

하이브리드 차량용 견인전동기의 절연성능 비교분석

Comparative Analysis on Insulation Performance of Traction Motors for Hybrid Vehicles

최수연¹, 박찬용¹, 김성욱¹, 박대원¹, 길경석^{1,a}, 이강원²

(Su-Yeon Choi¹, Chan-Yong Park¹, Sung-Wook Kim¹, Dae-Won Park¹, Gyung-Suk Kil^{1,a}, and Kang-Won Lee²)

Abstract

The object of this paper is to acquire the data related to insulation evaluation of hybrid vehicle traction motors. We made a comparative analysis on Insulation Resistance (IR), Dielectric Absorption Ratio (DAR), and Polarization Index (PI) of the motor stators. The experiment was carried out according to IEEE Std. 43 and IEC 60085-1 for insulation resistance test standard of rotating machinery. Test voltage of 500 V was applied between a phase and the enclosure. The IR and the DAR of used motors were lower than those of new ones. The DAR and the PI were 0.92~1.02 and 0.74~1.1, respectively and the result 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 the traction motor stator by the comparative analysis of short-time insulation resistance changes, DAR and PI.

Key Words : Hybrid vehicle, Traction motor, Insulation performance, Insulation resistance (IR), Dielectric absorption ratio (DAR), Polarization index (PI)

1. 서론

화석연료의 고갈에 따른 고유가 현상과 환경오염의 문제로 하이브리드 차량에 대한 관심이 증대되고 있으며 국내에서도 하이브리드 차량에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 하이브리드 차량은 내연기관과 전기에너지를 동시에 사용하는 것으로 유도전동기가 차량의 주요 동력원으로 사용되고 있다. 그러나 전기철도나 하이브리드 자동차와 같은 전기자동차에서 사용되는 유도전동기 즉, 견인전동기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어 운전상태의 고신뢰성이 요구된다[1].

최근 IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor)

나 FET(Field Effect Transistor)와 같은 전력용 반도체 소자의 진보와 각종 제어기술의 발달에 따라 유도전동기의 고효율 운전이 가능해졌으며, 가변속 제어성능이 크게 향상되었다. 그러나 전력용 반도체 소자의 고속스위칭 동작에 의해 600 V 이하의 저압 유도전동기의 운전시에도 μ s이하의 상승시간당 최고 수 천 V의 과도전압이 발생할 수 있으며 전동기 권선에 불규칙적인 전압분포를 야기시켜 최종적으로 유도전동기의 절연파괴를 초래할 수 있다[2-5]. 또한 유도전동기의 제조시 결함이나 고온, 흡습 등 운전환경에 의해 절연열화가 진행되고 설계시 기대수명을 갖지 못하므로 기기의 신뢰성이 저하된다. 절연은 기기의 수명과 직접적인 관련이 있으며 이러한 절연성능을 평가하기 위해서는 기기에 대한 정확한 절연열화기구를 이해하고 상황에 가장 적합한 절연평가방법을 적용해야 한다. 현재까지의 절연시험법은 절연저항시험, 직류전류시험, 교류전류시험, 유전정접시험, 부분방전시험 등이 있으며 그 중 절연저항시험은 다른 절연시험과 비교해 흡습이나 오손 등의 결함에

1. 한국해양대학교 전기전자공학부 (부산시 영도구 동삼동 1)
2. 한국철도기술연구원 바이모달수송시스템연구단
a. Corresponding Author : kilgs@hhu.ac.kr
접수일자 : 2008. 11. 10
1차 심사 : 2008. 11. 19
심사완료 : 2008. 11. 24

의한 절연저항 저하의 유무를 진단하고, 절연상태의 추정에 사용되고 있다[6-11].

