

IGBT 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에서의 과도전압 분포 해석

배성우* · 황돈하** · 김용주** · 김동희* · 김민희*** · 이인우****

영남대학교 전기전자공학부*, 한국전기연구원 산업전기연구단**, 영남이공대학***, (주)효성****

Analysis of Overvoltage Distribution in Stator Winding of Induction Motor Driven by IGBT PWM Inverter

S.W. Bae*, D.H. Hwang**, Y.J. Kim**, D.H. Kim*, M.H. Kim***, I.W. Lee****

Yeungnam Univ.*, KERI**, Yeungnam College of S&T***, Hyosung Co.****

ABSTRACT

In this paper 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. Induction motor, 50 [HP], and a switching surge generator was built to consider the voltage distribution. The results of EMTP analysis compared with experimental results.

1. 서 론

소형 및 중형 유도전동기의 가변속 제어를 위해 Pulse Width Modulated(PWM) 인버터가 널리 이용되고 있다. 전력용 반도체의 발달로 IGBT를 이용한 최신 제어기술의 인버터들은 200 [ns] 이하의 상승시간(rising time)을 실현하였다. 그러나 극히 짧은 상승시간은 스위칭 손실을 줄일 수 있는 반면, 높은 전압변화율(dv/dt) 때문에 고정자 권선의 절연이 파괴되는 치명적인 현상을 발생시키는 경우가 있다.

PWM 인버터의 높은 전압변화율과 인버터 출력단 및 전동기 입력단 사이의 임피던스 부정합으로 인해 전압파동의 반사(voltage reflection)가 발생하게 되면 유도전동기 고정자 권선에 불평등 전압을 초래한다. 더욱이 고주파 과도상태에서는 Feeder Cable의 특성 임피던스에 비해 고정자 권선의 임피던스가 매우 크므로 단자에서는 전압파동의 전반사

가 발생하고, 입사파와 반사파가 중첩되면서 단자 부근의 전압은 인버터 정격 출력전압의 약1.8배 이상이 된다. 이러한 비정상점에서 발생하는 반사파와 투과파, 그리고 반사파의 2차 반사는 고정자 권선에서의 전압분포를 더욱 불규칙하게 만든다.

본 논문에서는 50마력 유도전동기를 대상으로 한 고정자 권선의 과도전압 분포해석 기법을 소개한다. 고주파 영역에서 유도전동기의 Parameter를 산출하기 위해서 고정자 권선의 등가회로를 구성하였다. 이러한 Parameter를 바탕으로 인버터 구동 유도전동기 시스템 전체의 특성을 알아보기 위해 전자기 과도해석 프로그램인 EMTP(Electromagnetic Transient Program) 해석으로 Cable 길이, 주파수, Rising Time 가변에 따른 유도전동기 고정자 권선의 전압 분포를 해석하였다. 실험을 위해선 50마력 유도전동기의 한 상(phase)에 첫 번째 턴에서 다섯 번째 턴까지 Tap을 내어 턴별, 턴-대지간 전압 분석을 수행하였다.

2. 50 [HP] 유도전동기 모델링

50마력, 380 [V] PWM 인버터구동 유도전동기의 고정자 권선의 Parameter를 산출하기위해 FEM 해석 프로그램인 Maxwell 2D를 사용하였다. 그림 1과 같이 고정자 슬롯의 48개중 1개를 모델링하였고, 고정자 슬롯 내부에는 동선경 1.2 [mm]×3 가닥 소선과 1.1 [mm]×1 가닥 소선이 병렬 연결되어 있고(총 4개 병렬 연결), 이와 동일한 것이 병렬로 연결되어 2층권으로 구성된 전동기의 한 슬롯 내부에는 총 96개의 도체가 존재한다.

회전자 슬롯은 알루미늄 바를 입력하여 모델링하였으며 정확한 커패시턴스 계산을 위하여 Slot cell 과 Top wedge를 같이 모델링 하였다.

