

IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에서의 과도전압 분포특성

黃敦夏^{*}, 金容柱^{**}, 李寅雨^{***}, 裴晟佑^{****}, 金東熙[§], 盧采均[§]

Distribution Characteristics of Irregular Voltage in Stator Windings of IGBT PWM Inverter-Fed Induction Motors

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

요 약

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선에서의 스위칭 켜지전압 분포특성을 분석하였다. 고정자 권선의 턴 및 코일간의 전압분포를 해석하기 위하여 케이블을 포함한 유도전동기의 등가모델을 제안하고, 유한요소법을 이용하여 고주파 파라메타를 산출하였다. 또한, 유도전동기, IGBT PWM 인버터 및 케이블 등에 대한 전체 시스템의 EMTP 시뮬레이션을 통하여 인버터 상승시간, 케이블 길이 및 스위칭 주파수 등의 영향에 따른 전압분포를 분석하였다. 380 [V], 50 [HP] 유도전동기 고정자 권선을 대상으로 한 전압분포 특성실험을 통하여 인버터용 전동기 설치 및 과도전압 억제용 필터 설계시의 유용한 자료를 제시하였다.

ABSTRACT

This paper describes distribution characteristics of switching surge voltage in stator windings of induction motor driven by IGBT PWM inverter. To analyze the voltage distribution between the turns and coils of stator winding, equivalent circuit model of induction motor including cable was proposed and high frequency parameter is computed by using finite-element method (FEM). From the electro-magnetic transient program (EMTP) simulation of the whole system for induction motor, feeder cable, and PWM inverter, the variable effect on rising time of the inverter, cable length, and switching frequency on the voltage distribution is also presented. In order to experiment, an induction motor, 380 [V], 50 [HP], with taps from one phase are built to consider the voltage distribution so that these results can be helpful when filter was designed to remove high dv/dt.

Key Words : Induction motor, IGBT PWM inverter, Stator winding, Switching surge, Finite-element analysis, EMTP simulation

1. 서 론

*정회원, 한국전기연구원 산업전기연구단 선임연구원

E-mail : dhhwang@keri.re.kr

**정회원, 한국전기연구원 기기제어응용그룹장

***정회원, (주)호성 중공업연구소 차장

****학생회원, 영남대 대학원 전기전자공학부 석사과정

§정회원, 영남대 전자정보공학부 교수

접수일자 : 2003. 5. 14

1차심사 : 2003. 5. 28

심사완료 : 2003. 7. 2

전력용 반도체 소자의 진보와 마이크로프로세서 및 DSP 등을 이용한 디지털 제어기법의 도입에 따른 전력전자 기술의 발전에 힘입어 각종 산업설비에 교류전동기 가변속 구동 제어시스템의 응용분야가 크게 확대되고 있다. 특히, 전압과 주파수 제어를 통하여 광범위

한 운전영역에서의 가변속 운전과 정밀한 속도제어가 가능하고, 에너지 절약, 경비절감 및 용이한 유지보수 등의 장점이 있는 PWM 인버터 구동 유도전동기 시스템의 중요성이 더욱 커지고 있다.

