

IGBT 인버터 구동 저압 유도전동기 고정자 권선의 과도전압 해석

김창화* · 이용한* · 안호진* · 황돈하* · 박도영* · 허익구* · 최병원*
 *한국전기연구원 메카트로닉스연구그룹, *한국전기연구원 시스템제어연구그룹, *(주)효성

Analysis of Voltage Distribution in the Stator Winding of Low-Voltage Induction Motor driven by IGBT PWM Inverter

C.H. Kim* · Y.H. Lee* · H.J. An* · D.H. Hwang* · D.Y. Park* · I.G. Huh* · B.W. Choi*
 *Mechatronics Research Group, KERI. *Systems Control Reseach Group, KERI. *Hyosung Co. Ltd.

Abstract - In this paper voltage distribution in the windings of an inverter fed induction motor is studied. High frequency parameters of the induction motor are calculated using finite element analysis. With these parameters, a high frequency equivalent circuit of the inverter-cable-motor is formed. The transient analysis is performed using ATP-EMTP package to estimate the voltage distribution in the motor windings.

들이 대두되기 시작하였다. 즉, IGBT PWM 인버터에 의해 구동되는 유도전동기의 입력전압에 2 p.u. 이상이 되는 썌지(surge)가 인가되기 시작하였고, 또한 이전까지는 문제가 되지 않았던 인버터와 전동기사이의 케이블의 길이도 전압상승에 큰 요인으로 등장하게 되었다. 그림 1은 IGBT PWM 인버터와 유도전동기 각 부분에서의 전압파형이다. IGBT PWM 인버터로 구동되는 유도전동기는 인버터 출력단에서는 썌지전압이 나타나지 않으나 전동기 입력단에서는 큰 크기의 전압이 나타남을 알 수 있다.

1. 서론

전력용 스위칭 소자의 급격한 발달에 의해 고주파 스위칭 운전이 가능해짐에 따라 전압과 주파수를 변경하여 광범위하고 연속적인 가변속 운전이 가능하고 다양한 속도제어에 사용되는 PWM 인버터의 성능이 크게 향상되었다. 그러나 고속 스위칭 속도와 향상된 PWM 기법은 인버터 구동 유도전동기의 성능을 향상시키는 반면에, 짧은 상승시간에 따른 높은 전압상승율(dv/dt)은 전동기의 고정자 권선 절연에 치명적인 손상을 입힌다. 특히, 20 kHz 정도의 고속 스위칭이 가능한 IGBT가 사용된 PWM 인버터에서의 급격한 전압상승율과 고주파 스위칭은 전동기 고정자 권선에 불규칙한 전압분포를 야기시키고, 이것은 고정자 권선의 조기 절연파괴를 가져오게 된다.

본 연구에서는 IGBT PWM 인버터 구동 유도전동기에서 인버터의 고주파 스위칭 과도전압에 의한 유도전동기 고정자 권선에서의 전압분포를 분석하였다. PWM 인버터에서의 높은 전압상승율에 의한 고정자 권선의 불규칙한 전압분포를 연구하기 위하여 고정자 권선의 등가모델을 개발하였다. 유한요소해석 패키지인 Maxwell 2D에서 2차원 전자계 해석을 수행하여 구한 고주파 Parameter 해석결과와 EMTF 해석을 수행하여 얻은 고정자 권선 등가모델에서의 전압분포 분석결과를 제시한다.

2. 유도전동기 모델

IGBT 인버터 구동용 유도전동기 슬롯내의 전압분포 해석을 위하여 2차원 전계 해석 모델을 전자계 해석 프로그램에 입력하고 고주파 영역의 파라미터 도출을 위한 전계 해석을 수행하였다. 그리고 전계 해석을 통해 얻어진 고주파 파라미터를 이용하여 고정자 권선에서의 전압분포를 분석하기 위하여 EMTF 해석을 수행하였다.

2.1 PWM 인버터 구동 유도전동기 모델

IGBT PWM 인버터는 GTO소자를 사용한 인버터에 비해 스위칭 속도가 2 ~ 20 kHz 대역으로써 대단히 빠르기 때문에 지금까지 나타나지 않았던 새로운 문제점

