

질량 불평형을 고려한 직접구동 슬롯리스형 동기전동기의 토크 및 속도특성

안호진, 강규홍, 홍정표, 김규탁, 박정우*
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원*

Torque and Speed Characteristics of a Direct-Drive Slotless Synchronous Motor considering Mass Eccentricity.

Ho-Jin Ahn, Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jung-Woo Park*
 Department of Electric Engineering, Changwon National University,
 Korea Electrotechnology Research Institute(KERI)*

Abstract - In slotless synchronous motor for precise position and speed control, eccentricity of rotor mass cause torque ripple, speed ripple and harmonics of back emf. This paper deals with magnetic field and characteristic analysis for ring type slotless synchronous motor by using analytical method. And then, speed and back emf harmonics are analysed.

1. 서론

반도체 제조장비나 컴퓨터 단축촬영장치(CT)와 같은 정밀위치 및 속도제어를 필요로 하는 시스템에서는 기어나 벨트와 같은 기계적인 동력전달장치를 제거한 직접구동(direct drive) 방식의 전동기 수요가 증가하고 있다. 특히 영구자석을 계자원으로 하는 동기전동기는 입력전원에 동기화되어 운전되므로 속도 및 토크리플을 최소화할 수 있어 직접구동 방식의 전동기로 적합하다[1][2].

치-슬롯 구조의 고정자를 가지는 영구자석 동기전동기의 경우 직접구동 방식 전동기의 속도 및 위치제어 특성을 저하하는 코깅토크가 존재한다. 따라서 단위체적당 출력밀도가 감소하는 반면, 제어특성의 향상을 위하여 슬롯리스형 영구자석 동기전동기가 적용되고 있다[1][2]. 그러나 슬롯리스의 경우 슬롯고조파에 의한 토크리플은 제거할 수 있으나 회전자에 질량 불평형이 발생하는 경우, 일정한 입력을 인가하더라도 토크 및 속도리플이 발생한다. 특히 직접구동용 전동기의 경우 전동기의 직경 및 중량이 증가하므로 회전자의 질량 불평형에 의한 속도변동 특성은 매우 증가하게 되고, 이에 따른 속도 기전력의 고조파 성분이 발생하여 토크 및 출력의 변동을 야기한다.

따라서 본 논문에서는 해석적인 방법(analytical method)으로부터 슬롯리스형 영구자석 동기전동기의 자체해석을 수행하였으며 회전자 질량 불평형에 따른 속도 및 토크특성을 자체해석의 결과와 결합하여 속도리플 및 속도기전력의 고조파특성을 분석하여 직접구동형 전동기의 속도 및 출력특성을 분석하였다.

2. 해석적인 방법에 의한 자체 해석

해석적인 방법으로 자체해석을 위하여 영구자석에 의한 자계와 전기자 전류에 의한 자계를 각각 계산한 후에 중첩시킴으로써 공극자계분포를 구하였다[2][3]. 공극 영역(Ⅰ)과 영구자석 영역(Ⅱ)에서 영구자석에 의한 자기스칼라퍼텐셜 ϕ 를 계변수로 하는 지배방정식은 다음과 같다[2][3].

$$\nabla^2 \phi_I(r, \theta) = 0 \tag{1}$$

$$\nabla^2 \phi_{II}(r, \theta) = \frac{M_r}{r\mu_r} \tag{2}$$

여기서 M_r 은 영구자석의 자화, μ_r 은 영구자석의 리

코일 투자율을 나타낸다.

한편, 해석모델 및 제원을 그림 1과 표 1에 나타내었다. 그림 1은 해석모델 중 8극 부분만 나타낸 것이다.