최근에는 유도전동기의 가변속 구동용 인버터에 전압 상승시간 200 [ns], 스위칭 주파수 2~20 [kHz] 대역의 IGBT PWM 인버터가 산업설비에 광범위하게 사용되면서 스위칭 손실감소, 입력전류의 파형개선, 가청소음 저감 등의 우수한 동작특성을 가지게 되었다. 그러나 급격한 전압상승률(dv/dt)과 고주파 스위칭이 원인이 되어 고정자 권선의 절연이 조기에 파괴되는 현상이 빈번히 발생되고 있다^{[1][2]}. 이것은 케이블과 전동기 간 및 케이블과 인버터 사이의 임피던스 부정합에 의해 인버터 운전시 펄스전압의 반사현상이 일어나고, 인버터로부터 발생하는 전압파형에 반사파가 중첩되어 전동기의 입력단에 급격하고 파고치가 높은 써지전압이 발생하기 때문이다^[2-4]. 이와 같은 PWM 써지파형이 전동기 권선에 전압 스트레스를 가하는 현상을 분석하기 위한 많은 연구가 이루어지고 있다^[3-6]. 그러나 대부분 케이블 길이와 상승시간에 따른 전압반사 현상, 특히 전동기 입력단자에서의 전압분포를 분석하기 위한 연구가 주로 수행되었고, 과도 써지전압이 가장 크게 인가된다고 알려진 고정자 권선 입력단의 첫 번째 턴에 대한 전압분포의 상세한 실험결과는 부족한 실정이다. 또한, 분포정수 회로인 전송선로와 유사한 특성의 케이블 뿐만 아니라 전동기 및 인버터를 결합하여 고주파 스위칭에 의한 전동기 파라메타 산출, 고주파 등가회로 개발 및 턴간 전압분포 등에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동용 저압 유도전동기의 스위칭 써지에 의한 고정자 권선의 과도전압 해석기법을 제안하고, 과전압 분포특성의 분석결과를 제시한다. 인버터의 빠른 스위칭 주파수에 의한 고주파 영역에서 유도전동기의 파라메타를 산출하기 위해서 고정자 권선의 고주파 등가회로를 구성하였다. 써지에 의한 고정자 권선내의 불평등 전압 분포를 분석하기 위해 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 EMTP (Electro-magnetic Transient Program)에 의한 시뮬레이션을 수행하여

케이블 길이, 상승시간 (dv/dt) 등의 가변에 따른 유도전동기 고정자 권선에서의 전압 분포를 해석하였다.

마지막으로, 고정자 권선의 한 상(phase)에 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 파라메타를 산출하기 위하여 3상, 4극, 60 [Hz], 380 [V], 50 [HP] 유도전동기를 대상으로 단일 슬롯 모델을 구성하여 ANSOFT Maxwell 2D 패키지를 이용한 유한요소 해석을 수행하였다^[7].

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 소선 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.

고정자 권선의 회로정수는 저항, 자기 인덕턴스, 상호 인덕턴스, 도체-고정자 및 도체 사이의 커패시턴스 등으로 구성되고, 누설 Conductance는 매우 작으므로 무시하였다. 저항과 인덕턴스는 주파수의 함수이고, 커패시턴스는 권선의 배치에 따라 결정되기 때문에 고정자 권선의 회로정수는 유한요소법을 이용하여 산출해야 한다.

2.2 고주파 파라메타 산출

권선의 저항과 인덕턴스는 유한요소 해석용 상용 패키지인 Maxwell 2D를 활용하여 식 (1)과 같이 Field 방정식에서 A와 Φ 를 구하는 와전류 해석모듈을 이용함으로써 각각의 저항손실과 자기 저장 에너지로부터 계산할 수 있다. 한편, 커패시턴스는 식 (2)와 같이 Gauss 법칙을 이용하여 정전계 해석모듈을 수행하여 정전에너지로부터 계산할 수 있다^{[8][9]}.

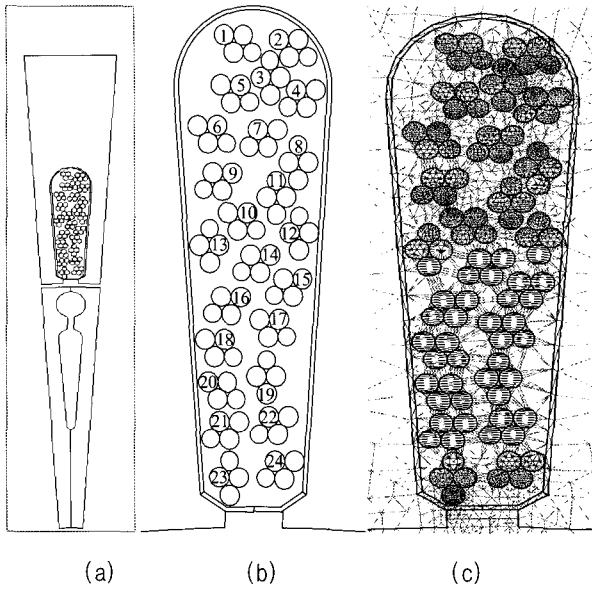


그림 1 단일 슬롯 모델 및 요소 분할도
 (a) 단일 슬롯 모델
 (b) 고정자 슬롯의 권선 배열
 (c) 요소 분할도
 Fig. 1 Cross section of single slot model and mesh diagram
 (a) Single slot model
 (b) Coil distribution of stator slot
 (c) Mesh diagram for finite element analysis

