

인버터 구동 유도전동기의 회전자 바에서의 동손 분포 해석

김병택*, 권병일*, 박승찬**

*한양대학교 대학원 전기공학과 **한양대 공학기술연구소

Analysis of the Copper Loss Distribution in the Rotor Bar of an Inverter-Fed Induction Motor

B. T. Kim*, B.I.Kwon, S.C. Park

*Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, **RIET

Abstract - The time harmonics of an inverter output voltage cause high frequency currents in the rotor bars of a squirrel cage induction motor, so that the harmonic copper loss density increases in the upper region of the bars. Such an higher loss density makes a nonuniform thermal source and deforms the bars due to the thermal stress. Therefore, in this paper, the copper loss distribution in the rotor bar of an inverter-fed induction motor, which is the source of the thermal stress, is analyzed by the time-stepping finite element method. As a result, the harmonic copper losses of 11 subregions in a bar are calculated and compared with those of sinusoidally fed induction motor.

또한 회전자 회로방정식은 자기 벡터포텐셜 A와 U_b/l_b 의 항으로 회전자의 각각의 회로에 대해 연립하여 다음 식과 같이 구할 수 있다[1].

$$\frac{1}{2R_e} [1 - \frac{R_{bc}}{R_e} [Y]]^{-1} [Y] U_b = [I_b] = -\frac{\partial}{\partial t} [G][A] + \frac{1}{R_b} [E][U_b] \quad (4)$$

여기서, [Y] : 결합행렬, [E] : 단위행렬, R_b : 해석영역 내의 bar 1개의 DC저항, R_{bc} : 해석영역 밖의 bar 부분의 DC저항, R_e : end-ring의 bar 사이를 연결하는 segment의 저항

식(2)~식(4)의 시간 미분항은 후퇴차분법을 적용하여 근사시켰다. 지배방정식의 해를 구하기 위해 유한요소법의 정식화 과정후, 고정자 및 회전자 회로방정식을 결합하면 식(5)와 같은 계 방정식을 만들 수 있다.

1. 서 론

인버터로 구동되는 유도전동기에서, 고정자 전압의 고조파에 의하여 공극자계가 시간 고조파를 함유하게 되고 이에 의하여 회전자 바에서는 고조파 전류가 증가하게 된다. 특히 고주파수의 회전자 전류는 표피효과(Skin Effect)로 인해 회전자 도체의 상단부에 집중적으로 흐르게 된다. 이와 같은 현상으로 인해 회전자의 온도는 설계 범위 이상의 고온이 될 수 있으며, 열응력에 의하여 회전자 바가 기계적 변형을 일으켜 심한 경우 파손까지 이를 수 있다.

따라서, 인버터 유도전동기의 안정적인 동작을 위해서는 적절한 수준의 회전자의 온도를 유지시켜야 하며, 이를 위해서는 회전자에 흐르는 전류의 정량적인 예측이 요구된다. 본 논문에서는, 인버터 출력전압 특성을 고려한 2차원 유한요소법을 이용하여, 고속전철용으로 설계된 농형 유도전동기의 회전자 도체에 흐르는 전류를 해석하고, 도체 내에 흐르는 전류의 불균일 분포와 손실특성을 제시하고 정현파 전압구동시의 특성과 비교 및 고찰한다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & [H] & -[C] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [Y] & [0] \\ \frac{[W]}{\Delta t} & [0] & \frac{[Z]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \frac{[T]}{\Delta t} & [0] & [0] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [0] & [0] \\ \frac{[W]}{\Delta t} & [0] & \frac{[Z]}{\Delta t} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I] \end{bmatrix}_t + \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [V] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (5)$$

2. 유한요소해석

2.1 정식화

특성해석방법은 전압원을 구동원으로 하는 시간차분 유한요소법을 이용하였으며, 3상 농형 유도전동기의 2차원해석을 위한 지배방정식은 식(2)와 같다[1][2].

$$\frac{1}{\mu} (\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2}) = -J_o + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{U_b}{l_b} \quad (2)$$

여기서, σ 는 바의 도전율, U_b 와 l_b 는 해석영역내의 회전자 바 양단에 걸리는 전위차와 회전자 바의 길이를 각각 나타낸다. 그리고 고정자의 각 상에 대하여 Kirichhoff의 전압법칙을 적용하면, 식(3)와 같은 고정자 회로방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\Psi] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [R] [I] = [V] \quad (3)$$

