인버터 구동형 유도전동기의 동특성 해석

구대현*, 김경호**, 이병삼**, 한진우**, 조윤현**
한국전기연구원*, 동아대학교 전기공학과**

Dynamic Characteristics Analysis of Induction Motor by Using Inverter

Dae-Hyun Koo*, Kyung-Ho Kim**, Boung-Sam Lee**, Jin-Woo Han**, Yun-Hyun Cho**
*KERI, **Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University.

Abstract - Induction Motor fed by PWM inverter generates the sound and the vibration because of harmonic current and magnetic force characteristics.
This paper is investigated the harmonic frequency and noise characteristics of the current and the torque of the induction motor when the input voltage is excited as the sine wave or PWM wave. The performance characteristics of induction motor is analyzed by the F.E.M and the theoretical method.

1. 서 론

최근 유도전동기는 대용량화와 고속화, 소형 경량화, 고효율화가 강력히 요구되고 있다. 소형 경량화를 하기 위해서는 회전자 코아의 고자속 밀도 설계와 고주파 여자에 의한 고속 회전 구동이 행하여 지고 있다. 이에 반하여 높은 자속밀도와 고조파에 의한 회전기 코아의 철손 증가가 문제가 되고 있다. 또한, 저손실, 고발열에 의한 온도상승이 문제가 됨으로 가능한 고효율화를 위하여 저손실화와 함께 저권선 손실 및 고자속밀도화에 의한 권선의 저 전류밀도가 필요하게 된다. 이상과 같이 유도전동기의 고효율화, 고성능화하기 위해서는 코아의 저손실, 고밀도화가 중요시된다.
본 논문에서는 고속 터보기기 유도전동기는 인버터로 구동함으로서 고조파 전원과 자기적 특성에 의해 기인된 진동, 소음의 발생 원인인 전자기력 불평형 특성과 전자력의 고조파를 해석하였다.

2. 유도전동기의 특성 모델링

유도전동기는 크기, 무게, 회전자 관성, 최대 속도 발생 능력, 효율 및 비용면에서 직류기에 비하여 우수한 특성을 가지고 있다. 이러한 유도전동기의 제어를 위하여 벡터 제어 이론 등이 쓰이고 있으며, 입력 전원과 주파수는 제어 방법에 의해 결정된다. 본 연구에서는 3상 유도전동기의 특성 해석을 하기 유도전동기의 등가모델을 모델링하였다.
3상 유도전동기의 정지 좌표계의 고정자 전압 방정식은 아래 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$V^s_{abcs} = R_s i^s_{abcs} + \frac{d}{dt}\Psi^s_{abcs} \qquad (1)$$

V^s_{abcs} , i^s_{abcs} , Ψ^s_{abcs} 는 각각 순시 전압, 전류, 쇄교자속 벡터이고 R_s는 상전압 벡터이다.
식 (1)을 3상 정지축의 값을 정지 dq축 값으로 변환하는 벡터는 아래 식 (2)와 같다.

$$K = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta-120^\circ) & \cos(\theta+120^\circ) \\ \sin\theta & \sin(\theta-120^\circ) & \sin(\theta+120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

$$V^s_{qds} = KV^s_{abcs}$$

식 (1)에 식 (2)을 대입하여 정리하면 아래와 같은 정지 d^s-q^s 축상 의 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} V^s_{qds} &= KR_sK^{-1}i^s_{qds} + K\frac{d}{dt}(K^{-1}\Psi^s_{qds}) \\ &= R_s i^s_{qds} + K\left(\frac{d}{dt}K^{-1}\right)\Psi^s_{qds} + KK^{-1}\frac{d}{dt}\Psi^s_{qds} \\ &= R_s i^s_{qds} + \frac{d}{dt}\Psi^s_{qds} \quad \left(\frac{d}{dt}(K^{-1})=0\right) \end{aligned} \qquad (3)$$

정지 d^s-q^s 축 상의 식(3)을 동기 회전 d^e-q^e축 상의 식으로 변환하여 동기 좌표계 상의 유도전동기 모델을 구한다. 정지 좌표계를 동기 좌표계로 변환하는 벡터는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} S &= \begin{bmatrix} \cos\omega_e t & -\sin\omega_e t \\ \sin\omega_e t & \cos\omega_e t \end{bmatrix} \\ V^s_{qds} &= SV^s_{qds} \end{aligned} \qquad (4)$$

단, ω_e는 동기각속도이다.

