

인버터 구동 유도전동기의 코일과 턴에서의 전압 분포 연구

권병훈, 안정렬, 전태원*, 김홍근**, 노의철***

울산대학교 전기전자정보시스템공학부*, 경북대학교 전자전기공학부**, 부경대학교 전기제어공학부***

A Study of Voltage Distribution on Coils and Turns in Inverter Fed Induction Motor

B.H.Kwon, J.R.Ahn, T.W.Chun*, H.G.Kim**, and E.C.Nho***
 Ulsan University*, Kyungpook University**, Pukyong University***

ABSTRACT

The voltage stress on line-end coil of the stator winding in the induction motor fed by a PWM inverter is analyzed, using the computer model based on multi-conductors transmission line. A method to calculate circuit parameters, especially, capacitance between the turns and ground is proposed. The voltage distributions inside coil at motor terminal depending on dv/dt are investigated through simulation studies.

1. 서 론

일반적으로 PWM인버터는 고속의 스위칭을 하기 위해서는 매우 짧은 턴-온 또는 턴-오프시간을 가지게 되며, 이것은 결국 dv/dt 값을 상승시킨다. 이 인버터 고주파 출력전압은 케이블 및 전동기 임피던스 등에 의하여 전동기 단말에서 전압 반사(Voltage reflection)가 발생되며, 이에 의해 전압 오버슈트를 일으킨다. 이 전압 오버슈트는 스위칭 주기마다 반복된다.

또한, 전동기 단말부분에서 높은 dv/dt 값은 전동기 내부 코일 및 턴에 따라 전압분포가 불균일하므로 오버슈트된 전압이 특정 코일 또는 턴에 과도한 전압 스트레스를 인가시키는 결과를 초래한다^[1]. 급준파(Steep-fronted wave)가 전동기 코일에서 일으키는 전압의 불균일한 분포를 계산하기 위한 여러 가지 방법들이 제시되어 왔으며, 그 중에 코일을 5개의 영역이 직렬로 연결된 다중송전선로로 모델링하는 방법이 제안되었다^[2].

본 논문에서는 먼저 여러 선로 정수의 단위 길이 당 값을 계산한다. 이 선로정수를 좀 더 정확히 구하기 위해 FEM 해석을 적용하는 방법도 제시되었으나^[4], 본 논문에서는 코일을 평판 커패시터로 간주하여 커패시턴스 값을 구하였다. 다음은 적절한 전동기 단말조건에서 다중송전선로 방정식을 분산 행렬 이론이나^[2], 모달 해석의 방식을 사용하여^[3] 다중송전선로 모델 해를 구한다. 전동기 단말에서의 dv/dt 값의 변화에 따른 코일 및 턴에서의 전압분포 특성을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 타당성을 확인한다.

2. 선로정수 계산

2.1 파동 방정식

전동기의 코일은 여러 개의 턴(Turn)으로 구성되어있으며, 따라서, 코일을 다중도체 전송선으로 해석할 수 있다. 코일의 어느 지점 z 에서의 전압 및 전류는 아래의 식 (1) 과 (2)로 표

현될 수 있다.

$$\frac{d}{dz} \bar{V}(z) = -\bar{Z} \bar{I}(z) \quad (1)$$

$$\frac{d}{dz} \bar{I}(z) = -\bar{Y} \bar{V}(z) \quad (2)$$

여기서,

$$\bar{V}(z) = \begin{bmatrix} V_1(z) \\ V_2(z) \\ \vdots \\ V_n(z) \end{bmatrix} \quad \bar{I}(z) = \begin{bmatrix} I_1(z) \\ I_2(z) \\ \vdots \\ I_n(z) \end{bmatrix} \quad (3)$$

이며, n 은 다중도체의 수, 즉 코일의 턴 수이다.

코일을 균일하며 손실 없는 전송선으로 가정하고, 근접효과(Proximity effect)에 의한 상호저항을 무시하면 임피던스 행렬은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\bar{Z} = \begin{bmatrix} L_{11} & L_{12} & \dots & L_{1n} \\ L_{21} & L_{22} & \dots & L_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{n1} & \dots & \dots & L_{nn} \end{bmatrix} \quad \bar{Y} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \dots & \dots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(1)과 (2)를 z 변수로 한 번 더 미분을 하면 다음 식이 유도된다.