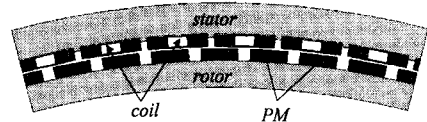


그림 1. 해석 모델

표 1. 해석모델의 제원

항목	수치	항목	수치
회전자 외반경	686.5[mm]	기계적 공극	2.5[mm]
고정자 내반경	689.0[mm]	coil 높이	7.0[mm]
적층 폭	80.0[mm]	coil 한 변의폭	22.5[mm]
극쌍수	50	잔류자속밀도	0.4[T]

해석적인 방법으로부터 영구자석에 의한 공극자속밀도와 전기자 전류에 의한 공극자속밀도 특성을 그림 2에 나타내었다. 해석결과 슬롯리스형 영구자석 동기전동기에서는 영구자석에 의한 자속밀도가 공극자속밀도에 지배적임을 알 수 있다. 공극자속밀도 특성으로부터 각 권선의 쇄교자속과 토크특성을 해석하였다.

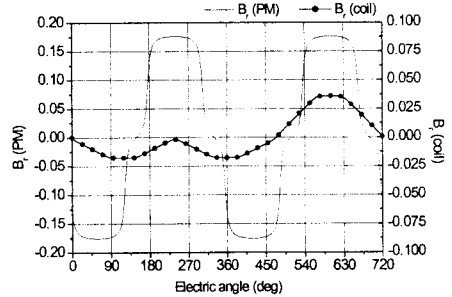


그림 2. 공극자속밀도 특성

3 질량 불평형에 의한 특성

3.1 속도 특성

컴퓨터 단축촬영장치(CT)용 영구자석 동기전동기의 시작기를 그림 3에 나타내었다. 영상장치를 회전자에 탑재하여 감속기에 의한 속도조절 없이 직접구동형으로 구성하였다.

직접구동형 전동기의 회전자 직경이 매우 큰 경우 회전자에 탑재한 장치의 편심부하가 발생하면 입력토크가 일정하더라도 편심부하는 중력에 의해 y축을 기준으로 기계각으로 0에서 π 까지 (+)토크를 발생시키고 π 에

서 2π 까지는 (-)토크를 발생시켜 1회전을 주기로 하는 토크 및 속도 리플이 생긴다. 직접구동형 전동기의 편심 부하에 의한 모델링을 그림 4에 나타내었다.

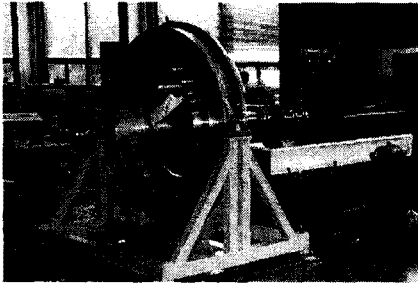


그림 3. CT 구동용 전동기

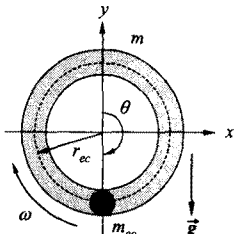


그림 4. 직접구동형 전동기의 회전자 편심부하

$$T_{in} + T_L = T_f + J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (3)$$

$$T_L = r_{ec} m_{ec} g \sin \theta \quad (4)$$

식(3)은 토크방정식을 나타낸 것이고 식(4)는 편심부하에 의한 부하토크를 나타낸 것이다. 여기서, T_{in} 은 입력 토크, T_f 는 마찰에 의한 부하토크, J 는 관성질량모멘트, ω 는 각속도, B 는 점성감쇄계수, θ 는 y 축과 편심부하와의 각도를 나타낸다. 또한 r_{ec} 는 회전축과 편심부하의 거리, m_{ec} 는 편심부하의 질량을 나타낸다.