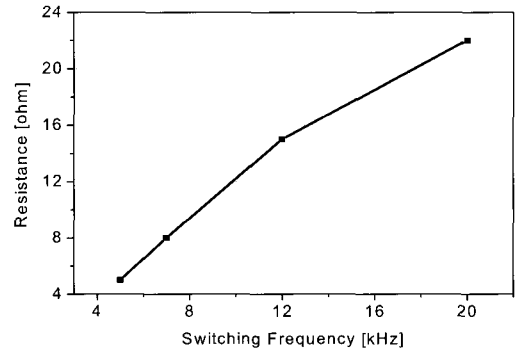
$$\nabla \times \frac{1}{\mu r} (\nabla \times A) = (\sigma + j\omega \epsilon_r)(-j\omega A - \nabla \Phi) \quad (1)$$

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

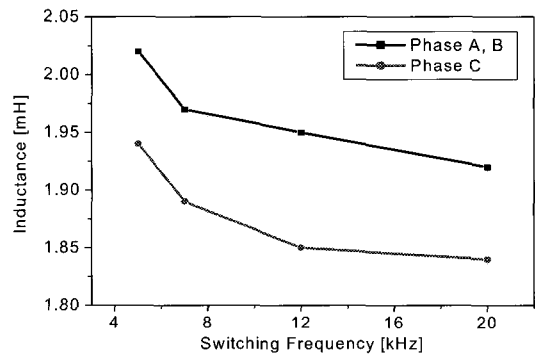
여기서,

- A : Magnetic vector potential [Wb/m]
- Φ : Electric scalar potential
- μr : Relative magnetic permeability
- ω : Angular velocity
- σ : Conductivity
- ϵ_r : Relative permittivity
- $\rho(x, y)$: Charge density

그림 2는 인버터의 스위칭 주파수 증가에 따른 각 상의 저항과 인덕턴스 변화를 나타낸다. 주파수가 증가할수록 저항은 증가하고 인덕턴스는 감소함을 볼 수 있다. 저항이 증가하는 이유는 고주파에서의 표피효과 (Skin effect) 때문이며, 인덕턴스가 감소하는 것은 고주파 영역에서 고정자 철심이 자속에 대한 장벽 (Barrier) 역할을 하기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 저항변화
 (a) Resistance computation



(b) 인덕턴스 변화
 (b) Inductance computation

그림 2 스위칭 주파수에 따른 유도전동기의 파라미터
 Fig. 2 Computation of high-frequency parameters

각 도체의 저항과 자기 인덕턴스는 위치에 크게 영향을 받지 않고 거의 비슷한 값을 가진다. 반면에, 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.

2.3 고주파 등가회로 구성

그림 3은 유한요소법에 의해 산출된 저항, (상호)인덕턴스, (상호)커패시턴스 등의 고주파 파라미터를 이용하여 구성한, 케이블을 포함한 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 전체 등가회로를 나타낸다. Delta 결선의 50 [HP] 유도전동기 고정자 권선의 A상 첫 번째 코일과 B상 첫 번째 코일이 써지 전압의 영향을 크게 받으므로 A상과 B상의 초기 코일에 대하여 1~5 번째 턴은 상세하게 분포정수 회로로 구성하였고, A 및 B상의 나머지 코일과 C상 코일은 집중정수 회로로 구성하였다.

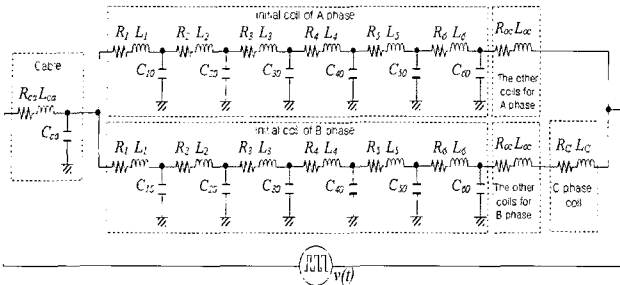


그림 3 고정자 권선의 고주파 등가회로
Fig. 3 High-frequency equivalent circuit of stator winding

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.

