

## 인버터 스위칭 써지에 의한 저압 유도전동기의 과도전압 분포해석

황 돈 하\*, 김용주\*, 이인우\*\*, 배성우\*\*\*, 김동희\*\*\*, 노채균\*\*\*

\*한국전기연구원 기기제어용용연구그룹, \*\* (주)효성 중공업연구소, \*\*\*영남대학교 전자정보공학부

### Analysis of Overvoltage Distribution in Low-Voltage Induction Motor Due to Inverter Switching Surge

Don-Ha Hwang\*, Yong-Joo Kim\*, In-Woo Lee\*\*, Sung-Woo Bae\*\*\*, Dong-Hee Kim\*\*\*, Chae-Gyun Ro\*\*\*

Korea Electrotechnology Research Institute (KERI), Hyosung Co., Yeungnam University\*\*\*

**Abstract** - In this paper, switching surge voltage distribution in stator windings of induction motor driven by IGBT PWM inverter is studied. To analyze the irregular voltage of stator winding, equivalent circuit model of inverter-cable-motor was proposed and high frequency parameter is computed by using finite element method (FEM). Electro-magnetic transient program (EMTP) analysis of the whole system for induction motor and PWM inverter is proposed. In order to experiment, an induction motor, 380 [V], 50 [HP], with taps from one phase and a switching surge generator was built to consider the voltage distribution.

### 1. 서 론

최근, PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템에 IGBT를 채용함으로써 인버터의 스위칭 써지전압에 의해 고정자 권선에 과도 써지전압이 유기되어 절연파괴가 조기에 발생하는 문제점이 빈번히 발생되고 있다<sup>[1-5]</sup>.

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동용 저압 유도전동기 시스템에서의 인버터 스위칭 써지에 의한 고정자 권선의 과도전압 해석기법을 제안하고, 과전압 분포특성의 분석결과를 제시한다. 인버터의 빠른 스위칭 주파수에 의한 고주파 영역에서 유도전동기의 파라미터를 산출하기 위해서 고정자 권선의 단일슬롯 모델을 이용하여 고주파 등가회로를 구성하였다. 과도 스위칭 써지에 의한 고정자 권선내의 불평등 전압분포를 분석하기 위해서 첫 번째 코일의 첫 번째 턴에서 다섯 번째 턴까지 분포정수 회로를 구성하였고, 유한요소법을 이용하여 각 상의 저항, 인덕턴스 및 커패시턴스를 구하였다.

또한, 케이블과 전동기를 포함한 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템 전체를 대상으로 하여 전자계 과도해석 프로그램인 EMTP에 의한 시뮬레이션을 수행하여 케이블 길이, 상승시간(dv/dt) 등의 가변에 따른 유도전동기 고정자 권선의 전압 분포를 해석하였다.

마지막으로, 고정자 권선의 한 상(phase)의 첫 번째 턴에서 다섯 번째 턴까지 Tap을 내어 제작한 380 [V], 50 [HP] 유도전동기를 대상으로 하여 케이블 길이, 스위칭 주파수, 상승시간에 따른 인버터 써지의 턴별 전압 분포특성을 분석한 실험결과를 제시하고, 첫 번째 턴에서의 전압분포 특성을 상세히 분석하였다.

### 2. 전동기 모델링 및 유한요소 해석

#### 2.1 고정자 권선의 단일슬롯 모델

IGBT PWM 인버터의 빠른 스위칭 주파수에 의한 고주파 영역에서 유도전동기 고정자 권선의 파라미터를 산출하기 위하여 3상, 4극, 60 [Hz], 380 [V], 50 [HP] 유도전동기를 대상으로 단일슬롯 모델을 구성하여 ANSOFT Maxwell 2D 패키지를 이용한 유한요소 해석을 수행하였다. 그림 1과 같이 전동기 고정자 슬롯의 48개중 1개를 모델링하였고, 고정자 슬롯 내부에는 동선 직경 1.2 [mm]의 3가닥 소선과 직경 1.1 [mm] 1가닥 소선, 즉 소

선 4개가 병렬로 연결되어 있으며, 이와 동일한 것이 병렬 연결되어 2층권으로 구성된 전동기의 한 슬롯 내부에는 총 96개의 도체가 존재한다. 회전자 슬롯은 알루미늄 바를 입력하여 모델링하였고, 정확한 커패시턴스 계산을 위해 Slot cell과 Top wedge를 함께 모델링하였다.