절연저항시험은 절연저항계를 이용하기 때문에 측정이 용이하며, 시험전압이 낮고 측정법이 간단하기 때문에 일반적으로 많이 이용되고 있다. 본 논문에서는 정격전압 400 V, 절연등급 H종인 하이브리드 차량용 견인전동기를 대상으로 절연저항 (Insulation Resistance, IR), 성극지수(Polarization Index, PI) 및 유전흡수율(Dielectric Absorption Ratio, DAR)을 측정하였으며 IEEE Std. 43과 IEC 60085-1 규격에 대하여 기사용 전동기와 신품 전동기에서 측정된 결과를 비교하여 절연성능을 평가하였다.

2. 절연평가방법

절연저항은 피시험체인 전동기의 권선과 외함에 직류전압을 인가하여 누설전류를 측정함으로써 산출된다. 인가되는 시험전압은 표 1과 같이 피시험체의 정격전압에 따라 달라지며 피시험체의 전기적인 사양을 파악하는 것이 중요하다.

표 1. 절연저항시험시 인가전압.

Table 1. DC voltage to be applied during IR test.

Winding rated voltage [V]	Insulation resistance test dc voltage [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_{leak} 로 나타낼 수 있으며 식 (1)과 같다.

$$IR = \frac{E}{I_{leak}} \quad [\Omega] \quad (1)$$

그러나 누설전류의 크기는 시료의 형태와 크기에 따라 달라지며 시간에 따라 변하기 때문에 단편적인 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 판단하기 어렵다. 그림 1과 같이 고체상태의 절연체가 건전한 상태에서는 누설전류가 극히 미소하며 흡수전류가 감소하기 때문에 절연저항은 시간에 따라 초기에는 급격히 상승하고 시간에 따라 증가하지

만 열화 또는 오손된 상태에서는 시간에 따른 절연저항의 상승비율이 급격히 감소하게 된다.

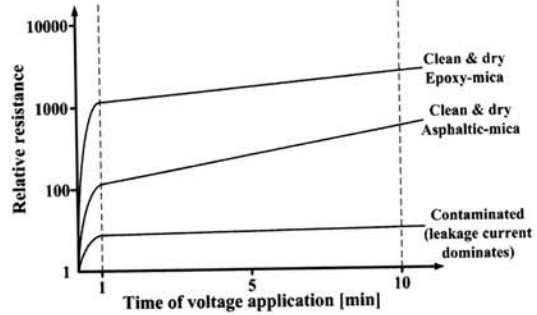


그림 1. 전압인가시간에 따른 절연저항의 변화.

Fig. 1. Changes of insulation resistance as a function of voltage application time.

이러한 누설전류 또는 절연저항의 시간변화를 나타내는 지표로서 유전흡수율과 성극지수가 사용되며 이를 이용하여 절연물의 상태를 판정한다.

유전흡수율은 t_1 후의 절연저항 IR_{t1} 과 t_2 후의 절연저항 IR_{t2} 의 비로서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$DAR = \frac{IR_{t2}}{IR_{t1}} \quad (2)$$

건전한 절연물에서 흡수전류는 그림 2와 같이 시험전압 인가 후 2~3분 동안 감소하므로 절연저항은 증가하며 유전흡수율이 1이상이면 절연상태가 양호한 것으로 판단할 수 있다[12].

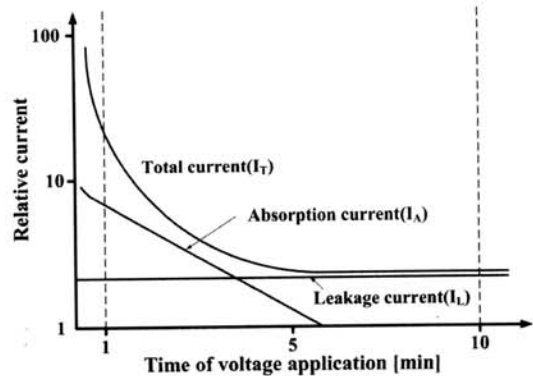


그림 2. 절연물에 흐르는 전류의 종류.

Fig. 2. Types of currents in insulation materials.

