

서지전압에 의한 저압유도전동기의 절연평가

Insulation Evaluation of Low-voltage Induction Motors by Surge Voltages

최수연[†] 최재성* 박대원** 길경석*** 송재용§
Su-Yeon Choi Jae-Sung Choi Dae-Won Park Gyung-Suk Kil Jae-Yong Song

ABSTRACT

Inverter-fed induction motors (IFM) are prevalent in traction vehicles. However, the winding insulation of IFM is substantially more stressed than of line-powered motors by surge voltages. Consequently, the winding insulation of IFM should be estimated by surge voltages. Also, the weakness of coil insulation can be detected by the surge voltage test.

This paper described the insulation evaluation of induction motors by application of surge voltages. A surge voltage generator with the maximum voltage of 5 kV and the selectable rise-time in ranges of 50 ns ~ 500 ns was fabricated. In the experiment, we applied surge voltages into induction motors with the magnitude and the risetime according to IEEE 522. By the analysis of applied surge voltage and current waveforms, we could find difference between normal and deflection windings.

1. 서 론

유도전동기는 세계적으로 가장 많이 사용되는 동력원으로 사용 전압에 따라 저압과 고압로 분류되며, 저압용은 엘리베이터, 주차설비, 경전철과 같은 소형 전기철도 및 전기자동차 등에 사용된다. 특히 전기차량에서 사용되는 전동기는 빈번한 기동과 정지, 진동과 같은 열악한 환경에 노출되어 있어 운전상태의 고신뢰성이 요구되고 있다[1].

전기차량에서 전동기는 PWM(Pulse Width Modulation)제어 방식을 적용한 인버터의 사용으로 운전의 성능이 크게 향상되었으나 인버터의 고속 스위칭으로 서지전압에 대한 문제들이 대두되고 있으며, μs 당 최고 수 천 V까지 발생한다. 이러한 서지전압은 고정자권선 내의 전압 불평형을 야기하여 권선절연에 스트레스를 주고, 조기열화를 초래하여 최종적으로 전동기 내부의 절연과피를 일으킨다[2, 3].

따라서 유도전동기의 서지전압에 의한 절연평가 필요하며, 이를 위해 50 ns ~ 500 ns로 가변할 수 있고, 최대 5 kV까지 발생할 수 있는 서지발생기를 제작하였다. 실험에서는 3 ϕ 1HP의 유도전동기 고정자 권선의 절연을 평가하기 위해 200 ns의 상승시간을 가지는 서지전압을 각 상의 입력단과 접지사이에 인가하여 정상권선과 결함권선의 전압, 전류파형을 비교·분석하였다.

2. 이론

PWM 제어방식의 인버터는 펄스형태의 전압을 출력하기 때문에 고속 스위칭 동작으로 인한 급격한 상승시간 및 높은 전압상승률(di/dt)의 서지임펄스를 발생시킨다. 이것은 코일의 인가단자에 더 큰 전압을 유기시켜 전압 불평형을 이루고 유도전동기 권선내부에 스트레스를 야기한다[4]. 운전 중 전동기는 항상 서지전압에 노출되어 있으므로 이에 대한 권선의 절연이 요구되며, 코일의 절연내력은 여러 규정

[†] 한국해양대학교 전기전자공학부 대학원 석사과정, 정회원

E-mail : ch10919@bada.hhu.ac.kr

TEL : (051)410-4893 FAX : (051)403-1127

* 한국해양대학교 전기전자공학부 대학원 석사과정, 정회원

** 한국해양대학교 전기전자공학부 대학원 박사과정, 정회원

*** 한국해양대학교 전기전자공학부 교수, 정회원

§ 국립과학수사연구소 공업연구소, 정회원

에 명시되어 있으나 경험에 의해 만들어진 것으로 다소 차이가 있다.

그림 1은 IEEE Std. 522에 명시되어있는 서지시험시의 인가전압의 표준을 나타낸 것으로 횡축은 상승시간이며, 종축은 기계전압에 대한 비율로 나타내었다[5].