식(4)를 이용하여 정지 d^s-q^s축 상의 식(3)을 동기 회전 d^e-q^e축의 상의 전압 방정식으로 변환하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} V^s_{qds} &= SR_sS^{-1}i^e_{qds} + S\frac{d}{dt}(S^{-1}\Psi^e_{qds}) \\ &= R_s i^e_{qds} + SS^{-1}\frac{d}{dt}\Psi^e_{qds} + S\left(\frac{d}{dt}S^{-1}\right)\Psi^e_{qds} \\ &= R_s i^s_{qds} + \frac{d}{dt}\Psi^e_{qds} + \omega_e\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}\Psi^e_{qds} \end{aligned} \qquad (5)$$

식(5)에서 V^e_{qs}와 V^e_{ds}을 분리하면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} v^e_{qs} &= R_s i^s_{qs} + \frac{d}{dt}\Psi^e_{qs} + \omega_e\Psi^e_{ds} \\ v^e_{qs} &= R_s i^s_{ds} + \frac{d}{dt}\Psi^e_{ds} - \omega_e\Psi^e_{qs} \end{aligned} \qquad (6)$$

이하 아래에서는 동기 좌표계 상의 값에는 위 첨자 e를 생략하고 정지 좌표계에 대해서만 위 첨자 s를 사용한다.

회전자 전압 방정식은 아래와 같이 유도할 수 있다. 우선 회전자가 정지하고 있다면 회전자의 전압 방정식은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} v_{qr} &= R_s i^s_{qr} + \frac{d}{dt}\Psi_{qr} + \omega_e \Psi_{dr} \\ v_{dr} &= R_s i^s_{dr} + \frac{d}{dt}\Psi^e_{dr} - \omega_e \Psi_{qr} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 회전자가 ω_r의 속도로 회전하고 있다면 회전자 축상의 $d-q$축은 동기 회전 좌표계에 대해 $\omega_e - \omega_r$의 상대속도로 움직인다. 그러므로 동기 좌표계 상의 회전자 전압 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} v_{qr} &= R_s i^s_{qr} + \frac{d}{dt}\Psi_{qr} + (\omega_e - \omega_r)\Psi_{dr} \\ v_{dr} &= R_s i^s_{dr} + \frac{d}{dt}\Psi^e_{dr} - (\omega_e - \omega_r)\Psi_{qr} \end{aligned} \quad (8)$$

3. 유한요소법에 의한 자기적 특성 해석

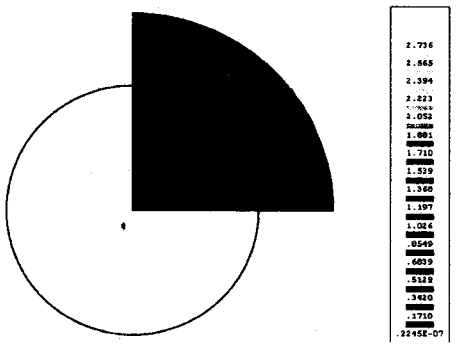
본 논문에서는 3,600[rpm] 유도 전동기의 해석 기술을 확립하기 위해서 설계치수와 실험 가능한 1KW급 소형 유도전동기에 대하여 기술을 확립하기로 하였다. 유도전동기의 해석 모델 및 사양은 표1과 같다.

표1. 유도전동기의 사양

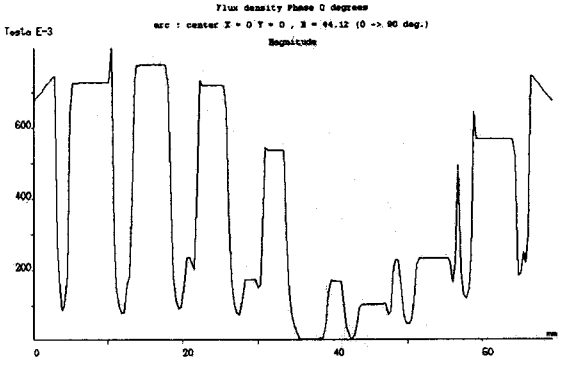
항목	단위
정격용량	1[KW]
정격전압	3상 220[V]
주파수	60[Hz]
극 수	4극
정격 동기속도	3,600[rpm]

설계된 1KW 유도전동기에 대하여 전원주파수 60(Hz), 의 정형파 전압과 PWM전압을 인가했을 때에 유한 요소법으로 자속분포 특성 및 성능 특성을 해석하였다.

그림 1은 슬립 0.05일 때의 특성을 나타내었다. 그림 1 (a)는 모터의 자속밀도를 나타내었다. 그림 1(b)는 공극에서의 자속밀도 선도를 나타냈었다. 공극 자속 밀도의 최대치는 0.65[T]이며, 치 부분의 최대 자속밀도는 1.7[T]정도를 나타남을 알 수 있다.



a)자속 분포 특성



b)공극내의 자속밀도

그림 1. 1[HP]유도전동기의 자속밀도 분포(S=0.05)

그림 2는 유한 요소법에 의해 해석한 속도 변화에 따른 토크 및 전류곡선을 나타낸 것이다. 그림 2에서 최대 토크는 8[N.m]이고, 기동전류는 7.8[A]을 얻었다.

그림 3은 속도변화에 대한 전력 및 효율곡선을 나타내었다.

