

유도기동성 영구자석 전동기의 기동 특성 해석

조동혁, 김도완, 한문규, 오시덕
 효성 중공업 연구소 기전팀

Transient Characteristic Analysis of Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor Using Magnetic Equivalent Circuit Method

Dong-Hyeok Cho, Do-Wan Kim, Moon-Kyu Han, and Si-Doek Oh
 R&D Institute, Industrial Performance Group, Hyosung Co.

Abstract - 고성능 영구자석의 보급이 활발해지면서 기존 유도 전동기와 같이 상용전원에서 구동이 가능하고 동기전동기의 특성을 갖는 고효율 유도기동성 영구자석 전동기에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 유도기동성 영구자석 전동기는 회전자에 알루미늄 바와 영구자석이 설치되어 유도기의 원리로 기동이 되며 정상 속도에서는 동기 전동기의 특성을 갖게 된다. 이때 동기속도로 인입되는가의 여부를 판별하기 위한 기동 특성 해석은 매우 중요하다. 이러한 유도 기동성 영구자석 전동기의 기동시 특성을 해석하기 위해서는 종래의 유도 전동기의 과도 특성 해석 방법에 영구자석에 의한 영향을 고려해야 한다. 본 논문에서는 등가회로 해석 방법을 이용하여 유도 기동성 영구자석 전동기의 기동시의 특성을 살펴보고자 한다.

의 동기전동기의 해석과 동일하다가 할 수 있으나 기동 특성을 해석하기 위해서는 기존의 유도 전동기의 과도 특성에 영구자석이 미치는 영향을 함께 고려해야 한다.

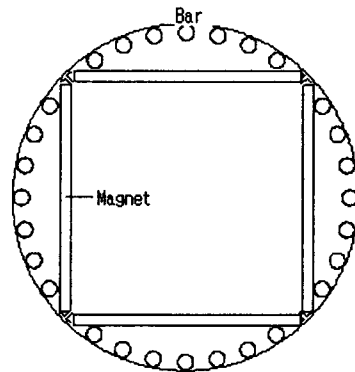


그림 1. 유도성 기동 영구자석 전동기의 회전자 구조

1. 서 론

종래부터 산업용 전동기에는 유도 전동기가 많이 사용되어 왔다. 이것은 유도전동기가 가격이 저렴하고 상용전원 구동이 가능할 뿐만 아니라 인버터를 이용할 경우에도 단순한 V/f 제어로 운전을 할 수 있다는 장점을 가지고 있기 때문이다.

이를 위해 본 논문에서는 먼저 유도전동기의 과도 상태 해석에 대해 기술하고 영구자석에 의한 유기전력을 해석하여 이를 유도전동기 해석식과 접목함으로써 유도기동성 영구자석 전동기의 기동시부터 정상 상태에 이르기까지의 과정을 해석하고자 한다.

그런데 전동기 시장에서 에너지 절약에 관한 요구가 급속히 증가하면서 기존의 유도 전동기를 고효율화하기 위한 연구가 많이 진행되었으나 근본적으로 유도 전동기는 여자전류와 회전자 동손이 존재하기 때문에 원리상 고효율화에는 한계가 있다. 영구자석 동기 전동기는 이와 달리 회전자 동손이 없고 여자 전류가 필요하지 않다는 장점이 있지만 별도의 기동 장치가 필요하고 영구자석 가격이 고가인 이유로 지금까지는 서보모터와 같이 정밀제어를 요구하는 특수 용도로 많이 사용되어 왔다.

2. 유도성 기동 영구자석 전동기 과도 특성 해석

2.1 유도 전동기의 과도 상태 해석

최근들어 고성능 영구자석의 보급이 활발해지고 가격이 저렴해지면서 기존의 유도 전동기와 같이 상용전원 구동이 가능하고 전용드라이브가 아닌 범용 인버터로 V/f 제어 운전을 할 수 있는 전동기인 유도 기동성 영구자석 전동기에 대한 연구가 활발해지고 있다. 유도 기동성 영구자석 동기 전동기의 고정자는 종래의 유도전동기의 고정자와 동일하며 회전자는 그림 1과 같이 유도 전동기와 영구자석 동기 전동기와의 혼합 구조로서, 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있고 회전자 외주면을 따라 알루미늄 다이캐스팅된 슬롯이 배치되어 있다. 정상운전에서는 영구자석 동기전동기로서 운전하기 때문에 기존의 고효율 유도기에 비해 발생 손실을 40%정도 줄일 수 있어서 더 높은 효율을 갖게 되며 정상 속도가 아닌 영역에서는 유도전동기가 뎀퍼 역할을 하게 되므로 부하 및 전압의 변동에 대해 안정적인 운전이 가능하다. 이러한 특성을 갖는 유도성 기동 영구자석 동기전동기의 해석은 동기화가 이루어진 정상상태의 해석과 동기화되기까지의 기동특성 해석으로 나눌 수 있다. 정상상태에서의 해석은 회전자가 동기속도로 회전하기 때문에 기존