3. EMTP에 의한 전압분포 시뮬레이션

3.1 EMTP 시뮬레이션 방법

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 현상의 해석에 유용하게 사용된다^{[10][11]}.

그림 4는 인버터, 케이블 및 유도전동기를 포함하는 전체 시스템의 EMTP 해석모델을 나타내고 있다. 교류전원으로부터 DC Link단을 거쳐 인버터로 출력되는 등가 펄스전압이 길이가 다른 케이블과 연결되고, 이 케이블을 통하여 유도전동기에 펄스전압이 인가된다. 이때 전동기 권선에서 나타나는 전압의 형태는 케이블의 길이, 등가 펄스 전압원의 상승시간 및 PWM 전압의 주파수에 따라 다르게 된다.

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,

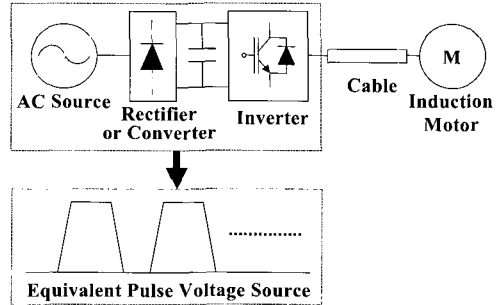


그림 4 EMTP 해석을 위한 전체 시스템 모델
Fig. 4 System model for EMTP analysis

감쇠를 무시하여 케이블 길이를 5, 10, 30, 50, 100 [m] 등으로 가변시켜 해석을 수행하였다. 유도전동기 모델은 그림 3에 나타난 고정자 권선의 고주파 등가회로를 적용하였다.

3.2 EMTP 시뮬레이션 결과

그림 5와 그림 6은 EMTP 시뮬레이션 결과 중에서 주파수 20 [kHz], 상승시간 200 [ns]에서의 케이블 길이에 따른 턴-대지간 및 턴별 전압을 나타낸 것이다. 그림 5에 나타난 턴-대지간의 전압은 케이블의 길이가 증가함에 따라 높아짐을 볼 수 있지만, 인버터 출력전압 380 [V]와 비슷한 크기이므로 고정자 권선의 턴과 슬롯 간의 전압에 의해서는 스트레스를 크게 받지 않는 것으로 판단된다.

케이블 길이에 따른 고정자 권선내의 턴별 전압분포를 나타낸 그림 6을 보면, 케이블 길이가 30 [m] 이상부터 첫 번째 턴의 전압이 크게 증가하는 것을 알 수 있고, 100 [m]일 때는 인버터 출력전압 보다 약 1.6배 이상 큰 써지전압이 유기됨을 확인할 수 있다.

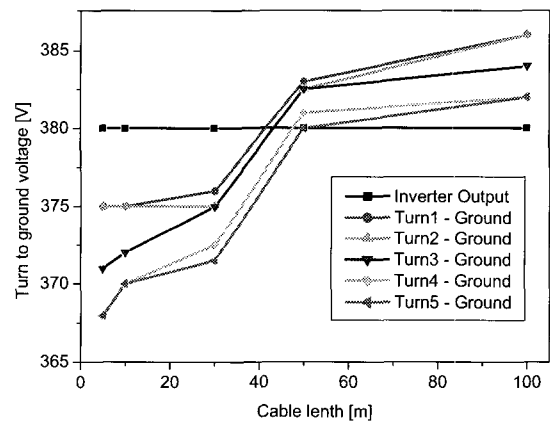


그림 5 턴-대지간 전압분포
Fig. 5 Turn to ground voltage

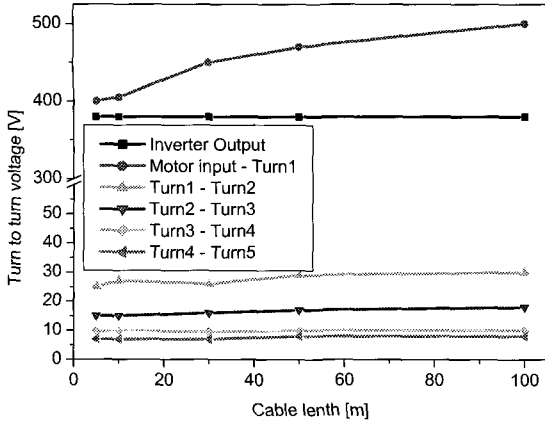


그림 6 턴간 전압분포
Fig. 6 Voltage distribution of turn to turn

이것은 인버터 써지 전압이 전동기 고정자 권선에 침입하면 상용전원으로 운전하는 경우와 달리 전압이 코일 간에 균일하게 분배되지 않고 전원단자에 제일 가까운 코일에 집중한다는 것을 알 수 있고, 전압의 크기는 케이블 길이가 길수록 써지 파형의 상승시간이 짧아질수록 크게 된다는 것을 나타낸다.