$$\frac{d^2}{dz^2} \bar{V}(z) = \bar{Z} \bar{Y} \bar{V}(z) \quad (5)$$

$$\frac{d^2}{dz^2} \bar{I}(z) = \bar{Y} \bar{Z} \bar{I}(z) \quad (6)$$

식 (5)와 (6)의 해 중에서 $+z$ 방향으로 진행하는 전압파는 다음과 같이 표현된다.

$$\bar{V}(z) = V_0 e^{-j\beta z} \quad (7)$$

$$\bar{I}(z) = I_0 e^{-j\beta z} \quad (8)$$

식(7)와 (8)을 (5)와 (6)에 각각 대입하여 정리하면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$(\bar{Z} \bar{Y} + \beta^2) \cdot V_0 = 0 \quad (9)$$

$$(\bar{Y} \bar{Z} + \beta^2) \cdot I_0 = 0 \quad (10)$$

위의 두 식에서 해를 구하기 위하여 다음 식을 사용한다.

$$|\bar{Z} \bar{Y} + \beta^2| = 0 \quad \text{및} \quad |\bar{Y} \bar{Z} + \beta^2| = 0 \quad (11)$$

$$\text{즉, } |-\omega^2 \bar{L} \bar{C} + \beta^2| = 0 \quad \text{및} \quad |-\omega^2 \bar{C} \bar{L} + \beta^2| = 0 \quad (12)$$

여기서 균일하고 손실이 없는 전송선에서는 전자기파들의 진행은 순수한 TEM 형태이며, 모두 동일한 위상속도를 갖는다. 따라서 이 조건을 만족하기 위해서는 행렬연산 $L \cdot C$ 와 $C \cdot L$ 은 식(13)과 같은 하나의 고유치를 가지게 되며, 이때 L 과 C 행렬의 관계는 식(14)와 같다.

$$\beta = \omega \cdot \sqrt{\epsilon_r \epsilon_0 \mu_0} \quad (13)$$

$$L = \left(\frac{\beta}{\omega}\right)^2 \cdot C^{-1} \quad (14)$$

따라서 인덕턴스 행렬 또는 커패시턴스 행렬만으로 이 시스템을 모델링할 수 있다.

2.2 코일 모델

유도전동기의 고정자 코일의 기본 모델을 구성하기 위한 구조도는 그림1과 같다. 하나의 코일은 턴들로 구성되어있고, 대지 및 턴 간의 인덕턴스와 커패시턴스를 고려한다.

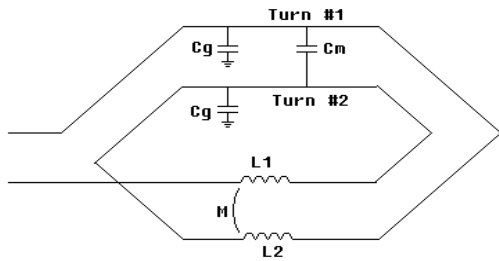


그림 1 회로 정수들을 포함한 코일 구조도
Fig.1 Coil schematic with circuit parameters

이 코일은 그림2와 같이 그 위치에 따라 5개의 영역으로 나누어진다. 즉, 코일이 슬롯 내에 존재하는 2와 4 부분, 그리고, 코일 오버행 부분인 1, 3, 그리고 5 부분이다. 코일의 각 영역 별 전압의 파동은 진행파 (Incident wave)와 반사파 (Reflection wave)로 구성되어지며, 그림3과 같이 오버행 부분과 슬롯부분을 반복해서 거치면서 진행한다.

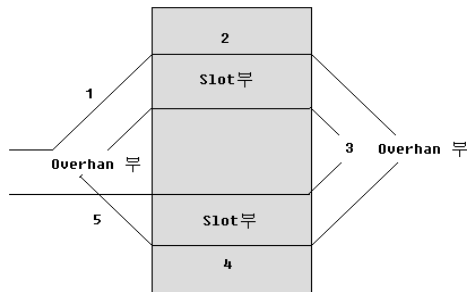


그림 2 코일의 5개 영역
Fig.2 Five sections at coils

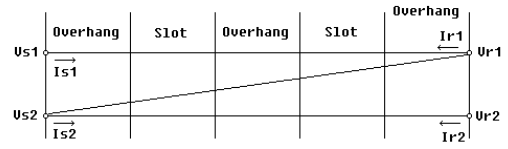


그림 3 턴수 2개인 단일 코일 모델
Fig.3 Single coil model with two turns

2.2.1 커패시턴스 계산

코일 커패시턴스는 턴 간 커패시턴스 C_t , 턴과 대지간의 커패시턴스 C_g 로 구성된다. 그림 4는 턴수가 4개인 경우에 코일의 단면도를 보인 것으로, 각 4개의 도체별 대지간의 커패시턴스와 턴간 커패시턴스를 슬롯부에서와 오버행부별로 분리하여 각각 구한다.