본 절에서는 유도전동기의 과도상태를 해석하기 위해 등가회로 방정식을 사용하는 방법을 기술한다. 회로방정식에서 고정자와 회전자의 결합(coupling)을 제거하기 위한 방법으로 d-q축 변환을 사용하였다.

먼저 해석을 위한 유도기는 일정한 공극 길이 g를 가진 두 개의 중심이 같은 실린더로 가정하며 고정자의 표면은 정현적으로 분포된 3상 권선을 가진다고 가정한다. 슬롯의 효과와 고조파 누설 자속은 무시한다. 고정자와 회전자의 투자율은 무한대로 가정하고 자속의 포화나 철손, 엔드 권선 등은 무시한다.

먼저 권선 x와 y사이의 각이 α라고 가정하면 둘 사이의 상호 인덕턴스는 다음과 같이 나타낸다.

$$L_{xy} = \mu_0 N_x N_y \frac{rl}{g} \frac{\pi}{4} \cos \alpha \quad (1)$$

이 때, L_{am} 은 상호 인덕턴스를 나타내고 N_x 는 턴수, g는 공극 길이를 나타낸다. 각 물리량들은 복소 공간 벡터(complex space vector)로 정의하면 고정자와 회전자의 회로방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 v_{abcs} &= r_s i_{abcs} + (L_{ls} + L_m) di_{abcs} + L_m b(i'_{abcr} e^{j\theta_r}) \\
 v'_{abcr} &= r'_r i'_{abcr} + (L'_{lr} + L_m) di'_{abcr} + L_m b(i_{abcs} e^{-j\theta_r})
 \end{aligned} \quad (2)$$

μ_r : 자석의 비투자율
 Φ_l : 누설자속
 N_s : 상당 권회수
 k_w : 권선계수

이제 위의 회로방정식을 d축과 q축의 변수를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$v_{qds} = r_s i_{qds} + (L_{ls} + L_m) di_{qds} + L_m di'_{qdr} + j\omega [(L_{ls} + L_m) i_{qds} + L_m i'_{qdr}] \quad (3)$$

$$v'_{qdr} = r'_r i'_{qdr} + (L'_{lr} + L_m) di'_{qdr} + L_m di_{qds} + j(\omega - \omega_r) [(L'_{lr} + L_m) i'_{qdr} + L_m i_{qds}] \quad (4)$$

이제 유도된 d-q축에 대한 방정식을 이용하여 power 및 토크를 계산하는 문제가 남아 있다. 전력은 다음 식과 같이 정의된다.

$$P_e = \frac{3}{2} \text{Re} [v_{qds} i_{qds}^* + v'_{qdr} i'_{qdr}^*] \quad (5)$$

위 식을 계산해서 정리하면 기계적인 출력인 토크식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{\omega} L_m \text{Im} \{ i_{qds} i_{qdr}^* \} \quad (6)$$

윗 식을 이용하여 전기적인 토크 입력을 구한 다음 이를 기계적인 출력과 속도 변화의 항으로 나타낸 다음의 기계방정식을 결합하여 시간에 대해서 반복적으로 풀게 된다. 그 결과 각 시간에서의 토크와 전류와 속도를 구할 수 있다.

$$T_e = J \frac{2}{p} \frac{d\omega_r}{dt} + B_m \omega_r + T_{mech} \quad (7)$$

2.2 영구자석전동기의 역기전력 해석

유도성 기동 영구자석 동기전동기는 그림 1에 보인 바와 같이 회전자철심 내부에 영구자석이 매입되어 있어 자기회로적으로 복잡한 형상을 가지고 있다. 본 논문에서는 등가자기회로를 이용하여 해석한 전동기의 특성치를 유한요소해석을 통해 보정하여 사용한다. 공극자속밀도는 이상적인 가정으로 구형파를 가지고 등가자기회로법에 의한 해석에 의해 다음과 같이 근사적으로 나타낸다.

$$B_g = \frac{B_r w_m l_r - \Phi_l}{\mu_r k_c g w_m l_r / l_m + 2\alpha r_s l_r / p} \quad (8)$$