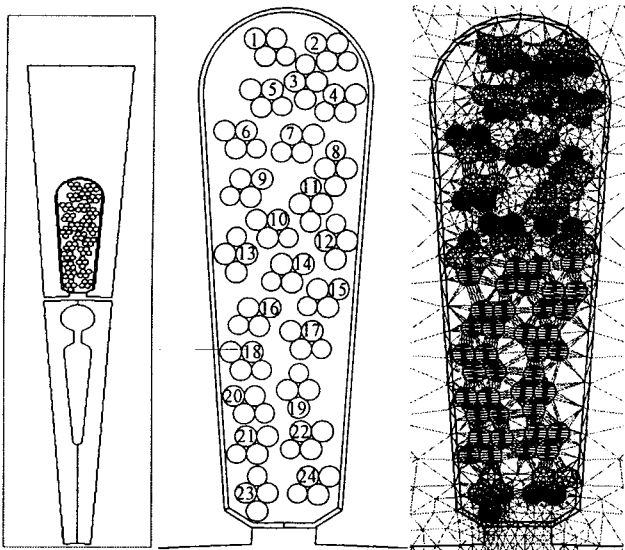


그림 1. 슬롯내부 모델 단면도 및 FEM mesh diagram
Fig. 1. Cross section of slot model and mesh diagram for FEM analysis

그림 2는 Delta 결선이 된 50(Hp)급 유도전동기의 3상에 대한 전동기 전체 권선 등가회로를 나타낸다. 전동기의 권선의 A상의 첫 번째 코일과 B상의 첫 번째 코일이 PWM 전압에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있어 A상과 B상은 초기 코일에 대하여 1~5번째 턴은 상세하게 분포회로 정수로 구성하였으며 A, B상의 나머지 코일과 C상은 집중회로 정수로서 구성하였다.

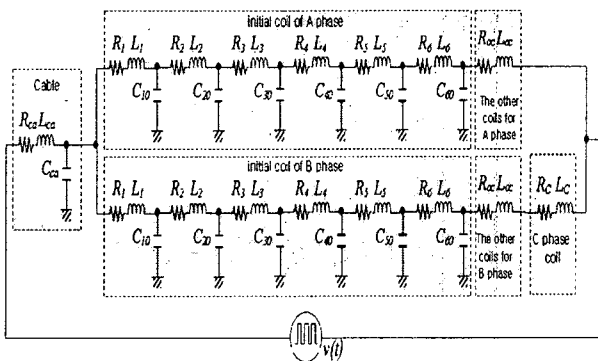


그림 2. 전동기 전체 권선 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of whole winding for induction motor

유도전동기의 실험 전동기 전압 특성은 전동기의 권선과 연결된 케이블의 길이에 영향을 받으므로 전동기의 케이블에 대한 임피던스를 전원 인가단에 결합하였다.

철심장 내에서의 고정자 권선의 저항 및 인덕턴스는 PWM 전압의 주파수에 영향을 받는다.

그림 3은 주파수에 따른 각 상의 저항 및 인덕턴

스 변화를 나타낸다. 그림 3에서와 같이 주파수가 증가할수록 저항은 증가하고 인덕턴스는 감소한다. 저항이 증가하는 이유는 고주파에서의 표피효과 (skin effect) 때문이며, 인덕턴스가 감소하는 것은 고주파 영역에서 고정자 철심이 자속에 대한 장벽 (barrier) 역할을 하기 때문이다. 각 도체의 저항과 자기 인덕턴스는 위치에 크게 영향을 받지 않고 거의 비슷한 값을 가진다. 반면에 커패시턴스는 주파수에 대한 영향은 거의 받지 않고 슬롯 내의 도체의 위치에 영향을 많이 받는 것으로 나타났다. 상호 커패시턴스는 턴-접지간 커패시턴스에 비해 무시할 수 있을 정도로 작게 나왔다.

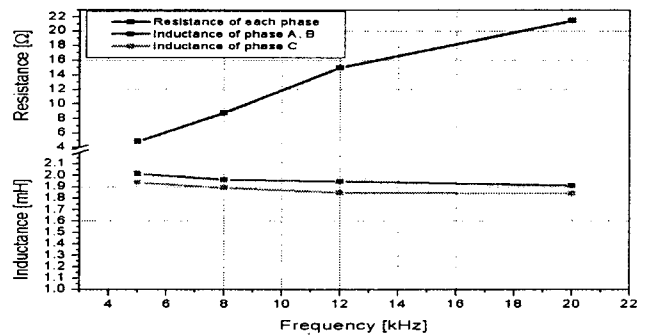


그림 3. 주파수증가에 따른 유도전동기의 파라미터
Fig. 3. Parameter computation as various frequency

3. EMTP에 의한 전압 분포 해석

EMTP(Electromagnetic Transient Program)는 전자기 과도해석 프로그램으로서 집중회로정수, 분포회로정수(주파수 의존, 독립)회로, 비선형 요소로 구성된 시스템의 전압, 전류, 전력 등을 해석할 수 있다. EMTP는 모든 전기 및 전자 회로의 해석에 활용되며 정상상태 및 과도현상의 해석이 가능하다. 특히 시스템의 과도상태 현상의 해석에 유용하게 사용된다.