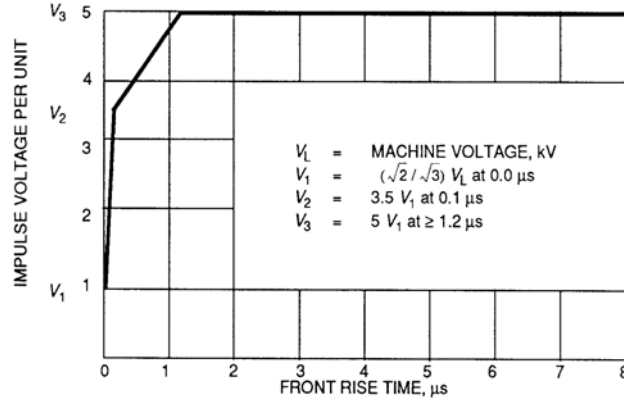


그림1. IEEE Std. 522의 서지전압

코일에 유기되는 전압은 식(1)과 같이 시간 변화율에 의존하므로 서지시험시의 인가전압은 상승시간에 따라 달라져야하며, 그림 1에서는 100 ns ~ 200 ns의 상승시간에서 3.5 p.u., NEMA Std. MG1에서는 100 ns에서 3.7 p.u.를 명시하고 있다[6].

$$E = L \frac{di}{dt} \text{ [V]} \quad (1)$$

3. 서지발생기의 제작

본 논문에서는 유도전동기의 절연성능평가를 위하여 서지발생기를 제작하였다. 충전용 콘덴서 C 에 전하가 충전되면 L 과 R 을 통해 전하를 방전시켜 서지전압을 발생시키는 원리로, 등가회로는 그림 2와 같다.

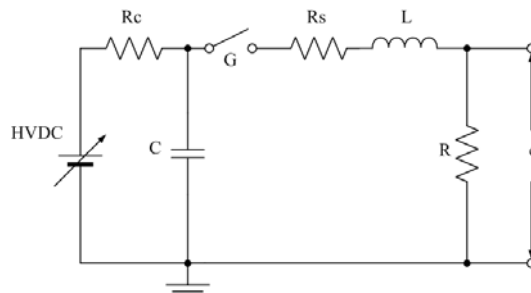


그림2. 서지발생기의 등가회로

직류고전압 발생장치로부터 충전저항 R_c 를 통해 콘덴서가 충전되고, 콘덴서의 전압이 방전전압 E 가 되었을 때, 방전전극 G 를 통해 $LR_s + R_0$ 회로에 콘덴서의 전하를 방전시키면, 회로정수에 따라 R_0 단자에 충격전압이 발생된다. 회로에서 방전전극 G 의 방전 시의 저항을 무시하면 식 (2)가 성립한다.

$$L \frac{di}{dt} + (R_s + R_0)i + \frac{1}{C} \int_0^t i dt = E \quad (2)$$

$R_s + R_0 = R$ 라 두고 $t = 0$ 에서 방전전극이 $R > 2\sqrt{L/C}$ 에서 동작할 때, 방전전압은 식(3)으로 나타낼 수 있으며, 급상승후 서서히 감소되는 파형이다.

$$e = iR_0 = E \frac{R_0}{R} \cdot \frac{\alpha}{\beta} \{ e^{-(\alpha-\beta)t} - e^{-(\alpha+\beta)t} \} \quad (3)$$

여기서,

$$\alpha = \frac{R}{2L}, \quad \beta = \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}} \quad \text{이다.}$$

그림 3은 제작한 서지발생기의 출력파형으로, 상승시간을 50 ns, 100 ns, 200 ns, 500 ns로 조절할 수 있고, 출력전압을 0~5 kV까지 가변 할 수 있다.