고정자 상당 유기기전력 E_{ph} 는 권선의 쇄교자속의 시간에 대한 변화율로서 전동기 설계변수를 이용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{ph} = \frac{4\sqrt{2}}{\pi p} k_w N_s r_s l_r B_g \sin \alpha \omega_s \quad (9)$$

여기서,

B_r : 자석의 잔류자속밀도
 g : 공극 길이
 k_c : 카터 계수
 l_m : 자석의 두께
 l_r : 고정자 축방향 길이
 p : 극쌍수
 r_s : 고정자 내경
 w_m : 자석의 폭
 2α : 극호각

2.3 영구자석을 고려한 과도상태 해석

2.3.1 유도성 기동 영구자석 전동기의 전압방정식
 식 (9)에서 구한 영구자석에 의한 유기기전력은 정상상태로 회전할 때의 회전자의 q축에 나타나는 전압이므로 식 (2)의 유도전동기의 회로방정식과 결합하기 위해서는 회전자 속도와 위상각을 고려해야 한다. 이때 회전자의 속도를 ω_r 이라 하고 고정자 q축과 회전자 자석의 q축과의 위상각을 δ 라고 하면 고정자 기준 프레임에서 바라본 유기기전력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 E_{qs} &= (1-s) E_{ph} \cos \delta \\
 E_{ds} &= (1-s) E_{ph} \sin \delta
 \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, $s = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s}$.

$$\delta = \int_0^t (\omega_s - \omega_r) dt + \theta_0$$

θ_0 = 고정자 q축과 회전자 q축간의 최초 위상각

식 (10)에서 구한 유기기전력을 식 (2)의 고정자 전압방정식의 우변항에 더해주면 유도 전동기의 과도 전압방정식에 회전자 영구자석에 의한 유기기전력을 고려할 수 있게 된다.

2.3.2 영구자석에 의한 토크

회전자의 매입형 영구자석은 과도상태에서 역기전력을 발생시킬 뿐만 아니라 자석 토크를 발생시킨다. 이때 발생하는 토크는 자석토크와 릴럭턴스 토크의 합으로 나타내게 된다.

$$T_{magnet} = \frac{3(1-s)(E_{ph} i_{qmr} + (X_{dm} - X_{qm}) i_{dmr} i_{qmr})}{\omega_r}$$

여기서, $i_{qmr} = i_{qs} \cos \delta + i_{ds} \sin \delta$

$$i_{dmr} = i_{qs} \sin \delta + i_{ds} \cos \delta$$

자석 및 릴럭턴스에 의한 토크 T_{magnet} 은 식 (7)의 좌변항에 더해진다.

3. 결 과

이상과 같은 유도성 기동 영구자석 전동기의 기동 특성 해석 알고리즘을 3.7kW급 전동기에 적용하였다. 해석 대상 전동기의 주요 파라미터와 해석시의 타임스텝은 표 1과 같다.

표 1. 해석대상 전동기의 주요 파라미터

고정자 슬롯수	36
극 수	4
정격 토크 [Nm]	19.6
선간 인가 전압 [V]	220
인가 전압의 주파수 [Hz]	60
고정자 스택 길이 [mm]	120
회전자 바 개수	32
코일당 턴수	8
정상상태 역기전력 [V]	183
Time Step [msec]	0.167