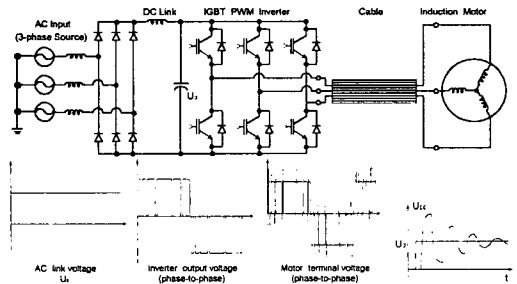


그림 1. IGBT PWM 인버터와 유도전동기 각 부분에서의 전압파형

유도전동기 고정자 슬롯 내부에 많은 도체가 있을 때 고주파 과도전류는 처음 몇 턴의 도체와 고정자 사이에 존재하는 커패시터(capacitor)를 통해서 흐르게 된다. 이것은 대부분의 전압강하가 처음 몇 턴의 도체에 집중해서 발생한다는 것을 의미한다. PWM 인버터의 상승시간이 짧을수록 과도상태의 주파수가 증가하므로 전압분포의 불평형은 더욱 심화되어 고정자 권선의 절연에 심각한 손상을 주게된다.

2.2 고정자 권선의 등가 모델

PWM 인버터 구동 저압 유도전동기의 고정자 슬롯내부의 도체는 턴 수가 많고 슬롯 내부의 턴 배치가 불규칙적으로 배치되어 있다. 따라서 대부분의 전압강하는 코일의 처음 몇 턴에 집중되어 나타나므로 고정자 권선의 등가 모델은 처음 5개의 턴은 분포 회로 정수로 나타내었고, 나머지 턴은 집중 회로 정수로 나타내었다. 그림 2는 고정자 권선의 등가 모델을 나타낸 것이다.

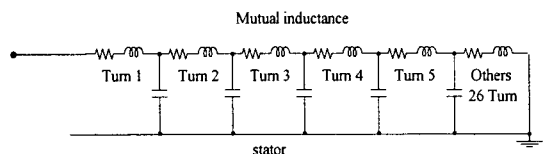


그림 2. 하나의 코일 그룹의 등가회로

등가 모델은 처음 5개 턴에 대한 self inductance, resistance, turn-to-ground capacitance 그리고 mutual inductance로 구성되어 있다.

3. 고주파영역 파라미터 산출

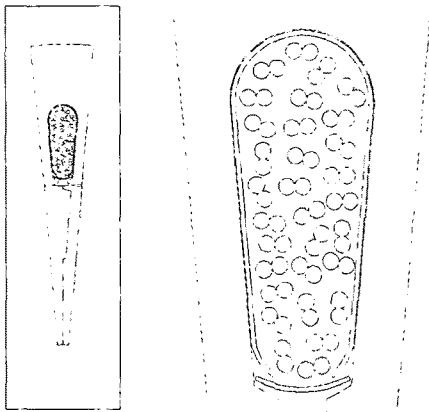
3.1 5hp급 유도전동기 실제 모델 개발

5hp급 유도전동기 고정자 권선에서의 전압분포 예측을 위해 고정자 슬롯 36개중 1개와 회전자 슬롯 45개중 1개를 모델링하고, 고정자 슬롯 내부에는 동선 직경 $\phi 0.9$ 의 소선 31개(소선 2개 병렬 연결), 회전자 슬롯은 알루미늄 바를 입력하여 모델링 하였다. 또한 정확한 capacitance 계산을 위하여 slot cell과 top wedge를 같이 모델링하였다.

실제 모델의 전계 해석에 사용된 재질 정수는 표 1과 같고 입력 형상 및 권선 배열은 그림 3에 나타나 있다.

표 1. 해석에 사용된 재질정수

object	material	μ_r	ϵ_r	σ [s/m]
slot cell, top wedge	polyethylene	1.00	2.25	0
stator, rotor	steel	2000.00	1.00	2.0E+06
coil	copper	0.999991	1.00	5.8E+07
conductor bar	aluminum	1.000021	1.00	3.7E+07



(a) 모델의 입력형상 (b) 모델 고정자 슬롯의 권선 배열

그림 3. 5HP급 유도전동기의 FEM 해석용 단일슬롯 모델

3.2 고주파 파라미터 산출

고정자 권선의 회로정수는 resistance, self inductance, mutual inductance, turn-ground capacitance로 구성된다. 누설 conductance는 매우 작으므로 무시해도 될 것이다. resistance와 inductance는 주파수의 함수이며, capacitance는 권선의 배치에 따라 결정된다. 권선의 저항 및 inductance는 유효요소 해석 패키지인 Maxwell 2D에서 eddy current 해석 모델을 이용하여 저항손실 및 자기저장에너지로부터 계산할 수 있고, capacitance는 정전계 해석 모델을 수행하여 정전에너지로부터 계산할 수 있다.