4. 전압분포 실험결과 및 검토

4.1 전압분포 실험방법

유도전동기 고정자 권선에서의 케이블 길이, 스위칭 주파수 및 상승시간에 따른 인버터 써지전압의 분포를 측정하기 위하여 그림 7과 같이 한 상의 첫 번째 턴부터 5번째 턴까지 탭(Tap)을 낸 380 [V], 50 [HP]급 유도전동기를 제작하였다. 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.

그림 8은 전압분포 실험을 위하여 고정자 권선에 탭을 인출한 50 [HP] 유도전동기 고정자의 실체사진을 보여주고 있다. 고정자 권선에 써지전압의 인가는 스위칭 주파수, 상승시간, 인가전압 및 전류 등을 가변시킬 수 있는 스위칭 써지 발생기를 이용하였고, 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] 등

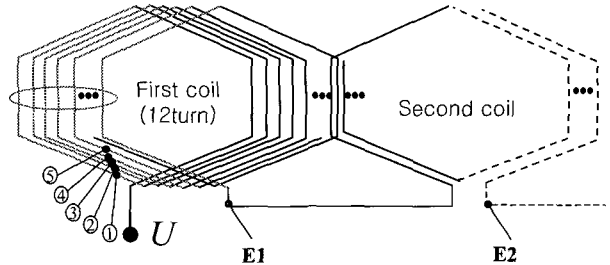


그림 7 턴전압 측정을 위한 탭 인출
Fig. 7 Five taps for measurement of turn voltages

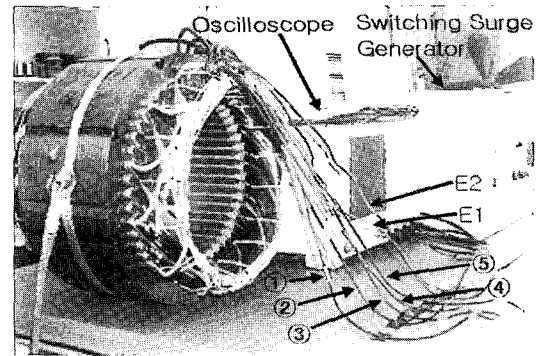


그림 8 실험장치 구성
Fig. 8 Experimental set-up

으로 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 대하여 각 턴에서의 전압분포 실험을 수행하였다.

4.2 전압분포 실험결과 및 검토

인버터와 전동기 사이에 연결되는 케이블의 길이에 따른 턴별 전압파형의 한 예를 그림 9에 나타내었다.

스위칭 펄스파형의 상승시간은 300 [ns], 스위칭 주파수는 5 [kHz]인 경우를 나타낸 것으로서, 케이블 길이가 5 [m]인 그림 9(a)에서는 인버터 출력전압과 전동기 고정자 권선의 첫 번째 턴 전압이 거의 같음을 알 수 있으나, (b)의 100 [m] 케이블에서는 첫 번째 턴의 전압이 인버터 출력전압의 약 1.5배 정도로 크게 나타남을 볼 수 있다. 반면에 나머지 턴은 매우 작은 전압 분포를 보이고 있다. 그러므로 케이블 길이가 길어질수록 전동기에서 발생하는 써지전압이 커지고, 전원단자에 가장 가까운 첫 번째 턴에서 가장 큰 전압이 유기됨을 확인할 수 있다.