등가 펄스 전압원의 크기는 단일 스텝 펄스로써 450(V)를, 상승시간은 150, 300, 400 [ns]를 인가하였다. 케이블 모델정수의 서지 임피던스는 70(Ω)으로 보고, 전파속도는 100 [m/μs]로 가정하여 길이 5, 10, 20, 30, 50, 100 [m]에서 수행하였다. 여기서 감쇠는 무시하였다.

등가회로는 A상과 B상만 모델링하였고, C상은 개방하였으며, 처음 5번째 턴까지는 상호 결합 모델로 A상의 나머지 턴과 B상은 일괄 등가 집중 정수 모델로 분석되었다. 턴-대지간 누설 커패시턴스만 고려하고, 턴간 누설 커패시턴스는 무시하였다.

그림 4와 그림5는 주파수 20 [kHz], 상승시간 150 [ns]에서의 케이블 길이에 따른 턴-대지 전압과 턴별 전압을 나타낸다. 턴-대지간 전압은 인버

터의 출력에 비해 크지 않으나, 턴별 전압에서는 첫 번째 턴의 전압이 인버터 전압에 약 1.5배 큰 것으로 나왔다.

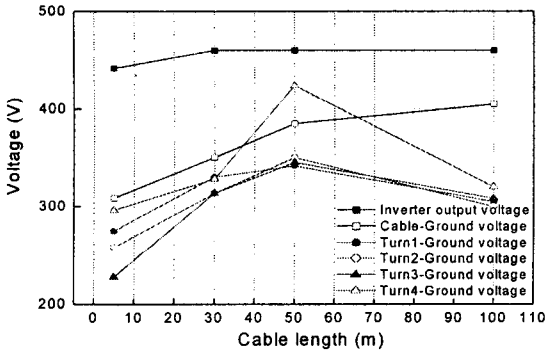


그림 4. 주파수 20 [kHz], 상승시간 150[ns]에서의 케이블 길이에 따른 턴-대지간 전압분포
Fig. 4. Turn to ground voltage distribution at frequency 20 [kHz] and rising time 150

[ns]

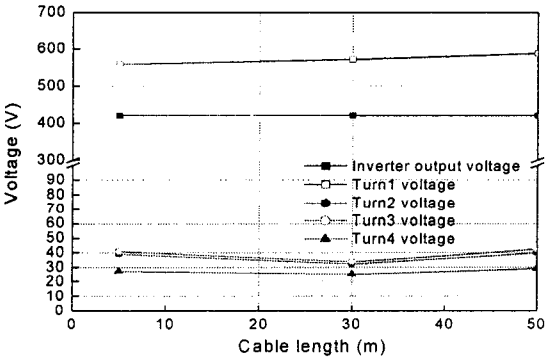


그림 5. 주파수 20(kHz), 상승시간 150[ns]에서의 케이블 길이에 따른 턴별 전압분포
Fig. 5. Turn to turn voltage distribution at frequency 20 [kHz] and rising time 150 [ns]

4. 실험결과 및 검토

그림 6과 같이 유도전동기의 전압분포 측정을 위해 한 상의 첫 번째 턴부터 5턴까지 탭(Tap)을 내어서 제작하였다. 처음 5턴까지의 전압분포를 측정하기 위하여 탭 인출 리드선은 48개의 코일 중 U상 첫 번째 코일의 리드 인출부에서 5번째 턴까지 그림 6과 같이 탭을 인출하였으며, 1번부터 5번까지 확인이 될 수 있도록 번호로 표기하였다. 또한, 코일에 대한 전압 분포를 확인하기 위하여 첫 번째 코일과 두 번째 코일에 각각 탭 E1과 E2를 두었다.