#### 2.2 고주파 파라미터 산출

권선의 저항과 인덕턴스는 유한요소 해석용 상용 패키지인 Maxwell 2D를 활용하여 식 (1)과 같이 Field 방정식에서 A와  $\Phi$ 를 구하는 와전류 해석모듈을 이용함으로써 각각의 저항손실과 자기 저장 에너지로부터 계산할 수 있다. 커패시턴스는 식 (2)와 같이 Gauss 법칙을 이용하여 정전계 해석모듈을 수행하여 정전 에너지로부터 계산할 수 있다<sup>[2]</sup>.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu r} (\nabla \times A) = (\sigma + j\omega \epsilon_r) (-j\omega A - \nabla \Phi) \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \Phi(x, y)) = -\rho \quad (2)$$

여기서,

A : Magnetic vector potential [Wb/m]

$\Phi$  : Electric scalar potential

$\mu r$  : Relative magnetic permeability

$\omega$  : Angular velocity

$\sigma$  : Conductivity

$\epsilon r$  : Relative permittivity

$\rho(x, y)$  : Charge density

유한요소 해석결과, 주파수가 증가할수록 저항은 증가하고 인덕턴스는 감소함을 확인하였다. 저항이 증가하는 이유는 고주파에서의 표피효과 때문이며, 인덕턴스가 감소하는 것은 고주파 영역에서 고정자 철심이 자속에 대한 Barrier 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다<sup>[2][5]</sup>.

각 도체의 저항과 자기 인덕턴스는 위치에 크게 영향을 받지 않고 거의 비슷한 값을 갖지만, 커패시턴스는 주파수에 의한 영향은 거의 받지 않고, 슬롯 내부의 도체의 위치에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 상호 커패시턴스는 턴-접지간 커패시턴스에 비해 무시할 수 있을 정도로 작게 나왔다.

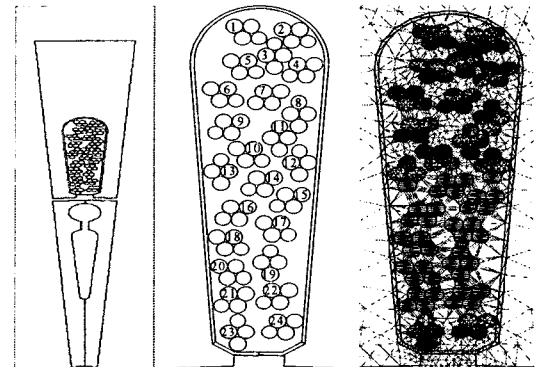


그림 1. 단일슬롯 모델 및 요소 분할도

### 2.3 고주파 등가회로 구성

그림 2는 유한요소법에 의해 산출된 저항, (상호)인덕턴스, (상호)커패시턴스 등의 고주파 파라미터를 이용하여 구성된, 케이블을 포함한 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 전체 등가회로를 나타낸다. Delta 결선의 50 [HP] 유도전동기 고정자 권선의 U상 첫 번째 코일과 V상 첫 번째 코일이 써지전압의 영향을 크게 받으므로 U상과 V상의 초기코일에 대하여 1~5번째 턴은 상세하게 분포정수 회로로 구성하였고, U 및 V상의 나머지 코일과 W상 코일은 집중정수 회로로 구성하였다.

유도전동기의 전압특성은 전동기 권선과 연결된 케이블의 길이에도 영향을 받으므로 전동기의 케이블에 대한 임피던스를 전원단에 결합하였다. 철심장 내에서 고정자 권선의 저항 및 인덕턴스는 PWM 전압의 주파수에 영향을 받는다.

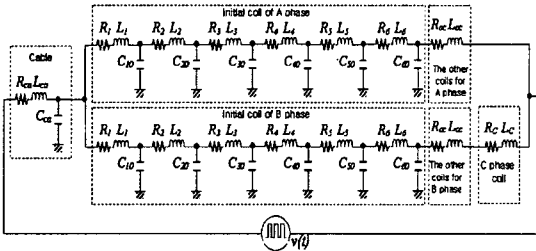


그림 2. 고정자 권선의 고주파 등가회로

### 3. 전압분포 시뮬레이션

스위칭 써지에 의한 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에서의 전압분포가 과도 불평형 전압분포를 나타내기 때문에 전송선로 해석에 일반적으로 사용되는 전자계 과도해석 프로그램인 EMTP를 사용하여 전압분포 시뮬레이션을 수행하였다. EMTP는 집중 및 분포정수(주파수 의존, 독립) 회로, 비선형 요소로 구성된 시스템의 전압, 전류 및 전력 등을 해석할 수 있고, 특히, 시스템의 과도상태 해석에 유용하게 사용된다.<sup>[6]</sup>