성극지수는 1분 후의 절연저항 IR_{1min} 과 10분 후의 절연저항 IR_{10min} 의 비로서 식 (3)과 같이 나타낼 수 있으며 IEC 60085-1에서는 절연등급에 따른 최소 성극지수를 표 2와 같이 권장하고 있다[13].

$$PI = \frac{IR_{10min}}{IR_{1min}} \quad (3)$$

표 2. 최소 권장 성극지수.

Table 2. Recommendation minimum PI value.

Thermal class	Minimum polarization index
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 고정자권선의 절연상태를 평가하기 위하여 기사용품과 신품을 대상으로 절연저항 및 성극지수를 측정, 분석하였다. 측정에 사용된 견인전동기의 사양은 표 3과 같다.

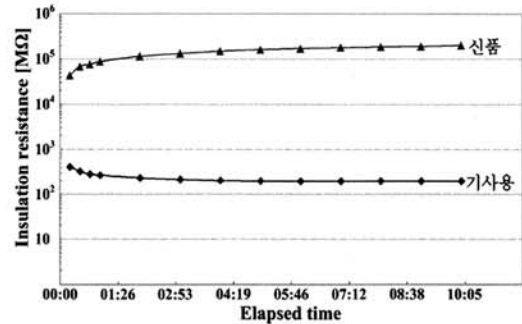
표 3. 견인전동기의 사양.

Table 3. Specification of the traction motor.

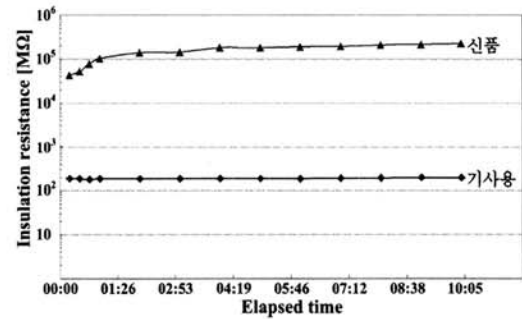
형식	3상 6극 유도전동기
절연등급	H종
직류링크전압	480 V
정격전압/전류	400 V / 82.7 A

견인전동기의 정격전압이 400 V이므로 IEEE Std. 43에 의거하여 기사용 전동기와 신품 전동기의 각 상(U, V, W)과 외함에 시험전압 500 V를 인가하여 절연저항을 측정하였다. 측정결과를 그림 3에 나타내었다.

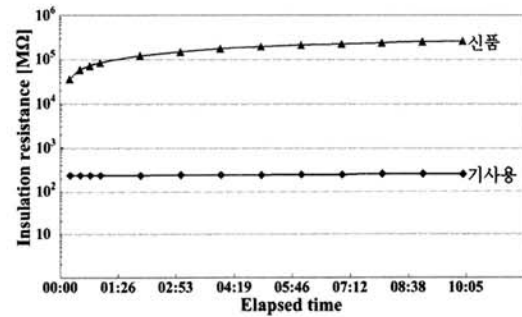
절연저항의 측정결과, 기사용 전동기에서는 200~300 MΩ 정도로 신품 전동기에 비해 전체적으로 낮은 절연저항을 나타내었으며 10분 동안 절연



(a) U상-외함



(b) V상-외함



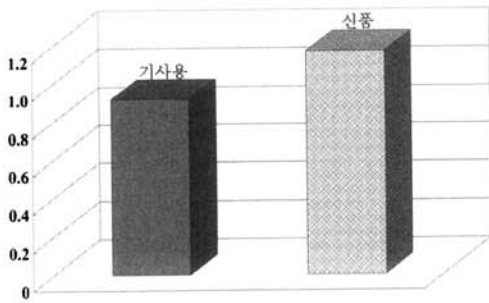
(c) W상-외함

그림 3. 절연저항의 측정결과.

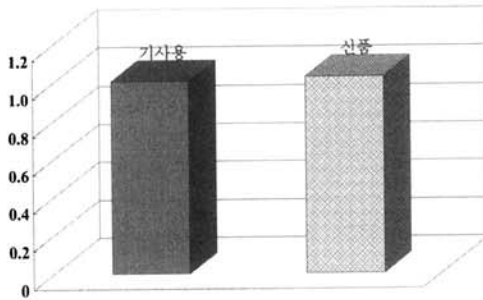
Fig. 3. Measurement result of IR.