3.2.1 임피던스(Impedance) 계산

Maxwell 2D의 eddy current 해석모듈을 이용하여 impedance를 계산할 수 있다. 고주파 영역에서 자속은 철심에서 발생한 eddy current에 의해 슬롯 표면에만 존재하기 때문에 이 모델에서는 Balloon 경계조건을 부여하였다. Maxwell 2D에서 eddy current 해석을 수행하면 저항 손실 P와 자기 에너지 U_{AV}를 알 수 있다. 따라서 저항과 인덕턴스는 다음 식으로 계산된다.

$$L = \frac{4 U_{AV}}{I_{rms}^2}$$

$$R = \frac{2P}{I_{rms}^2}$$

각 도체의 인덕턴스를 구하기 위해서는 각 도체에 1[A]의 전류를 인가하고 나머지 도체는 0[A]로 한다. 다른 도체에 대해서도 같은 방법으로 실행하면 인덕턴스 행렬을 구할 수 있다.

주파수가 증가할수록 저항은 증가하고 inductance는 감소한다. 저항이 증가하는 것은 고주파에서의 표피효과(skin effect) 때문이며, inductance가 감소하는 것은 고주파 영역에서 고정자 철심이 자속에 대한 장벽(barrier)역할을 하기 때문이다.

3.2.2 Capacitance 계산

Maxwell 2D에서 정전계 해석모듈을 수행하면 정전 에너지 U를 알 수 있다. 따라서 Capacitance는 정전 에너지로부터 다음 식과 같다.

$$C = \frac{2U}{V^2}$$

정전계 해석은 각 도체에 1[V]의 전압을 인가하고, 나머지 도체 및 고정자, 회전자에는 0[V]를 인가하여 수행하였다.

슬롯 내부의 중간에 위치한 도체들은 비교적 슬롯 표면과 멀리 떨어져 있어서 capacitance가 작게 나왔으나 주변 도체들이 0[V]로 접지되어 있기 때문에 슬롯 표면에 위치한 도체의 capacitance와 큰 차이가 없다. 그리고 capacitance는 주파수와 무관하게 나타났다.

3.3 고주파 등가회로 구성

3.3.1 저항

저항은 도체의 위치에 관계없이 거의 일정하므로 처음 5턴의 저항값은 평균하여 동일하게 취급하였고, 나머지 26턴에 대해서는 턴 수를 곱하여 일괄하여 나타내었다.

3.3.2 Inductance

처음 5턴의 self inductance는 계산 결과를 그대로 이용하였고, 나머지 26턴에 대해서는 평균 inductance에 턴 수의 제곱을 곱하여 계산하였다. 그리고 mutual inductance는 결합계수를 이용하여 계산하였다.

3.3.3 Capacitance

각 도체의 turn-ground capacitance는 계산 결과를 이용하였고, 처음 5턴을 제외한 나머지 턴은 집중회로 정수로 나타내었다.

3.3.4 고정자 권선의 등가회로 구성

그림 4는 하나의 코일의 등가회로를 나타낸 것이다. 처음 5턴은 분포회로 정수로 나타내었고, 나머지 26턴은 집중회로정수로 나타내었다. 등가회로의 회로정수는 표 2. 3에 나타내었다.

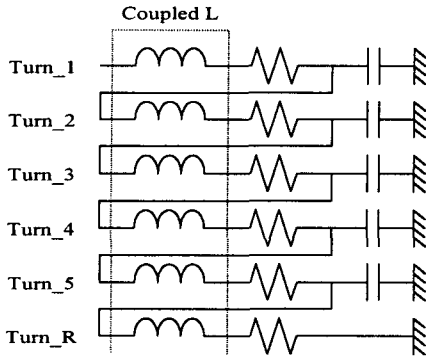


그림 4. 고정자 권선 모델

표 2. 턴 저항 및 누설 capacitance

턴 번호	저항 [ohm]	capacitance [pF]
1	2.19	17.36
2	2.19	14.34
3	2.19	20.52
4	2.19	20.27
5	2.19	15.44
나머지 26턴	57.02	469.94

표 3. 턴 self 및 mutual inductance [μ H]

	1	2	3	4	5	나머지
1	0.0855	0.0152	0.0133	0.0076	0.0019	0.8398
2		0.0684	0.0304	0.0228	0.0095	0.7524
3			0.0684	0.0285	0.0114	0.7524
4				0.0646	0.0228	0.7296
5					0.0760	0.7923
나머지						51.6325

4. 과전압 시뮬레이션

전계 해석을 통해 얻어진 고주파 파라미터와 고정자 권선 등가회로를 이용하여 고정자 권선에서의 전압분포를 분석하기 위하여 EMTP 해석을 수행하였다. 그림 5는 전계 시스템 모델을 나타낸 것이다.