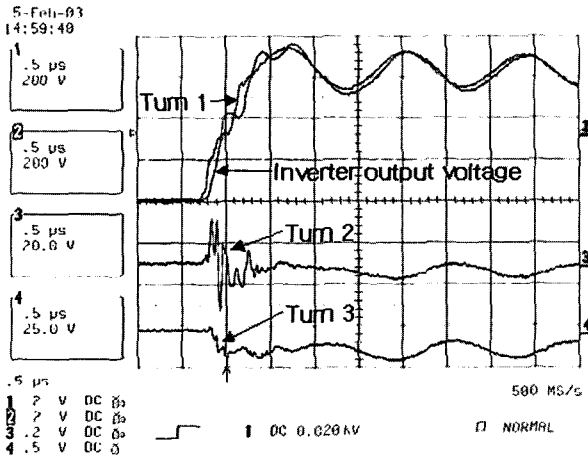
그림 10은 스위칭 주파수 12 [kHz], 케이블 길이 30

[m]인 경우에서 인버터 써지전압의 상승시간에 따른 고정자 권선 각 턴에서의 전압분포 파형을 나타내고 있다. 상승시간이 1[μs]인 경우를 나타낸 그림 10(a)를 보면, 첫 번째 코일의 전압크기는 인버터 출력전압의 크기와 유사하다. 그러나 그림 10(b)에서 보는 바와 같이 상승시간이 300[ns]로 짧아지게 되면 첫 번째 턴에만 걸리는 전압이 인버터 출력전압보다 커짐을 알 수 있다.

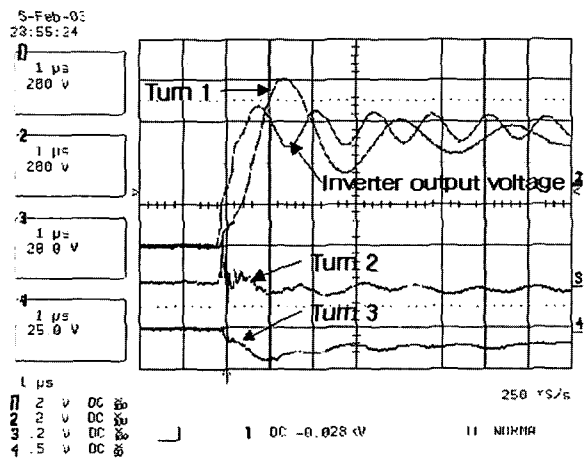
과도 써지전압이 가장 크게 분포하는 첫 번째 턴에 대한 전압분포를 상세히 분석하기 위해, IGBT PWM 인버터의 스위칭 주파수별로 첫 번째 턴에서의 전압분포를 종합적으로 정리해서 그림 11과 같이 3차원 그래

프로 나타내었다. 그림 11(a)는 스위칭 주파수가 5 [kHz], 그림 11(b)는 12 [kHz], 그림 11(c)는 20 [kHz]일 때의 케이블 길이와 상승시간에 따른 첫 번째 턴에서의 전압분포를 나타내고 있다.

먼저, 스위칭 주파수에 따른 첫 번째 턴에서의 전압을 분석하기 위해, 그림 11의 (a), (b) 및 (c)를 비교해 보면, 스위칭 주파수가 빨라져도 써지전압의 크기 자체는 큰 변화가 없음을 확인할 수 있다. 그러나, 주파수가 빨라지면 써지전압의 펄스 반복율이 커지기 때문에 고정자 권선이 받는 스트레스는 스위칭 주파수가 증가함에 따라 더욱 많아지게 된다.

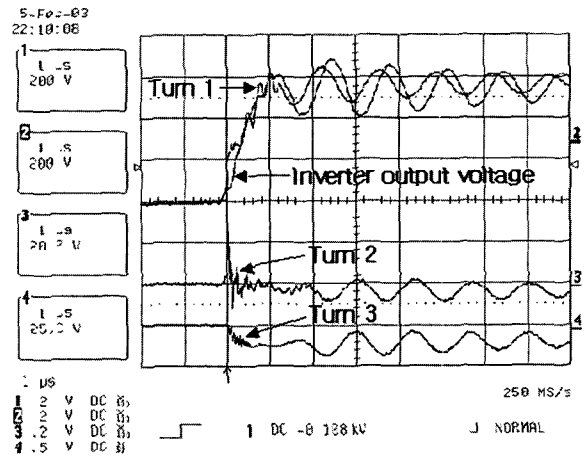


(a) 케이블 길이 : 5 [m]
(a) Cable length : 5 [m]

