

유한요소해석을 통한 회전자 도체 형상 변화에 따른 농형 유도전동기의 토크 특성 해석

이강혁, 박일한
성균관대학교 정보통신공학부

Torque-Speed Analysis of Squirrel Cage Induction Motor with Varying Shape of Rotor Bar Using Finite Element Analysis

Kang-Hyouk Lee, and Il-Han Park
Sungkyungwan University

Abstract - 본 논문에서는 농형 유도전동기의 회전자 도체 형상을 변화시켜 토크 특성을 살펴본다. 회전자의 변화에 의한 영향만을 고려하기 위해 고정자를 간단히 모델링 하고 전압일정조건을 인가했으며 그에 해당하는 토크 식을 유도했다. 회전자 도체는 가장 기본적인 Canned 형상으로부터 시작하여 복잡한 슬롯 형상까지 도입하여 해석하였다. 해석된 결과들을 이용해 각 도체 형상에 의한 자계 분포와 함께 고찰한다.

1. 서 론

세계적으로 전기에너지의 40%가 유도전동기 구동에 사용된다. 또한 최근 회도류의 공급이 어려워 어느 때보다 영구자석을 사용하는 전동기의 역할을 대체할 수 있는 유도전동기에 대한 필요성과 관심이 많아지고 있다. 이 시점에서 전자장을 기반으로 하여 기본부터 유도전동기에 대한 연구를 수행하는 것은 매우 시의적절하다.

본 논문에서는 유한요소법을 통해 농형 유도전동기의 자계를 해석하여 토크 특성을 살펴본다. 먼저 회전자 도체 형상의 변화에 집중하기 위해 고정자를 간단하게 모델링한다. 이 고정자에는 전압원이 인가되어 전압일정 조건을 만족시키고 이상적인 자계 분포를 만들며, 토크 식은 에너지 보존 법칙을 이용하여 간단한 고정자 모델에 적용될 수 있도록 유도된다. 널리 알려진 슬롯들이 시험 모델로서 해석 방법의 타당성을 입증하고, 회전자 도체를 가장 단순한 형태인 Canned 형상으로부터 복잡한 슬롯 형상까지 도입하여 해석하고 그 결과들을 서로 비교해본다.

2. 본 론

2.1 시간조화 자계 유한요소해석

2차원 자계 유한요소해석에서 해석 시스템의 모든 물리량이 정현적으로 변한다면 복소수 근사법을 통해 지배 방정식을 표현할 수 있다.

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 A + j\omega\sigma A = J \quad (1)$$

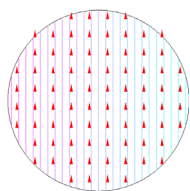
여기서, A는 복소 자기벡터포텐셜, μ 는 투자율, σ 는 도전율, 그리고 J는 전류 밀도이다[1].

2.1.1 고정자 모델링

회전자 도체 변화에 따른 특성 변화에 집중하기 위해 고정자를 간단하게 모델링한다. 고정자 철심과 슬롯을 제거하고 경계에 자기 벡터 포텐셜 조건을 인가한다.

$$A(x, y, z; t) = A_0 \cos(\omega_s t - \frac{p}{2}\theta) = \text{Re}[\tilde{A}_z e^{j\omega_s t}] \quad (2)$$

여기서, p는 극수, ω_s 는 전압원의 각주파수이다. 이와 같이 인가된 경계 조건은 고정자에 정현적으로 권선을 감은 효과를 내고 전압 일정 조건을 충족한다. 고정자 반경은 10cm, 축 방향 길이는 1m로 고정한다. 그림 1은 고정자 모델이 발생시킨 회전자계를 보여준다.



<그림 1> 이상적 고정자에 의한 자계 분포 (2극)

2.1.2 토크 계산

위와 같이 모델링된 고정자에 의해 입력된 전력은 다음과 같다.

$$P_{in} = \text{Re}[-j\omega_s \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} J_s A^* r d\theta] \quad (3)$$

여기서, J_s 는 고정자 경계에서의 면전류밀도이고, r은 고정자 반경이다. 선적분은 고정자 경계를 따라 계산된다. 고정자 입력이 발생시키는 회전자계와 회전자 각속도의 차이에 의해 회전자 도체를 기준으로 자계는 시간에 따라 변하게 되고, 전계를 유도하여 회전자 도체에 와전류를 발생시킨다. 이 와전류에 의한 회전자 도체에서의 손실은 다음과 같다.

$$P_{loss-rotor} = \frac{\sigma s^2 \omega_s^2}{2} \int_{rotor} AA^* d\Omega \quad (4)$$

여기서, σ 는 회전자 도체의 도전율, s는 슬립을 나타낸다. 면적분은 회전자 도체 면적으로 계산한다. 간단하게 모델링된 고정자에 의한 입력 전력에서 회전자의 와전류손을 빼면 전부 기계적 출력이 된다.

$$P_{mech} = P_{in} - P_{loss-rotor} \quad (5)$$

식 (5)를 기계적 출력과 토크의 관계식에 대입하여 토크를 계산한다.