2.2 Bar 전류 및 손실계산

계방정식 (5)의 해를 구하면, 회전자 바 도체의 요소에 흐르는 전류 $I^{(e)}$ 를 식(6)과 같이 구할 수 있으며, 이로부터 회전자 바의 임의 요소에서 발생되는 동손 $W^{(e)}$ 는 식(7)에 의하여 구해진다.

$$I^{(e)} = -\int_{S^{(e)}} \sigma \frac{\partial A^{(e)}}{\partial t} - \frac{U_b}{l_b} dx dy = -\sigma \frac{d}{3dt} [\sum_{i=1}^3 A_i^{t+\Delta t} - \sum_{i=1}^3 A_i^t] + \frac{U_b}{\rho^{(e)} l_b} \quad (6)$$

여기서, $A^{(e)}$ 는 요소의 단면적, $\rho^{(e)}$ 는 요소에 있어서의 단위 길이당 저항을 나타낸다.

$$W^{(e)} = (I^{(e)} \times I^{(e)}) \rho^{(e)} l_b \quad (7)$$

3. 해석모델

해석모델은 고속전철용으로 설계된 1,100 kW 급의 3상 농형 유도전동기로서 형상 및 사양은 그림 1과 표 1에 나타내었다.

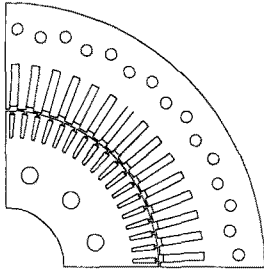


그림 1. 해석 모델

표 1 해석모델의 사양

극수	4	고정자 저항	0.0436(Ω)
공극길이	2.2(mm)	바 저항율(CuCr)	$2.16 \times 10^{-8}(\Omega\text{m})$
적층길이	430(mm)	회전자 바 높이	30 (mm)

회전자 바에서의 고조파 동손분포를 구하기 위하여, 회전자 바의 영역을 그림 2와 같이 바의 깊이에 따라서 11개의 소영역으로 나누었다.

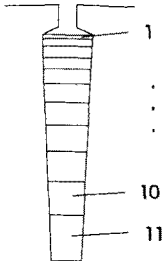


그림 3. 회전자 바에서의 영역분할

4. 해석결과

해석 조건은 60Hz의 일정 주파수에서 DC link 전압 2,800 (V)를 갖는 6-step 인버터 구동(기본파 전압은 2,184 V)의 경우이며, 회전자의 회전속도는 식 (8)과 같은 운동방정식에 의하여 결정된다. 이때, 전동기의 부하 토크는 6,700 [Nm] 로 하였다.

$$T_e = J \frac{d\omega_m}{dt} + T_L \quad (8)$$

여기서, T_e 는 발생토크, J 는 회전계의 관성 모멘트, ω_m 는 회전각속도, T_L 은 부하토크를 나타낸다.

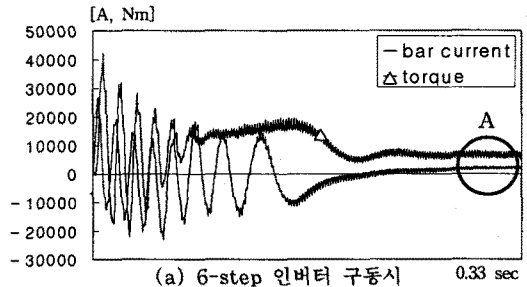
본 논문에서는 6-step 인버터 구동시의 동손분포를 정현파 전압 구동시와 상대 비교를 위하여, 인버터 및 정현파 전압구동 모두에 대하여 시물레이션하였다.

그림 4는 토크와 회전자 바의 전류 파형을 나타낸 것이다. 초기의 과도적 파형은 60Hz에서 정격전압으로 직입 기동하였기 때문이며, 이때의 회전속도는 식 (8)의 운동방정식에 의하여 결정되어 회전자 바 전류의 주파수는 점차로 감소하면서 정상상태에 도달하게 됨을 알 수 있다.