EMTP 시뮬레이션에 있어서, 입력전원, 정류기 및 인버터는 단일 Step Pulse 모델로써 380 [V]의 등가 펄스 전압원으로 해석하였고, 펄스 상승시간이 1 [μs], 200, 300, 400 [ns] 등의 여러 종류를 인가하였다. 주파수 독립 분포정수 모델로 표현한 케이블의 써지 임피던스는 70 [Ω], 전파속도는 100 [m/μs]로 가정하였고, 감쇠를 무시하여 케이블 길이를 5, 10, 30, 50, 100 [m] 등으로 가변시켜 해석을 수행하였다. 유도전동기 모델은 그림 2에 나타난 고정자 권선의 고주파 등가회로를 적용하였다. 그림 3은 EMTP 시뮬레이션 결과 중에서 주파수 20 [kHz], 상승시간 200 [ns]에서의 케이블 길이에 따른 턴별 전압분포를 나타낸 것이다. 케이블 길이가 50 [m] 이상부터 첫 번째 턴의 전압이 크게 증가하는 것을 볼 수 있고, 100 [m]일 때는 인버터 출력전압 보다 약 1.6배 이상 큰 써지전압이 유기됨을 확인할 수 있다. 이것은 인버터 써지전압이 전동기 고정자 권선에 침입하면 상용 전원으로 운전하는 경우와 달리 전압이 코일 간에 균일하게 분배되지 않고 전원단자에 제일 가까운 코일에 집중한다는 것을 나타낸다.

### 4. 전압분포 실험결과

#### 4.1 실험방법

유도전동기 고정자 권선에서의 케이블 길이, 스위칭 주파수 및 상승시간에 따른 인버터 써지전압의 분포를 측정하기 위하여 그림 4와 같이 한 상의 첫 번째 턴부터 5번째 턴까지 탭(Tap)을 낸 380 [V], 50 [HP]급 유도전동기를 제작하였다.

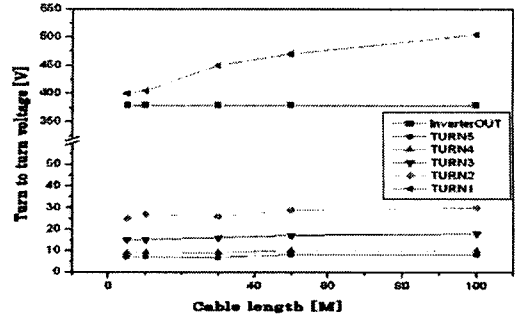


그림 3. 턴별 전압분포 시뮬레이션 결과

일반적으로 전원단자에 가까운 코일에 전압이 집중하므로 48개의 코일군 중에서 U상 첫 번째 코일의 리드 인출부에서 5번째 턴까지 탭을 인출하여 전압분포를 쉽게 측정할 수 있도록 하였다. 또한, 코일에 대한 전압분포를 확인하기 위하여 첫 번째 코일과 두 번째 코일에 각각 탭 E1과 E2를 인출하였다. 고정자 권선에 써지전압의 인가는 스위칭 주파수, 상승시간, 인가전압 및 전류 등을 가변시킬 수 있는 스위칭 써지 발생기를 이용하여, 디지털 오실로스코프로 각 턴별 써지전압 파형을 측정하였다.

케이블 길이가 5, 10, 30, 50, 100 [m]인 경우에 있어서, 써지의 상승시간을 1 [μs], 400, 300, 200 [ns] 등으로 변경하면서 전동기 정격과 동일한 전압인 380 [V]의 인버터 써지전압을 인가하여 전압을 측정하였다. 또한, 스위칭 주파수를 5, 8, 12, 15, 20 [kHz]로 가변시켜 각각의 경우에 대해 각 턴에서의 전압분포 실험을 수행하였다.