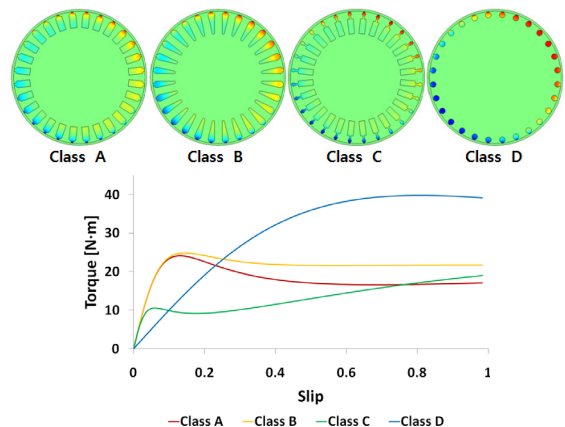
$$T = \frac{P_{mech}}{\omega_m} = \frac{P_{in} - P_{loss-rotor}}{(1-s)\omega_s} \quad (6)$$

여기서, ω_m 은 회전자의 각속도이다[2].

2.2 수치 해석 모델

2.2.1 시험 모델

위에서 간단히 모델링된 고정자와 유도된 토크 식을 검증하기 위해 NEMA에서 제안한 슬롯 형상을 도입하여 해석한다. 회전자의 슬롯 수는 28개이고 공극은 0.3cm이다. 슬롯은 가능한 비슷한 면적을 가지게 설계하였고, 재질은 알루미늄($\sigma = 3.774 \times 10^7 [S/m]$)이다. 그림 2는 검증 모델의 와전류 분포와 토크-슬립 곡선을 보여준다.



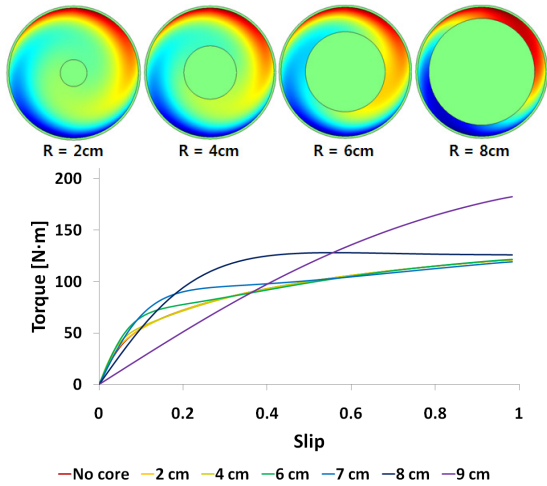
<그림 2> 검증 모델의 와전류 분포(s=1)와 토크-슬립 곡선

해석 결과는 NEMA에서 제안한 회전자 모델의 토크 특성과 유사하다.

2.2.2 회전자 도체의 형상과 재질 변화에 따른 토크 특성 관찰

이제부터 앞에서 검증된 고정자 모델과 토크 식을 이용하여 회전자 도체 형상을 변화시키며 토크 특성을 살펴본다. 해석 모델들의 도체 재질은 알루미늄, 공극은 0.3cm로 고정하고 전압조건도 일정하게 둔다.

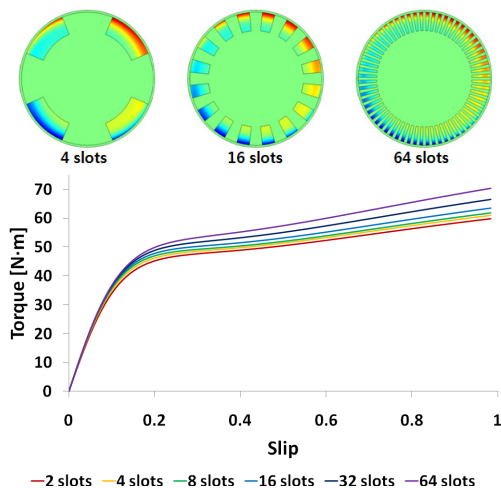
먼저, Canned 형상의 도체를 회전자에 적용한다. 원통형의 회전자 철심의 반경을 늘려가며 해석하였다. 그림 3은 Canned 회전자 철심 반경 변화에 따른 와전류 분포와 토크-슬립 곡선을 보여준다.



〈그림 3〉 Canned rotor의 와전류 분포(s=0.3)와 토크-슬립 곡선

회전자 철심의 반경이 상대적으로 작을 때보다 클 때, 와전류가 더 넓은 범위에서 더 높은 밀도로 분포함을 알 수 있다. 이는 고정자로부터 발생된 자계가 회전자 도체를 지나 안쪽까지 침투했을 때, 철심이 자계의 경로를 제공하여 안쪽에서도 도체에 많은 와전류를 유도할 수 있기 때문이다. 물론 표피 효과에 따라 자계가 침투할 수 있는 깊이가 제한되므로 철심의 크기가 적절하지 않으면 이런 효과를 볼 수 없다. 그 결과로 철심 반경이 2cm일 때와 4cm일 때의 와전류 분포가 비슷하고 토크 특성 또한 비슷하지만, 6cm가 넘어 가면 와전류 분포와 토크 특성이 크게 변한다. 간단한 형상이지만 토크 특성의 변화는 매우 다양하다.