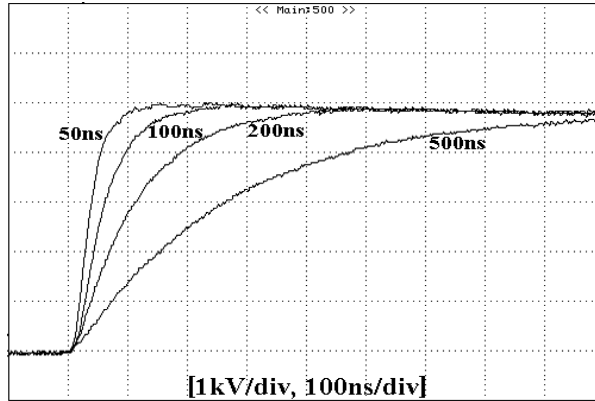


그림3. 서지 발생기의 출력 전압파형

4. 실험 및 방법

서지전압으로 전동기 권선의 절연상태를 평가하기 위하여 그림 4와 같이 실험계를 구성하였다. 3 ϕ 1HP 저압유도전동기 권선의 입력단과 접지사이에 서지전압을 인가하여, 고전압 프로브(DC-75MHz, 40kV)와 고주파 변류기(DC-20 MHz, 0.1 V/A)로 출력단의 전압과 전류를 측정하였다.

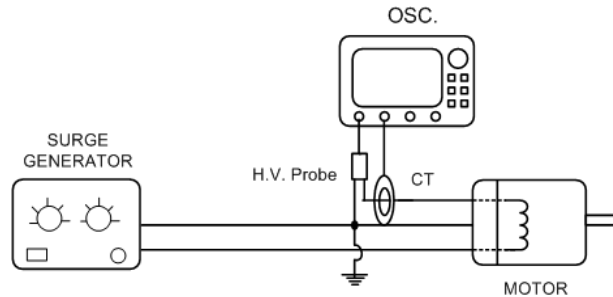


그림4. 실험계의 구성

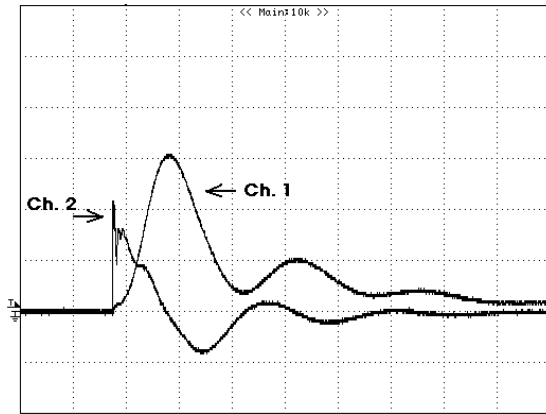
서지전압으로는 200 ns 상승시간을 갖는 고전압을 인가하였으며, U, V, W상 중 U상의 절연에 인위적으로 결함을 주고, 다른 두 상과의 파형을 비교하였다.

5. 결과 및 고찰

저압유도전동기 3 ϕ 의 입력단과 접지사이에 서지전압을 인가했을 때 각 상의 전압과 전류의 출력파형을 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림 5는 절연에 결함이 있는 권선(u상)에 대한 출력파형으로 (a)는 1.5 kV의 전압에서 절연이 파괴되지 않은 경우이며, (b)는 2.7 kV의 전압에서 방전이 일어난 경우로 방전 전류의 파형을 볼 수 있다. 전압인가시 전류파형의 고주파 성분은 권선입력단의 정전용량과 인덕턴스에 의한 것이며, 전압파형으로는 권선의 결함유무를 검출하기 어려웠다.

그림 6(a)와 (b)는 절연이 양호한 V상과 W상에 5 kV를 인가했을 때의 파형으로 그림 5(a)와 비슷한 패턴이다. 표준 서지보다 훨씬 큰 전압을 인가했음에도 불구하고 방전이 일어나지 않았음을 알 수 있다.

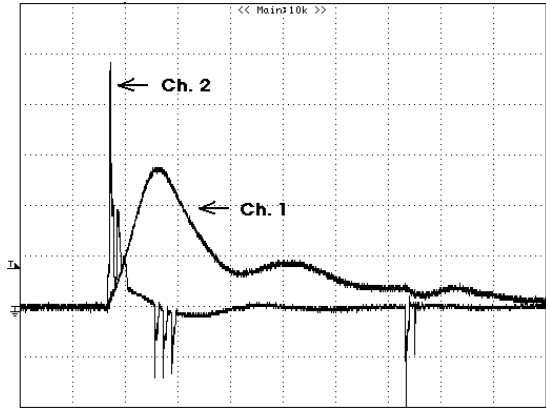
파형의 분석결과 서지전압 인가시 권선의 절연상태에 따른 전압파형의 구분은 불분명하였으나 전류파형에서는 확연한 차이가 있었다.