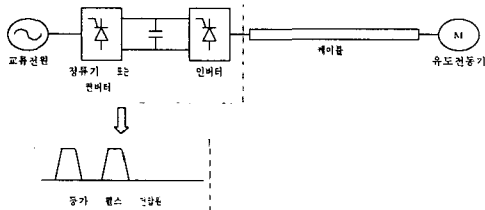


그림 5. 시스템 모델

등가 펄스 전압원은 상승시간이 $0.1\mu s$ 이고, 크기가 $100[V]$ 인 단일 step pulse를 인가하였고, 케이블 길이를 10, 30, 50, 100[m]인 경우에 대해서 해석을 수행하였다. 그림 6은 케이블 길이에 따른 턴-대지간 전압분포, 그림 7은 턴별 전압분포, 그림 8은 턴별 전압 파형을 나타낸 것이다.

고정자 권선단에 약 2.2 p.u.(1 p.u. : 인버터 출력 펄스 크기의 가혹한 과전압이 발생됨을 확인하였으며, 처음 다섯 번째까지의 턴별 발생 전압은 첫 번째 턴에서 가장 높은 과전압이 발생되는 것도 확인하였다.

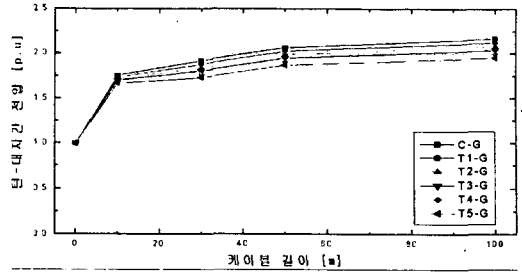


그림 6. 턴-대지간 전압 (상승시간 100 ns)

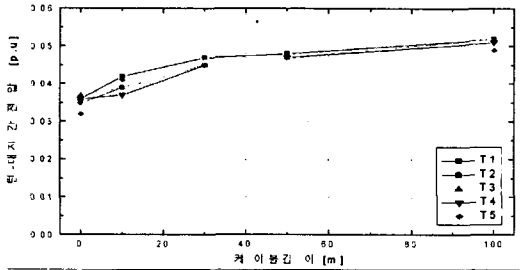


그림 7. 턴별 전압 (상승시간 100 ns)

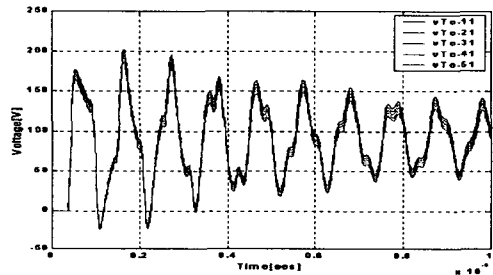


그림 8. 턴별 전압 파형(100ns, 50m)

5. 결 론

본 논문에서는 IGBT 인버터 구동 유도전동기의 고정자 권선의 과도전압분포를 simulation하는데 사용될 수 있는 EMTP model이 제시되었다.

과도 상태 해석을 수행한 결과 cable의 길이가 증가함에 따라 motor 단자 전압이 증가함을 알 수 있다. 슬롯 내부의 권선이 무질서하게 배열되어 있는데, 만약 권선의 처음과 끝부분이 가깝게 배치되어 있고 feeder cable이 길다면 고정자 권선의 과전압으로 인하여 절연 상태에 심각한 영향을 미칠 수 있다는 것을 확인할 수 있었다. 앞으로 5hp 및 20hp 유도전동기 고정자 권선의 절연파괴시험을 수행할 예정이다.

(참 고 문 헌)

- [1] G. Suresh, H.A. Toliyat, and A. Abur, "Analysis of the Effect of Feeder Cable on the Stator Winding Voltage Stress in a PWM Induction Motor Drive", IEEE Electric Insulation Conference, pp.407-412, 1997
- [2] D-H. Hwang, D-Y. Park, Y-J. Kim, "Analysis of Insulation Characteristics of Low-Voltage Induction Motor Driven by IGBT PWM Inverter", IEEE ISEI Conference Record, pp.17-20, 2000
- [3] ATP Rule Book, ATP solford Version of EMTP, Volume 1, 2, Leuven EMTP Center, 1987
- [4] Maxwell 2D Field Simulator, User's Reference, Release Notes Version 6.4, Ansoft Corporation, 1997