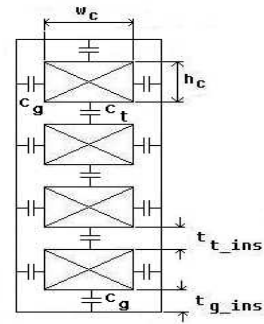


그림 4 코일 단면도(턴수:4개)
Fig.4 Cross section at coil (number of turns:4)

그림 4와 같이 슬롯내부에서의 각 도체와 대지 간의 커패시턴스는 각 코일과 전동기 코어 사이의 커패시턴스이며, 턴간 커패시턴스는 도체간 커패시턴스로 정의한다.

도체 #1의 대지 간 커패시턴스, C_{g1} 와 도체 #1과 #2 사이의 커패시턴스, C_t 는 다음 식과 같이 각각 표현된다.

$$C_{g1} = \epsilon_o \epsilon_r \left(\frac{2h_c + w_c}{d_{g.ins}} \right) \quad (15)$$

$$C_t = \epsilon_o \epsilon_r \left(\frac{w_c}{d_{t.ins}} \right) \quad (16)$$

다른 도체의 커패시턴스 값은 같은 방법으로 유도할 수 있으며, 4개 턴을 가지는 코일 슬롯내부에서의 커패시턴스 행렬은 다음과 같다.

$$c = \begin{pmatrix} c_{g1} + c_t & -c_t & 0 & 0 \\ -c_t & c_g + 2c_t & -c_t & 0 \\ 0 & -c_t & c_g + 2c_t & -c_t \\ 0 & 0 & -c_t & c_{g4} + c_t \end{pmatrix} \quad (17)$$

한편 코일 오버행 부에서의 대지 간 커패시턴스를 구할 때는, 주위의 코일들을 영전위를 갖는 것으로 가정하였다.

2.2.2 인덕턴스 계산

식 (14)에서 위에서 계산된 커패시턴스 값으로 인덕턴스를 계산 할 수 있다. 이때 전파속도 $v = \beta/\omega$ 이므로 인덕턴스를 다음 식과 같이 전파속도로 표현할 수 있다.

$$L = v^2 C^{-1} \quad (18)$$

슬롯부보다 코일 오버행부에서의 전파 속도가 빠른 것으로 알려져 있으나^[5], 여기서는 속도를 동일하다고 가정하여 인덕턴스 행렬을 구하였다.

3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 4개의 턴수를 가지는 코일에서 5개 영역 중 한개 영역에 대한 시뮬레이션 모델을 보인 것이다. 여기서 4개의 턴수를 가지는 코일이 총 3개로 구성된다.

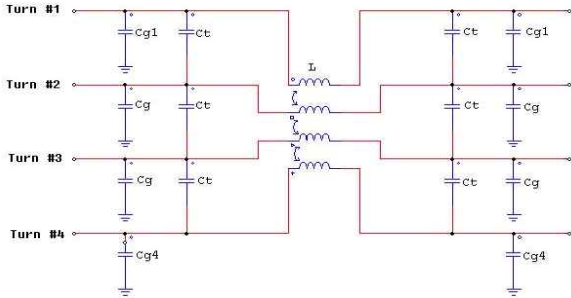


그림 5 4개의 턴을 가진 코일의 한 영역 모델
Fig.5 model of one section at coil with 4 turns

그림 6과 7에서는 코일 인가전압 상승시간을 1000V/0.5usec 하였을 경우 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 그림 6에서는 4개의 각 턴별로 인가되는 전압을 보인 것이고, 비교적 긴 상승시간으로 턴간 전압 불균형은 그리 크지 않은 것으로 나타났다. 그림 7은 3개 코일의 입력전압과 마지막 코일의 끝부분 전압을 보인 것이다. 전파속도로 인해 코일 전압의 지연이 발생하고, 첫 번째 코일에서의 전압 피크가 가장 크게 나타나지만 입력전압보다 거의 비슷함을 알 수 있다.