[Ch. 1: 0.5 kV/div, 5 μ s/div]

[Ch. 2: 0.2 A/div, 5 μ s/div]

(a) 1.5 kV인가 시

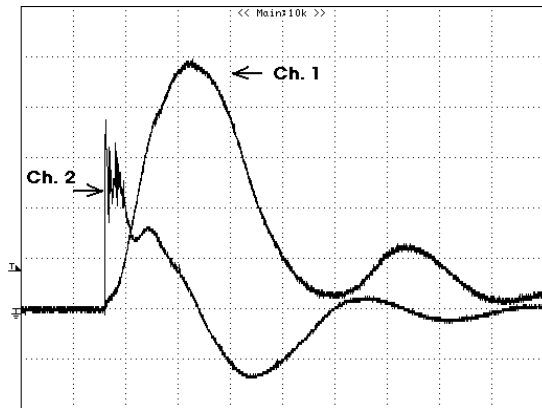


[Ch. 1: 1 kV/div, 5 μ s/div]

[Ch. 2: 1 A/div, 5 μ s/div]

(b) 2.7 kV인가 시

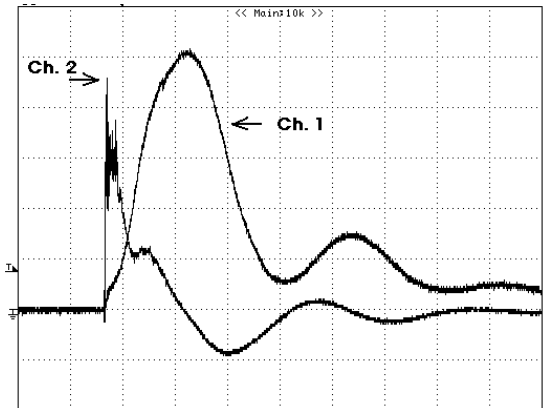
그림5. 서지인가시 결함권선의 출력파형



[Ch. 1: 1 kV/div, 5 μ s/div]

[Ch. 2: 0.5 A/div, 5 μ s/div]

(a) V상



[Ch. 1: 1 kV/div, 5 μ s/div]

[Ch. 2: 0.5 A/div, 5 μ s/div]

(b) W상

그림6. 서지인가시 정상권선의 출력파형

6. 결론

본 논문에서는 서지전압으로 저압유도전동기의 고정자권선의 절연을 평가하기 위해 상승시간 50 ns ~ 500 ns 와 최대전압 5 kV까지 가변할 수 있는 서지발생기를 제작하였다. 3 ϕ 1HP 저압유도전동기의 U, V, W상 중 U상에 인위적인 결함을 주고 200ns의 서지전압을 전동기 각 상에 인가하여 파형을 비교분석하였다. 전압파형에서는 뚜렷한 차이가 없었으나 결함상의 전류파형은 명확하게 구분되므로 절연의 이상 유무를 평가할 수 있었다.

참고문헌

1. 길경석, 류길수, 박대원, 조영진, 천상규, 최수연(2007년), "인버터 구동 유도전동기에서 과도전압의 측정과 분석", 한국철도학회논문집, 제10권 6호, pp.650-654
2. Christopher J. Melhorn, Le Tang(1997), "Transients Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Trans on IAS, Vol.28,pp1095-1101
3. J-K. Yang, J-T. Cho, S-B. Lee, H-S. Jung, and Y. Park(2008), "An Inverter-Embedded Stator Winding Insulation Quality Assessment Technique for AC Machines", International Conference on Condition

Monitoring and Diagnosis.

4. John Wilson(2003), "CURRENT STATE OF SURGE TESTING INDUCTION MACHINES", Iris Rotating Machine Conference.
5. IEEE Guide for Testing Turn Insulation of Form-Wound Stator Coils for Alternating-Current Electric Machines(2004), IEEE Std 522.
6. G-C. Stone, E-A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani(2003), "ELECTRICAL INSULATION FOR ROTATING MACHINES", A JOHN WILEY & SONS, INC., pp.265-268