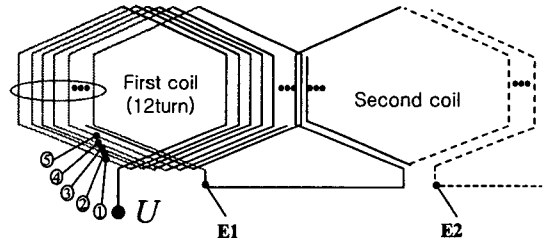
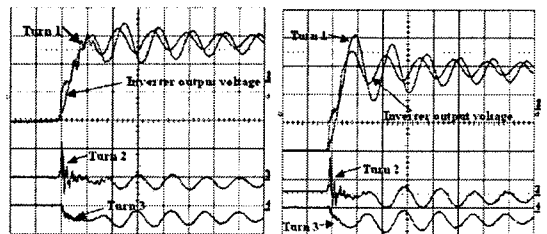


그림 4. 전압분포 측정을 위한 고정자 권선의 구조

#### 4.2 실험결과 및 검토

IGBT PWM 인버터의 스위칭 써지에 의해 고정자 권선의 각 턴에 분포되는 전압파형의 한 예를 그림 5에 나타내었다. 그림 5는 스위칭 주파수 12 [kHz], 케이블 길이 30 [m]인 경우, 인버터 써지전압의 상승시간에 따른 고정자 권선 각 턴에서의 전압분포 파형을 나타낸다. 상승시간이 1 [μs]인 그림 5 (a)에서는 첫 번째 코일의 전압크기가 인버터 출력전압과 유사하다. 그러나 그림 5 (b)에서와 같이 상승시간이 300 [ns]로 짧아지게 되면 첫 번째 턴에만 걸리는 전압이 인버터 출력전압의 약 1.2배 정도로 커지고, 나머지 턴은 매우 작은 전압분포를 나타내고 있다.



(a) 상승시간 : 1 [μs] (b) 상승시간 : 300 [ns]  
그림 5. 상승시간에 따른 턴별 분포전압

따라서 인버터 스위칭 씨지의 상승시간이 짧아질수록 전동기에서 발생하는 씨지전압이 커지고, 전원단자에 가장 가까운 첫 번째 턴에서 가장 큰 전압이 유기됨을 확인할 수 있다.

그림 6에서는 인버터 스위칭 씨지에 의한 과도전압이 가장 크게 분포하는 첫 번째 턴에 대한 전압분포를 상세히 분석하기 위해, 인버터와 전동기 사이의 케이블 길이에 따라 첫 번째 턴에서의 전압분포를 종합적으로 나타내었다. 그림 6 (a)는 케이블 길이가 5 [m], (b)는 30 [m], (c)는 50 [m], 그림 6 (d)는 100 [m]일 때의 상승시간과 스위칭 주파수에 따른 첫 번째 턴에서의 전압분포를 나타내고 있다. 먼저, 케이블 길이에 따른 첫 번째 턴에서의 전압을 비교해보면, 스위칭 주파수와 무관하게 케이블 길이가 길어질수록, 상승시간이 짧아질수록 첫 번째 턴에 인가되는 과도전압도 증가함을 볼 수 있고, 특히 케이블 길이 50 [m] 이상, 상승시간이 300 [ns] 이하에서는 인버터 출력전압의 120 [%] 정도가 첫 번째 턴에 인가됨을 확인할 수 있다. 이것은 대부분의 전압 스트레스가 인가전원이 연결되어 있는 유도전동기 고정자 권선의 첫 번째 코일 그룹의 최초 첫 번째 턴에서 가장 심하게 발생하고 있음을 증명하는 것이다.

그리고, 스위칭 주파수에 따른 첫 번째 턴에서의 전압 분포를 분석해 보면, 스위칭 주파수가 빨라져도 씨지전압의 크기 자체는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 하지만, 주파수가 빨라지면 씨지전압의 펄스 반복율이 커지기 때문에 고정자 권선이 받는 스트레스는 스위칭 주파수가 증가함에 따라 더욱 커지게 된다.