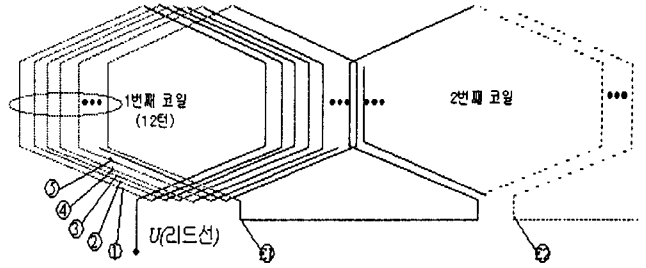


그림 6. 전압분포 측정을 위한 탭 인출
Fig. 6. The tap for measurement of the voltage distribution

인버터의 인가전압이 450 [V], 상승시간이 150, 300, 400 [ns]이고 케이블 길이가 5, 20, 30, 50, 100 [m]인 경우에 대해서 실험을 수행하였다. 또한, PWM 전압의 주파수가 5, 8, 12, 15, 20 [kHz]에 대하여 턴-대지간 전압, 턴별 전압을 수행하였다.

4.1 턴-대지간 전압분포

턴-대지간 전압은 유도전동기에 있어서 권선과 고정자 슬롯간의 전압을 분석하기 위한 것이다. 즉, 턴-대지간 전압의 클 경우 권선에서는 절연 파괴에 의한 전동기 권선의 손상이 발생할 수 있다. 이때, 턴-대지간 전압은 PWM 전압의 주파수, 상승시간, 케이블 길이에 따라서 측정하였다.

그림 7에서 보는 바와 같이 전동기에 인가되는 전류의 크기를 최소화한 경우에는 턴-대지간 전압은 Inverter output voltage에 비해 크지 않음을 알 수 있다. 다시 말하면 고정자 권선의 턴과 슬롯 사이에서의 전압으로 인하여 권선은 크게 스트레스를 받지 않을 수 있는 것으로 판단된다.

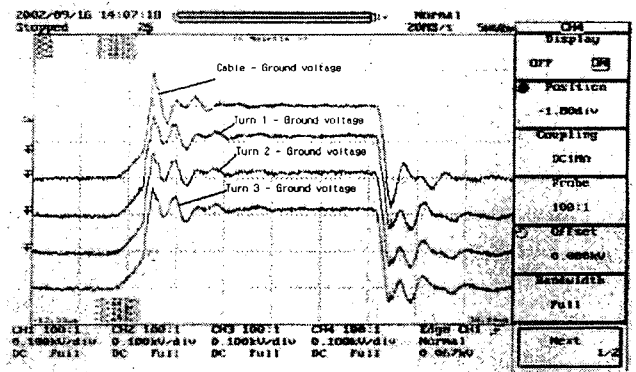


그림 7. 주파수 20 [kHz], 상승시간 150[ns], 케이블 길이 100 [m]에 따른 턴-대지 전압분포 실험결과
Fig. 7. Turn to ground voltage distribution experimental results at frequency 20 [kHz], rising time 150 [ns] and cable 100 [m]

4.2 턴별 전압분포

그림 8은 PWM 인가 전압에 따른 턴별 전압을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 턴 1의 전압은 인가 전압의 약 120(%) 정도로 크게 나오는 반면 나머지 턴 2, 3, 4는 이 턴 1의 전압에 비해 상당히 적은 전압이 걸린다.

턴 1의 전압은 케이블의 길이가 길어질수록 커지며 PWM 전압의 주파수가 커질수록 증가한다. 반면에, PWM 전압의 상승 시간이 증가할수록 턴 1에서의 전압은 대체로 감소하고 있음을 알 수 있다. 이 실험 결과로부터 대부분의 전압 스트레스는 인가 전원이 연결되어 있는 유도전동기 고정자 권선의 첫 번째 코일 그룹의 최초 첫 번째 턴에서 가장 심하게 발생하고 있음을 보여 준다.

따라서, 케이블 길이가 길어질수록, PWM 전압의 주파수가 증가할수록 전압 스트레스를 방지하기 위해서는 인버터 출력 전압(Inverter output voltage)의 상승 시간을 적절히 길게 가져가거나, 전압 스트레스를 가장 심하게 받고 있는 첫 번째 턴에 대하여 특별한 절연 처리를 시행하면 절연 파괴에 상당한 효과가 있을 것으로 사료된다.