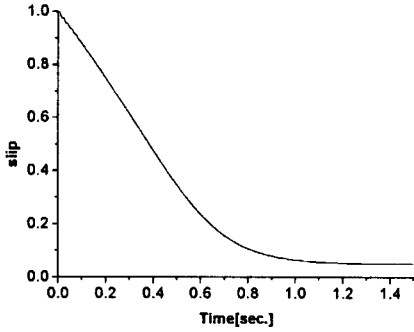


그림 2. 유도 전동기의 과도상태 슬립 곡선

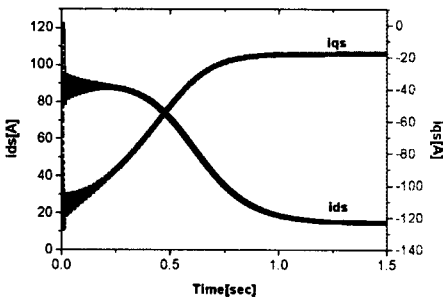


그림 3. 유도 전동기의 과도상태 d-q 축 전류

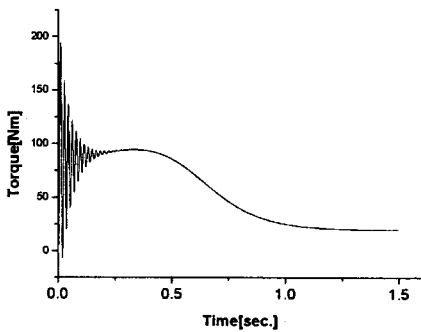


그림 4. 유도 전동기의 과도상태 토크

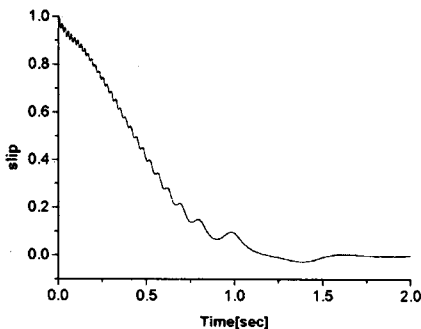


그림 5. 유도 기동 영구자석 전동기의 과도상태 슬립

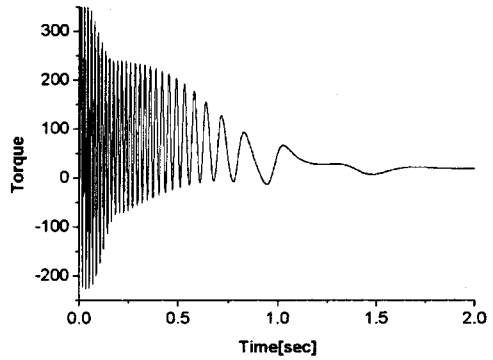


그림 6. 유도 기동 영구자석 전동기의 과도상태 토크

그림 2, 3, 4는 영구자석이 없을 경우에 유도기만의 특성을 보여준다. 1.5초 후에 정격슬립인 5%에 도달하는 것을 볼 수 있다.

그림 5와 6은 유도성 기동 영구자석 전동기의 슬립과 토크를 나타낸 것이다. 그림 5, 6에서 약 2초 후에 정상상태 속도에 진입하는 것을 볼 수 있다.

그림 2와 5를 비교해보면 그림 2에서는 슬립이 매끄럽게 감소하는 것을 볼 수 있으나 그림 5의 유도 기동성 영구자석 모터의 경우에는 영구자석 토크의 영향으로 슬립이 진동하는 것을 볼 수 있다. 또한 기동 직후의 토크가 영구자석 위치에 따라서 크게 가변하는 것을 그림 6을 통해 확인할 수 있다.

4. 결 론

유도기동성 영구자석 전동기는 회전자에 알루미늄 바와 영구자석이 설치되어 유도기의 원리로 기동이 되며 정상 속도에서는 동기 전동기의 특성을 갖게 되므로 상용전원에서 구동이 가능하고 정격시에 높은 효율을 가지게 되는 잇점이 있다. 이때 동기속도로 진입되기까지의 과정을 해석하는 기동 특성 해석은 매우 중요하다. 이러한 유도 기동성 영구자석 전동기의 기동시 특성을 해석하기 위해서 본 논문에서는 등가회로 해석 방법에 기초하여 과도상태시에 영구자석에 의해 발생하는 유기 기전력과 토크를 고려하여 유도 기동성 영구자석 전동기의 기동시의 특성을 살펴보았다. 본 논문에서 사용한 방법은 유도전동기의 특성해석에 있어서 회전자 자료의 변화를 고려하지 못한 단점은 있으나 이는 향후에 보완할 예정이며 기동 특성 해석에 있어서 전체적인 방향을 제시했다는 데 의의가 있다고 하겠다.

[논문 후기]

본 논문은 에너지 관리공단에서 지원하는 "3.7 kw급 유도성 기동 영구자석 매입형 동기전동기 개발" 과제의 일부로 수행되었습니다.

[참고 문헌]

- [1] 조동혁, "Auto-Tuning 니칭 유전 알고리즘을 이용한 매입형 영구자석 전동기의 설계", 서울대학교 박사학위논문, pp. 18-22, 2001
- [2] 김도완 "대형 유도 전동기의 등가정수 추출 및 과도 특성 해석", 서울대학교 박사학위 논문, pp. 76-77, 2001
- [3] T.J.E. Miller, "Synchronization of Line-Start Permanent Magnet AC Motors", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 103, No. 7, 1984
- [4] M.A. Rahman, "Synchronization Process of Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motors", Electric Machines and Power Systems, 25, pp.577-592, 1997