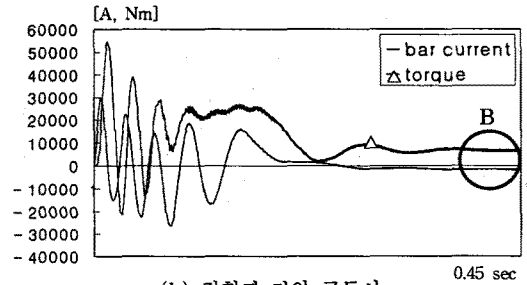
6-step 인버터의 경우, 토크 및 바전류의 리플이 정현파 구동시보다 증가하게 되고 정상상태에 있어서 6고조파의 토크 리플이 주로 발생된다.

그림 5는 그림 4의 A 및 B 부분에서의 상전류 파형이며, 파형의 미소한 변화는 속도 리플에 의한 영향으로 생각된다. 그림 6은 전원주파수에 대하여 1/2 주기 동안 회전자 바 1개에서 발생하는 전류와 동손의 순시치 파형이다. 6-step 인버터의 경우는 6고조파 성분이 지배적이며, 정현파 구동의 경우는 슬롯의 영향으로 인하여 작은 크기의 고조파 손실이 나타난다. 이것은 인버터 출력 전압의 시간 고조파에 의하여 회전자 바에 고조파 전류가 증가하기 때문이다.

그림 7 (a)는 6-step 인버터 구동시 그림 2에서 이미 정의한 회전자바의 1, 4, 7, 11 번째 소영역에서 각각 발생하는 동손을 나타낸 것이다. 회전자 바의 상단부에서는 표피효과로 인하여 고주파수 성분의 동손이 발생하며, 하단부로 갈수록 저주파수 성분을 함유하게 됨을 알 수 있다. 또한, 6-step 인버터의 특성에 의하여 바의 전영역에서 6고조파 성분의 손실이 지배적이다. 이것은 공극자계의 5차 및 7차의 시간 고조파에 의한 영향으로 볼 수 있다. 그림 7 (b)의 정현파 구동시의 동손 계산 결과와 비교하여 보면, 인버터의 출력전압의 시간 고조파의 영향에 의하여 바의 깊이에 상관없이 동손 밀도가 증가하게 됨을 알 수 있다. 이것은 결국, 바의 온도상승을 크게 야기시켜, 열응력에 의한 기계적 변형을 유발할 수 있다. 반면, 그림 7 (b)의 정현파 구동시의 동손은 슬롯에 의한 공간 고조파의 영향만이 존재하게 된다.



(a) 6-step 인버터 구동시



(b) 정현파 전압 구동시

그림 4. 회전자 바 전류 및 토크 특성

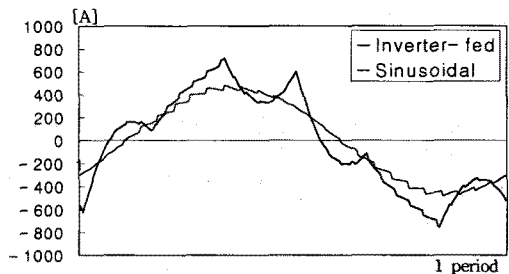
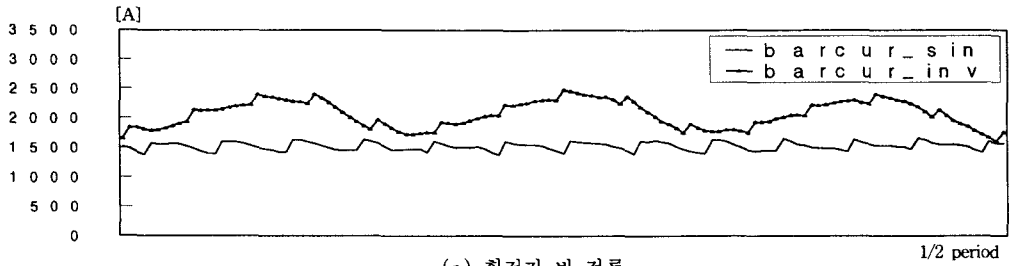
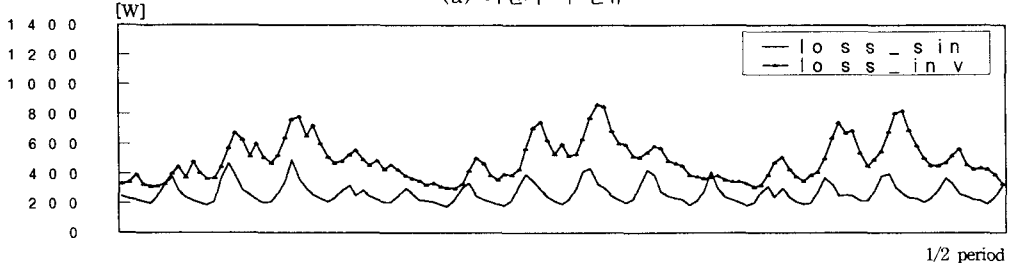