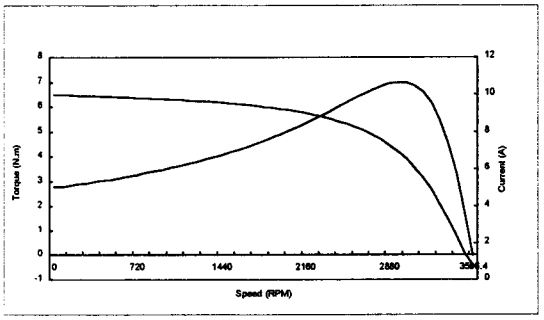


그림 2. 속도변화에 대한 토크 및 전류곡선

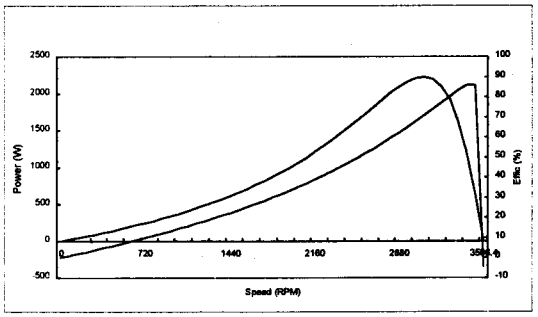
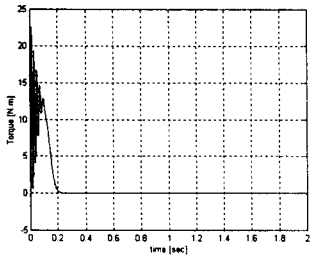


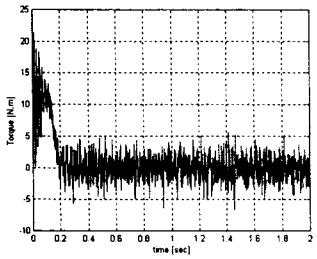
그림 3. 속도변화에 대한 전력 및 효율곡선

4. 유도전동기의 동특성 시뮬레이션

그림 4는 시간-토크 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4(a)는 60Hz 정현파 전압 인가시 0.2초 후에 정상상태에 도달하며, 그림 4(b)의 60Hz PWM 전원을 인가시도 마찬가지로 0.2초에 정상상태에 도달하며, -3~3[N.m]의 토크리플이 발생함을 알 수 있다.

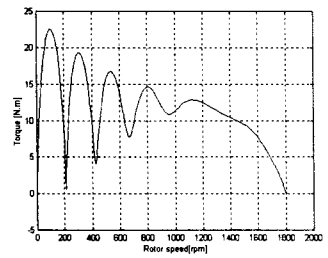


(a)60Hz 정현파

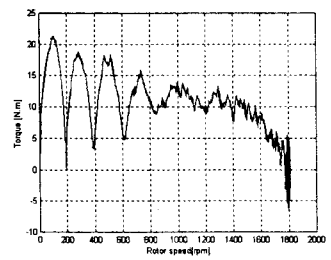


(b) 60Hz PWM파
그림 4. 시간-토크곡선

그림 5는 그림 4의 시간 함수를 속도 함수로 표현 성분 특성 곡선을 나타낸다. 그림 5는 속도-토크 곡선이다.

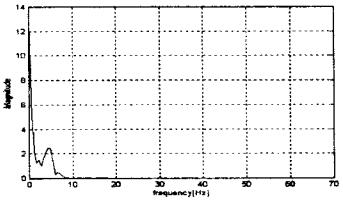


(a) 60Hz 정현파

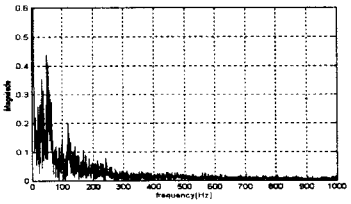


(b) 60Hz PWM파
그림 5.속도-토크곡선

그림 6은 출력토크에 대한 주파수 해석한 것이다. 그림 6에서 PWM 전압을 인가한 경우 토오크 리플이 크게 발생함을 알 수 있으며, 또한 주파수가 클수록 토오크 리플이 현전히 작음을 알 수 있다. 따라서, 시간 고조파에 대한 특성 분석과 공간 고조파에 특성 분석을 유한요소법에 의한 특성해석 기법을 확립하였다.



(a)60Hz 정현파



(b) 60Hz PWM파
그림 6. 출력토크에 대한 고주파수 해석

5. 결 론

인버터 구동 유도전동기의 경우, 발생되는 PWM전압으로 고조파 전류 및 전자력이 발생한다. 이 영향으로 진동과 소음이 발생된다. 본 논문에서는 전자력을 이용한 이론적인 해석방법과 유한 요소법에 의한 고조파 해석 기법을 확립하였다.

유도전동기의 설계 검증을 하기 위해 고조파에 의한 특성을 유한 요소법으로 해석하였고, 유도 전동기의 등가회로 정수산정을 통한 이론적인 방법을 병행하며 좋을 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] Golden R. Slemon, "Electric Machines and Drives; Addision-Wesley Publishing Company,1992

[2] Syed A. Nasar. Electric Machines and Electromechanics, McGraw-Hill,1997

[3] P. C Krause, Analysis of Electric Machinery, McGraw-Hill,1995