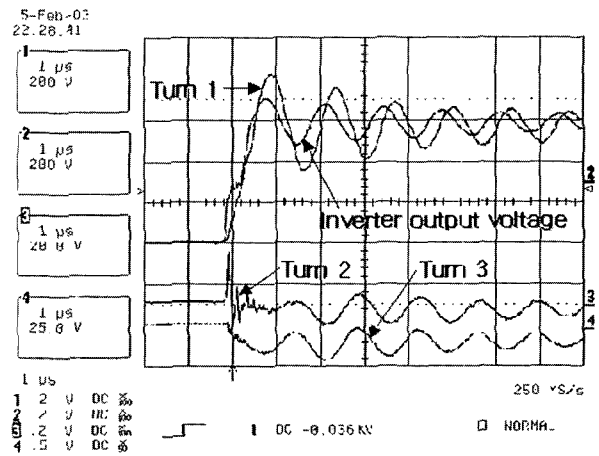


(b) 케이블 길이 : 100 [m]
(b) Cable length : 100 [m]

그림 9 케이블 길이에 따른 턴간 전압파형
Fig. 9 Turn-to-turn voltage vs. cable length

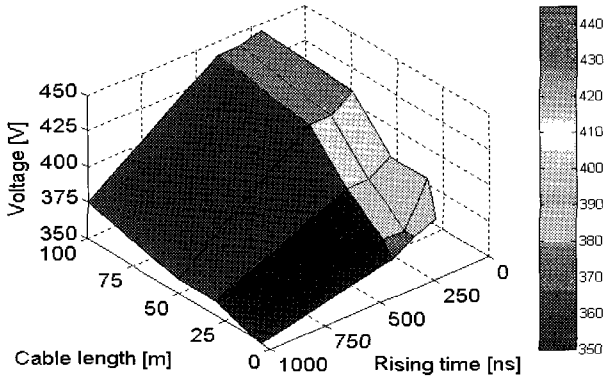


(a) 상승시간 : 1 [μs]
(a) Rising time : 1 [μs]

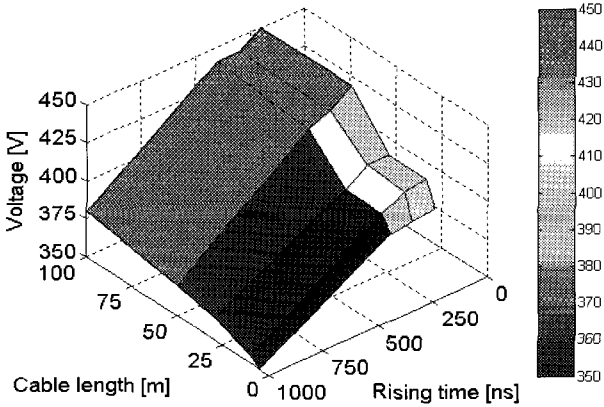


(b) 상승시간 : 300 [ns]
(b) Rising time : 300 [ns]

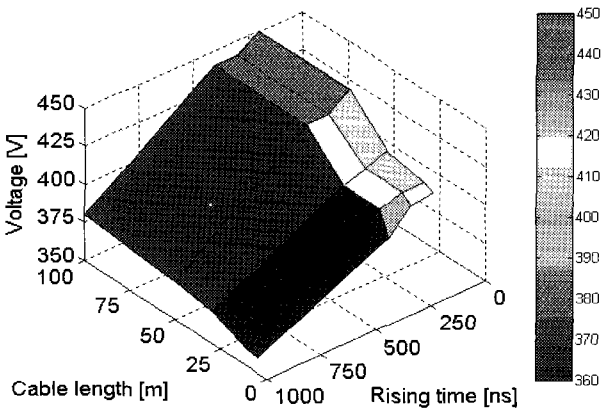
그림 10 상승시간에 따른 고정자 권선의 전압파형
Fig. 10 Turn-to-turn voltage vs. rising time



(a) 스위칭 주파수 : 5 [kHz]
 (a) Switching Frequency : 5 [kHz]



(b) 스위칭 주파수 : 12 [kHz]
 (b) Switching Frequency : 12 [kHz]



(c) 스위칭 주파수 : 20 [kHz]
 (c) Switching Frequency : 20 [kHz]

그림 11 첫 번째 턴에서의 전압분포
 Fig. 11 Voltage distribution at first turn

그리고, 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.