저항이 감소 또는 유지하였으나 신품 전동기에서는 기사용 전동기에 비해 높은 절연저항이 나타났으며 인가시간동안 절연저항이 증가하는 추세를 나타내었다. 유전흡수율의 측정은 시험전압인가 후 30초 후와 3분 후의 절연저항을 이용하였으며 기사용 전동기와 신품 전동기에서의 측정결과를 그림 4에 나타내었다.

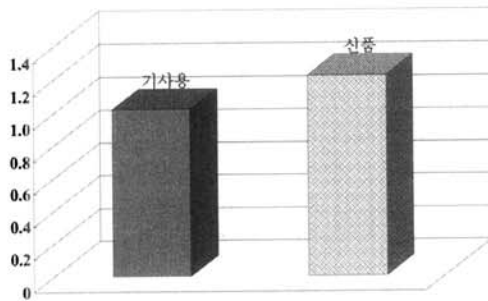
유전흡수율은 기사용 전동기의 U상에서는 0.92, V, W상에서는 각각 1.01, 1.02로 측정되었으며 신품 전동기에서는 U, V, W에서 1.17, 1.03, 1.22로



(a) U상-외합



(b) V상-외합



(c) W상-외합

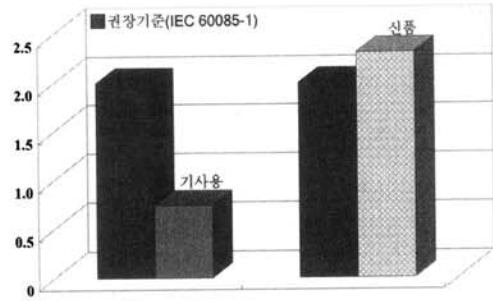
그림 4. 유전흡수율의 측정결과.

Fig. 4. Measurement result of DAR.

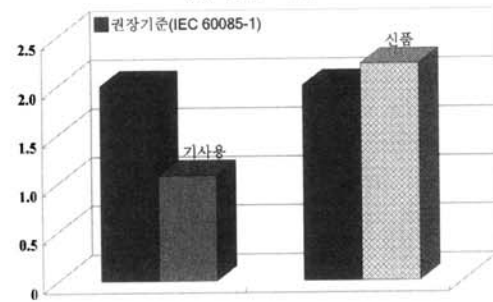
측정되었다. 유전흡수율의 측정결과, 기사용 전동기에서는 1이하 또는 1정도의 값으로 흡수전류가 감소하지 않고 유지 또는 증가하는 것으로 나타났으며 신품 전동기에서는 전체적으로 흡수전류가 감소하는 추세를 나타내었다.

또한 성극지수를 측정하여 절연저항의 시간변화 및 유전흡수율과 비교하였으며 IEC 60085-1에 제시된 절연등급별 권장기준을 이용하여 절연상태를 평가하였다[13]. 성극지수의 측정결과는 그림 5와 같다.

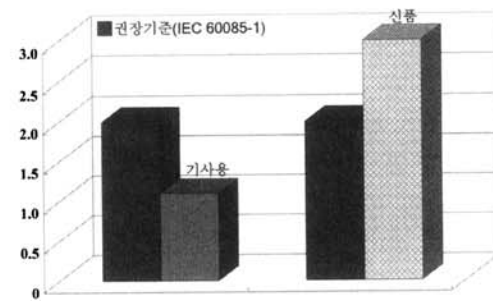
성극지수의 측정결과, 기사용 전동기에서는 U, V, W상에서 각각 0.74, 1.08, 1.1 로 IEC 60085-1에 제시된 최소 권장기준에 미달하는 결과를 나타



(a) U상-외합



(b) V상-외합



(c) W상-외합

그림 5. 성극지수의 측정결과.

Fig. 5. Measurement result of PI.