그림 8과 9는 코일 인가전압 변화율이 1000V/0.1usec로 5배 증가시켰을 경우 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 그림 8에서 보인 4개의 각 턴별로 인가되는 전압에서 상당히 큰 오버슈트 전압이 발생되었으며, 턴 별 전압 불균등이 커졌다. 그림 9에서 보인 코일 전압도 거의 유사한 현상이 나타났다.

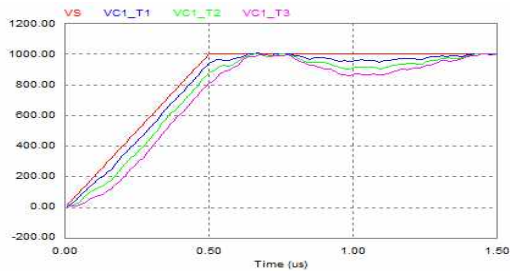


그림 6 각 턴 전압 (Tr=0.5 usec 경우)
Fig.6 Turn voltages at Tr=0.5 usec

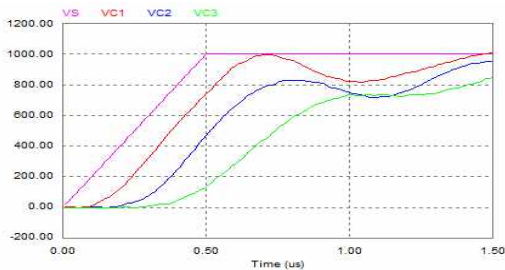


그림 7 코일의 전압 (Tr=0.5usec 경우)
Fig.7 Coil voltages at Tr=0.5usec

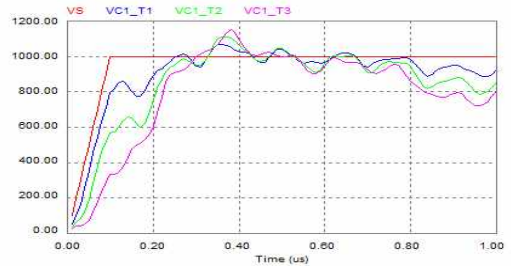


그림 8 각 턴 전압 (Tr=0.1usec인 경우)
Fig.8 Turn voltages at Tr=0.1 usec

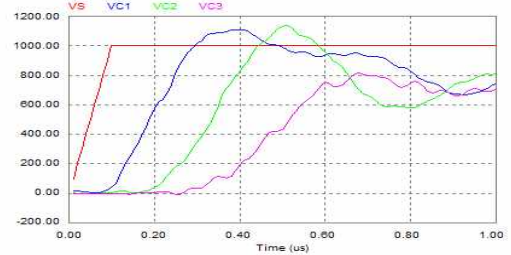


그림 9 코일의 전압 (Tr=0.1usec인 경우)
Fig.9 Coil voltages at Tr=0.1 usec

4. 결론

인버터로 구동되는 전동기의 코일 및 턴에서 전압 분포를 분석하기 위한 코일 모델을 제시하였다. 코일 모델은 5개의 영역으로 나누어 구성되었으며, 각 영역에서의 커패시턴스를 구하고, 전파속도와와의 관계식에서, 인덕턴스를 구하였다. 코일 입력 전압의 변화율이 증가함에 따라 첫 번째 코일에서의 전압 오버슈트 경향이 증가하고, 턴 간의 전압분포 불균형도 심화되는 현상을 보였다. 추후 연구에서는 반복되는 인버터 출력 전압 펄스와 필터, 케이블의 영향까지 고려한 연구를 진행하고자 한다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2005-7-067) 주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1]A.H.Bonnet, "Analysis of the Impact of Pulse Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on Ac Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No.2, pp.386-392, 1996.
- [2]M.T.Wright, S.J.Yang, K.Mcleay, "General theory of fast-front interturn voltage distribution in electrical machine windings", IEC Proc. Vol. 130, Pt.B. No.4. July 1983.
- [3]J.L.Guardado, K.J.Cornick, V.Venegas, J.L.Naredo, E.Melgoza, "A Three-phase Model for Surge Distribution Studies in Electrical Machines", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 12, No. 1, March 1997.
- [4]P.G.McLaren, H.Oraee, "Multiconductor Transmissin line Model for the line-end coil of Large AC machines", IEE Proc., Vol.132, Pt.B, No.3, pp.149-155, 1985.
- [5]B.K.Gupta, D.K.Sharma, D.C.Bacvarov, "Measured propagation of surges in the windings of a large ac motor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-1, No.1, pp.122-129, 1986.