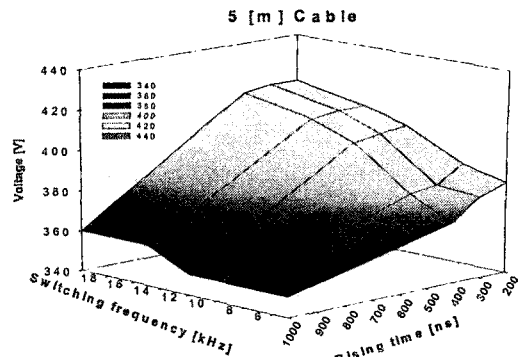
## 5. 결 론

본 연구에서는 인버터 구동 가변속 유도전동기 시스템에 IGBT 소자를 채용함으로써 전동기 고정자 권선의 조기 절연파괴 사고를 초래하는 과도 스위칭 씨지전압의 해석기법을 제안하였고, 과전압 분포특성을 분석하였다. 유한요소법을 이용하여 유도전동기의 고주파 파라미터를 산출하여 케이블을 포함한 고정자 권선의 고주파 동가회로 모델을 제시하였고, 인버터 구동 유도전동기 시스템 전체에 대한 EMTP 시뮬레이션을 통하여 고정자 권선에서의 불평등 전압분포를 해석하였다. 또한, 고정자 권선의 첫 번째 코일 그룹에 Tap을 내어 제작한 380 [V], 50 [HP] 유도전동기를 대상으로 한 인버터 씨지의 턴별 전압 분포를 측정하였고, 첫 번째 턴에서의 전압분포 특성을 상세히 분석하였다.

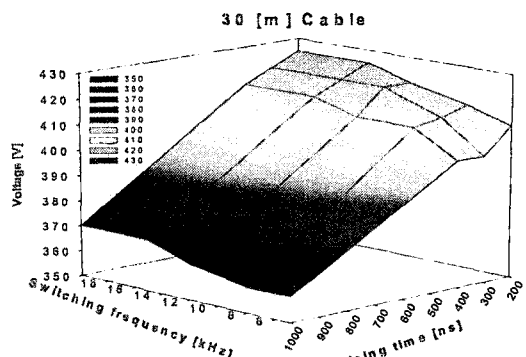
본 논문에서 제시한 고주파 파라미터, 동가회로 및 시뮬레이션 기법과 실험결과는 가변속 구동 유도전동기 및 IGBT PWM 인버터의 제작 및 설치시 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

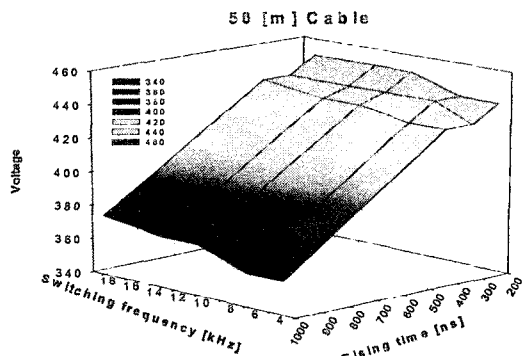
- [1] J.M. Bentley and P.J. Link, "Evaluation of Motor Power Cables for PWM AC Drives", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 2, pp. 342-358, Mar./Apr. 1997.
- [2] G. Suresh, H.A. Toliyat, D.A. Rendusara and P.N. Enjeti, "Predicting the Transient Effects of PWM Voltage Waveform on the Stator Winding of Random Wound Induction Motors", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 14, No. 1, pp. 23-30, Jan. 1999.
- [3] Weijun Yin, "Failure Mechanism of Winding Insulations in Inverter Fed Motors", IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 13, No. 6, pp. 18-23, Nov./Dec. 1997.
- [4] C.J. Melhorn and Le Tang, "Transient Effects of PWM Drives on Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1065-1072, Jul./Aug. 1997.
- [5] D.H. Hwang, Y.J. Kim, S.W. Bae, D.H. Kim, and I.W. Lee, "A Study on Voltage Distribution in Stator Winding of Low Voltage Induction Motor Driven by IGBT PWM Inverter", Proceedings of The ICEE, Korea, Vol. 2, pp. 1006-1010, July 7-11, 2002.



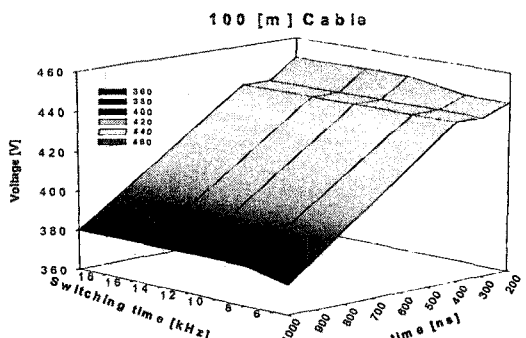
(a) 케이블 길이 : 5 [m]



(b) 케이블 길이 : 30 [m]



(c) 케이블 길이 : 50 [m]



(d) 케이블 길이 : 100 [m]

그림 6. 케이블 길이에 따른 첫 번째 턴에서의 전압분포