된 절연저항을 이용하여 성극지수를 계산한 결과, 기사용 전동기는 0.74~1.1로 측정되어 권장 성극지수에 미달하였지만 신품 전동기에서는 2.22~3으로 권장기준을 만족하는 결과를 나타내었다. 절연저항의 시간변화, 성극지수를 측정함으로써 하이브리드 차량용 전동기의 절연성능을 평가할 수 있었다. 현재 시행되고 있는 전동기의 성능시험이나 절연평가에서도 단순 절연저항의 측정 외에 절연저항의 시간변화와 성극지수를 측정하여 절연상태나 성능을 평가해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계 효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

참고문헌

[1] H. A. Toliyat, G. Suresh, A. Abur(1997), “Simulation of Voltage Stress on the Inverter Fed Induction Motor Winding Supplied Through Feeder Cable”, Industry Application Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS ’97, Vol. 1, pp.143-150.

[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 Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp.1065-1072.

[4] E. Persson(1992), “Transient effects in application of PWM inverters to induction motors”, IEEE Trans on IAS, Vol.28, pp.1095-1101.

[5] U. Bammert and M. Beyer(2000), "Partial Discharges Measured with an Automated System in Epoxy Resin and Polyethylene", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, pp. 215-225.

[6] A. Krivda, E. Gulski, L. Satish and W. S. Zaengl(1995), "The Use of Fractal Features for Recognition of 3-D Discharge Patterns", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.889-892.

[7] R. E. James and B. T. Phung(1995), "Development of Computer-based Measurements and their Application to PD Pattern Analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, pp.838-856.

[9] E. Gulski(1995), "Diagnosis of HV Components by Digital PD Analyzer", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.630-640.

[10] C. Cachin and H. J. Wiesmann(1995), "PD Recognition with Knowledge based Preprocessing and Neural Networks", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, pp.578-589.

[11] IEEE 60043(2000), IEEE Recommended Practice for Testing Insulation Resistance of Rotating Machinery, pp.7~18.

[12] IEC 60085-1(1984), Thermal evaluation and classification of electrical Insulation, pp.5~29.