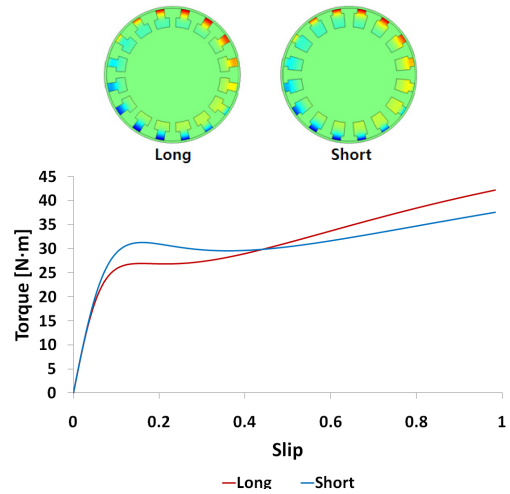
다음은 회전자에 여러 형상을 적용한다. 슬롯 사이의 철심과 슬롯의 형상이 같은 간단한 슬롯 형상이 먼저 해석된다. 슬롯이 많아지더라도 도체의 면적은 같게 설계되었다. 그림 4는 간단한 슬롯 형상이 적용된 모델의 슬롯 수에 따른 와전류 분포와 토크-슬립 곡선을 보여준다.



〈그림 4〉 슬롯 수에 따른 와전류 분포(s=1)와 토크-슬립 곡선

슬롯 수가 많아질수록 슬롯 사이의 철심으로 통과하는 자계가 도체의 더 넓은 면적에 영향을 주면서 와전류를 유도하므로 토크가 커진다.

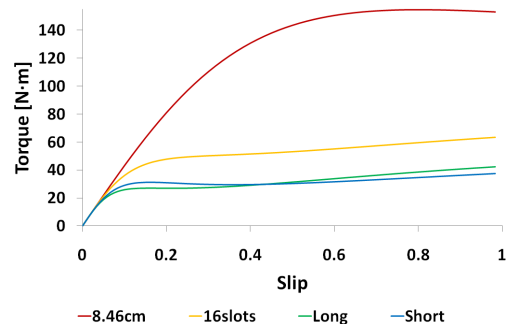
마지막으로 회전자 슬롯의 입구를 좁게 하고, 입구의 길이를 변화시키며 해석해본다. 각 모델의 슬롯 수와 도체 면적은 그림 4의 16slot 모델과 같게 설계 되었다. 그림 5는 이 모델들의 와전류 분포와 토크-슬립 곡선을 보여준다.



〈그림 5〉 슬롯 형상에 따른 와전류 분포(s=1)와 토크-슬립 곡선

슬립이 작을 때, 자계는 도체에 잘 침투할 수 있고 철심의 안쪽까지 깊게 들어갈 수 있으므로 입구 길이가 짧고 안쪽이 두꺼운 모델의 토크가 크다. 그러나 슬립이 클 때는 자계가 도체에 잘 침투할 수 없고 그로 인해 철심의 안쪽까지도 깊게 들어갈 수 없으므로 입구의 길이가 긴 모델에 와전류가 더 많이 유도되고 토크가 상대적으로 커지게 된다.

지금까지 여러 회전자 도체 형상의 와전류 분포와 자계의 침투 등을 통해 토크 특성에 대한 설명을 하였다. 그림 6은 위의 해석 결과 중 도체의 면적이 일정한 모델들의 토크-슬립 곡선을 나타낸다.



〈그림 6〉 일정한 도체 면적에서 슬롯 형태에 따른 토크-슬립 곡선

위의 결과들은 같은 면적에서 Canned 형상의 회전자 도체를 가진 모델이 가장 우수한 토크 특성을 가짐을 보여준다. 본 논문의 해석 결과는 간단한 고정자로 인해, 1차 동손을 무시한 것이다. 그러나 1차 동손이 미치는 영향의 한계를 고려했을 때에도, Canned 형상의 모델이 보여준 우수한 결과는 충분히 논의될 가치가 있다.

3. 결 론

본 논문은 유도전동기의 회전자 도체 형상을 변화시킨 모델들을 해석하여 토크 특성을 비교했다. 모델들의 해석 결과는 와전류 분포와 자계의 침투를 고려해서 설명됐다. 그 결과 Canned 형상의 회전자 도체를 갖는 모델이 갖는 토크 특성의 우수성을 알 수 있었다. 이는 기존의 등가회로 기반의 해석 방법만으로는 설명하기 쉽지 않다. 그러므로 본 연구를 발전시켜 유도전동기를 더욱 정확하게 해석할 수 있는 방법에 대한 연구가 지속되어야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Il-han Park, Myung-jun Choi and Se-hee Lee, "High-order Frequency Sensitivity for Nonsinusoidal Steady State Analysis in Linear Magnetodynamics," IEEE trans. Magn., vol. 34, no.5, pp. 2555-2558, 1998
 [2] G. R. Slemon, "Electric Machines", Addison-Wesley publishing company, 1982