그림 5. 상전류 특성

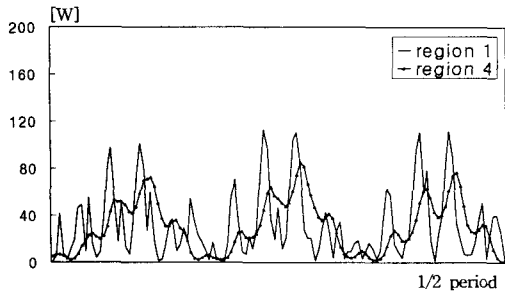


(a) 회전자 바 전류

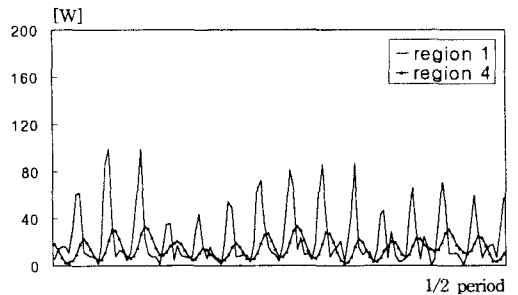


(b) 회전자 바 동손

그림 6. 회전자 바 1개에서의 전류 및 동손 특성



(a) 6-step 인버터 구동시



(b) 정현파 전압 구동시

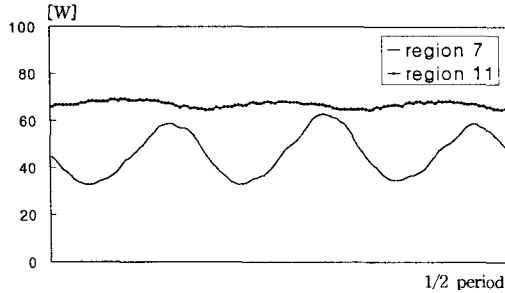
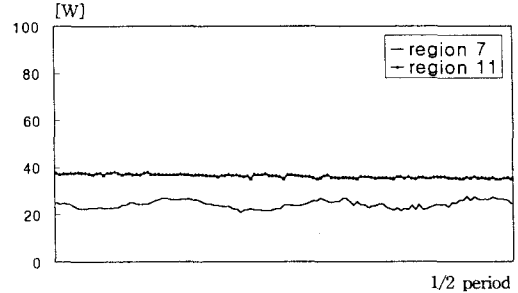


그림 7. 회전자 바의 영역별 손실



5. 결 론

본 논문에서는 6-step 인버터로 구동되는 3상 농형 유도전동기의 회전자 바에서 열원과 열용력원으로 작용하는 동손 분포를 인버터 출력전압 특성을 고려한 시간차분 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 해석결과, 공극 자계의 공간고조파 영향에 의하여 발생하는 회전자 바의 고조파 동손은 바의 상단부를 제외하고는 그 크기가 미약하였으나, 인버터 구동시에는 공극자계의 시간 고조파에 의하여 바의 깊이 전체에 걸쳐 6차의 고조파 동손 성분이 지배적이었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Akkio, "Analysis of induction motors based on numerical solution of the magnetic field and circuit equations", Helsinki, Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series, No.59, 1987.
- [2] 김병택, 박승용, 권병일, 박승찬, 이기호, 김근용, 윤종학, "고속전철용 견인 유도전동기의 회전자 슬롯변화에 따른 특성고찰", 대한전기학회 논문지, 제 47권 10호, pp.1605~1610, 1998.