그러므로 고정자 권선에서의 스위칭 써지에 의한 전압 스트레스를 방지하기 위해서는 인버터 출력전압의 상승시간을 적절히 길게 가져가거나, 스위칭 주파수를 느리게 하고, 전압 스트레스를 가장 심하게 받고 있는 첫 번째 턴에 대하여 절연보강을 하게 되면 절연과피 방지에 큰 효과가 있을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 논문에서는 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기 고정자 권선의 초기 절연과피 사고를 초래하는 부분방전을 발생시키는 과도 스위칭 써지전압의 해석기법을 제안하였고, 과전압 분포특성을 분석하였다. 유한요소법을 이용하여 유도전동기의 고주파 파라미터를 산출하여 케이블을 포함한 고정자 권선의 고주파 등가회로 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 써지의 턴별 전압 분포를 측정하였고, 첫 번째 턴에서의 전압분포 특성을 상세히 분석하였다.

본 논문에서 제시한 고주파 파라미터, 등가회로 및 시뮬레이션 기법과 실험결과는 인버터용 유도전동기를 현장에 설치할 때와 과전압 억제용 필터 설계 등에 있어서 유용한 자료로 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

[1] E. Persson, "Transient Effects in Application of PWM Inverters to Induction Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 5, pp. 1095~1101, Sep./Oct. 1992.
 [2] A.V. Jouanne and P.N. Enjeti, "Design Considerations for an Inverter Output Filter to Mitigate the Effects

of Long Motor Leads in ASD Applications", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 5, pp. 1138~1145, Sep./Oct. 1997.

[3] 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.

[4] C.J. Melhorn and L. Tang, "Transient Effects of PWM Drives on Induction Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, No. 4, pp. 1065~1072, Jul./Aug. 1997.

[5] 김이훈, 박규현, 원충연, 김영석, 최세완, "PWM 인버터 시스템에서의 전도노이즈 저감을 위한 출력필터 설계에 관한 연구", 전력전자학회논문지, 제6권, 제6호, pp. 546~555, 2001.12.

[6] 김한중, 이근호, 장철호, 이재필, "전동기 과전압 억제용 Output Reactor의 최적 설계", 전력전자학회논문지, 제4권, 제5호, pp. 483~490, 1999.10.

[7] Maxwell 2D Field Simulator, User's Reference, Release Notes Version 6.4, Ansoft Corporation, 1997.

[8] 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.

[9] 김창화, 이용한, 안호진, 황돈하, 박도영, 허익구, 최병원, "IGBT 인버터 구동 저압 유도전동기 고정자 권선의 과도전압 해석", 2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 690~692, 2000. 7.

[10] ATP Rule Book, ATP Solford Version of EMTP, Volume 1 and 2, Leuven EMTP Center, 1987.

[11] 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.

저 자 소 개



황돈하(黃敦夏)

1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993년~현재 한국전기연구원 산업전기연구단 기기제어응용연구그룹 선임연구원.



김용주(金容柱)

1975년 서울대 전기공학과 졸업. 1984년 미국 R.P.I. 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~현재 한국전기연구원 책임연구원. 1999년~2000년 한국전기연구원 산업전기연구단 단장. 2001년~현재 한국전기연구원 기기제어응용연구그룹 그룹장. 2003년~현재 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 전기기기연구회 위원장.



이인우(李寅雨)

1984년 영남대 전기공학과 졸업. 1987년~현재 (주)호성 중공업연구소 기전팀 차장.



배성우(裴晟佑)

2002년 영남대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정. 한국전기연구원 기기제어응용연구그룹 위촉연구원.



김동희(金東熙)

1973년 영남대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 일본 Kobe대 대학원 졸업(공학박). 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자연구부장. 현재 영남대 전자정보공학부 교수. 1999년~2000년 대한전기학회 전력전자연구회 위원장. 2000년 9월~2001년 2월 일본 Kyushu대 교환교수. 2002년~현재 당 학회 경상지부장.



노채균(盧采均)

1961년 서울대 전기공학과 졸업. 1975년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~1983년 미국 켄터키 주립대학 교환교수. 현재 영남대 전자정보공학부 교수.