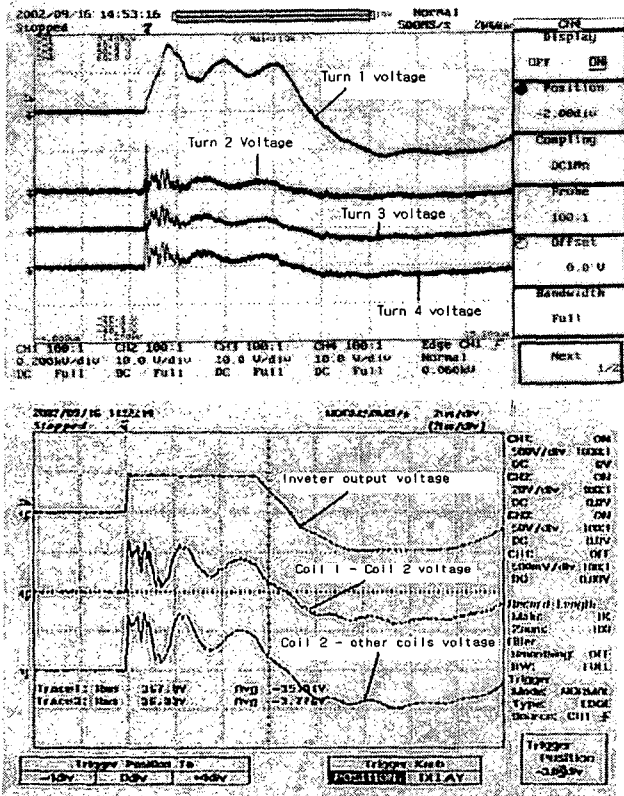


그림 8. 주파수 20 [kHz], 상승시간 150[ns], 케이블 길이 100 [m]에 따른 턴별 전압분포 실험결과
 Fig. 8. Turn to turn voltage distribution experimental results at frequency 20 [kHz], rising time 150 [ns] and cable 100 [m]

5. 결 론

IGBT PWM 인버터의 빠른 스위칭 주파수와 상승시간은 높은 전압변동율(dv/dt)을 발생시켜 유도전동기의 고정자 권선에 불평등 전압분포를 초래하여 절연이 파괴되는 치명적인 현상을 발생시킨다. 본 논문에서는 유도전동기 고정자 권선의 불평등 전압에 의한 문제점을 해결하고자, 유한요소법을 이용하여 유도전동기의 고주파 Parameter를 산출하였고, 각 주파수별 Parameter를 이용하여 인버터, 케이블, 유도전동기로 구성된 전체 시스템에 대한 EMTP 해석을 수행하여 고정자 권선의 불평등 전압 분포를 해석한 결과를 제시하였다.

고정자 권선의 전압분포 실험을 위하여 한 상의 첫 번째 턴에서 다섯 번째 턴까지 탭을 낸 유도전동기를 제작하여 각 턴에서의 전압 분포를 측정하였고, 시뮬레이션의 결과와 유사함을 확인하였다.

인버터의 빠른 상승시간 및 인버터 출력단과 전동기 입력단 사이의 임피던스 부정합으로 인한 반사파가 입사파와 중첩되어 Surge 및 Overvoltage를 초래하는 주된 요인으로 작용한다. 상승시간이 짧을수록, 인버터 출력에서 전동기 입력단에의 Cable 길이가 길수록, 또한 고 주파수일수록 높은 전압 상승률(dv/dt)이 유도되었다. 특히 도체의 첫 번째 턴에서 인버터 출력의 약 1.2배 정도의 높은 Overvoltage가 유기되고 나머지 턴에는 큰 영향이 없음 확인하였다. 따라서 고정자 권선 첫 번째 코일의 절연강화를 위해 첫 번째 턴에 대한 절연보강을 반드시 해야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] E. Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28, No. 5, pp. 1095-1101, Sep./Oct. 1992.
- [2] A. von Jouanne, D.A. Rendusara, P.N. Enjeti, J.W. Gray, "Filtering Techniques to Minimize the Effect of Long Motor Leads on PWM Inverter-Fed AC Motor Drive Systems", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 28, No. 4, pp. 919-925, May 1996
- [3] J.L. Guardado, K.J. Cornick, "Calculation of Machine Winding Electrical Parameters at High Frequencies for Switching Transient Studies", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 11, No. 1, pp. 33-40, Mar. 1996.
- [4] R.J. Kerkman, D. Leggate, "Interaction of Drive Modulation and Cable Parameters on AC Motor Transients", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 33, No. 4, pp. 722-731, Jul./Aug. 1996.