냈으며 신품 전동기에서는 U, V, W상에서 2.31, 2.22, 3.0으로 2이상의 성극지수가 측정되어 절연상태가 양호한 것으로 나타났다.

4. 결론

본 논문에서는 하이브리드 차량용 견인전동기의 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 외함간에 시험전압 500 V를 인가하여 수행하였다. 시간에 따른 절연저항의 변화를 측정된 결과, 기사용 전동기에서는 200~300 MΩ 정도로 측정되었으며 신품 전동기에서는 수 백 GΩ의 높은 절연저항이 측정되었다. 그러나 절연저항은 피시험체의 크기나 구조에 따라 다르게 나타나므로 단순히 측정시점에서 나타난 절연저항의 크기만으로는 절연상태를 평가하기 어렵다. 따라서 시간에 따른 절연저항의 변화 및 유전흡수율과 성극지수를 측정함으로써 전동기의 절연상태를 평가하였다.

유전흡수율은 절연체에서 흡수전류의 감소비율을 측정하는 것으로 기사용 전동기에서 0.92~1.02, 신품 전동기에서 1.22~1.36으로 측정되어 기사용 전동기에서 흡수전류의 감소비율이 낮은 것으로 나타났으며, 성극지수에서도 기사용 전동기는 0.74~1.1로 측정되어 IEC 60085-1에 제시된 권장 성극지수에 미달하였지만 신품 전동기에서는 2.22~3으로 권장기준을 만족하는 결과를 나타내었다. 절연저항의 시간변화, 유전흡수율 및 성극지수를 측정함으로써 하이브리드 차량용 견인전동기의 절연 성능을 평가할 수 있었다. 현재 시행되고 있는 전동기의 성능시험이나 절연평가에서도 단순 절연저항의 측정 외에 절연저항의 시간변화, 유전흡수율 및 성극지수를 측정하여 전동기의 절연상태를 평가해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 교통체계효율화사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

[1] 길경석, 송재용, 서황동, 김용주, 강동식, 황돈하, "저압유도전동기에서 미소부분방전 측정에 관한 연구", 전기전자재료학회논문지, 18권, 10호, p. 960, 2005.
[2] H. A. Toliyat, G. Suresh, and A. Abur, "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, p. 143, 1997.

[3] L. Gubbala, A. Von Jouanne, P. N. Enjeti, C. Singh, and H. A. Toliyat, "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, p. 579, 1995.
[4] Christopher J. Melhorn and Le Tang, "Transients effects of PWM drives on induction motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, p. 1065, 1997.
[5] E. Persson, "Transient effects in application of PWM inverters to induction motors", IEEE Trans on IAS, Vol. 28, p. 1095, 1992.
[6] U. Bammert and M. Beyer, "Partial discharges measured with an automated system in epoxy resin and polyethylene", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 23, No. 2, p. 215, 2000.
[7] A. Krivda, E. Gulski, L. Satish, and W. S. Zaengl, "The use of fractal features for recognition of 3-D discharge patterns", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, p. 889, 1995.
[8] R. E. James and B. T. Phung, "Development of computer-based measurements and their application to PD pattern analysis", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 5, p. 838, 1995.
[9] E. Gulski, H. P. Burger, G. H. Vailancourt, and R. Brooks, "PD pattern analysis during induced test of large power transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 7, No. 1, p. 95, 2000.
[10] E. Gulski, "Diagnosis of HV components by digital PD analyzer", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Vol. 2, No. 4, p. 630, 1995.
[11] C. Cachin and H. J. Wiesmann, "PD recognition with knowledge based preprocessing and neural networks", IEEE

Transactions on Dielectrics and Electrical
Insulation, Vol. 2, No. 4, p. 578, 1995.

- [12] IEEE 60043, IEEE Recommended Practice
for Testing Insulation Resistance of Rotating

Machinery, p. 7, 2000.

- [13] IEC 60085-1, Thermal evaluation and
classification of electrical Insulation, p. 5,
1984.