편심부하에 의해 발생하는 토크리플은 결국 회전자의 속

표 2. 질량불평형 해석조건

항목	수치	항목	수치
정격토크	240[Nm]	회전자 질량	800[kg]
정격속도	60[rpm]	편심부하 질량	18[kg]
정격전류(rms)	5.5[A]	마찰부하토크	160[Nm]
회전자 외반경	686.5[mm]	점성감쇄계수	0.0426 [Nm · s/rad]

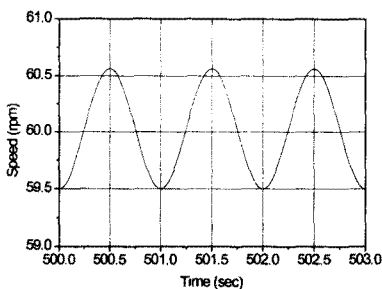


그림 5. 해석모델의 회전속도 리플 (정상상태) 도리플을 발생시킨다. 즉 역기전력의 고조파 성분을 발생

시켜 출력리플 및 기계적진동 등의 악영향을 미치게 된다. 그림 5는 해석모델이 기동 후 정상상태에 도달했을 때 편심 부하에 의한 속도리플을 식(3)의 미분방정식을 풀어 서 나타낸 것이다. 해석모델의 평균 회전속도는 60[rpm]이며 속도리플은 평균 회전속도의 1.8[%] 정도 된다. 편심 부하에 의한 속도리플의 주기는 기계적으로 1회전 이고, 정상상태 평균 회전속도가 60[rpm]이므로 속도리 플의 주기는 그림 5와 같이 1초가 된다.

3.2 역기전력 특성

영구자석 동기전동기의 출력은 역기전력과 전기자 전 류의 곱으로 나타난다. 전기자 전류가 일정하다도 역 기전력은 속도리플에 의해 크기와 주기가 달라지며, 따 라서 출력에도 리플이 발생하게 되어 진동, 소음, 정밀도 저하 등의 문제를 일으킨다.

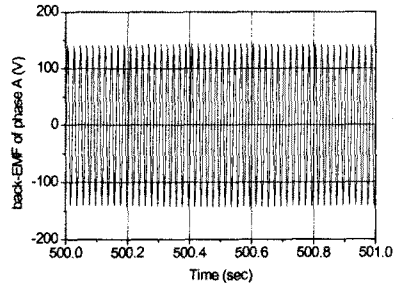


그림 6. A상 역기전력

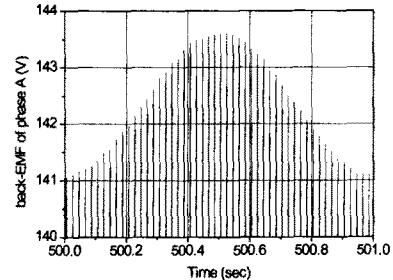


그림 7. A상 역기전력 (y축 rescale)

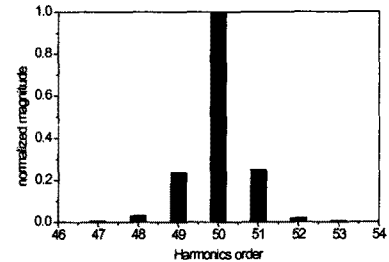


그림 8. 역기전력의 고조파 분석

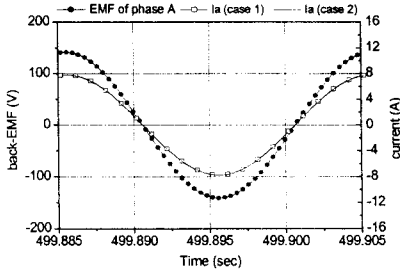
역기전력은 그림 6과 같이 크기는 회전속도에 비해하 며 주기는 회전속도에 반비례한다. 해석모델의 극수는 100극이므로 그림 6과 같이 60[rpm]일 때 1초동안 1회전 하여 50주기의 역기전력이 유기된다. 그림 7은 그림 6의 y 축 범위를 달리하여 나타낸 것으로써 그림 5의 속도 리플이 역기전력에 미치는 영향을 알 수 있다.

그림 8은 속도리플 주기를 기준으로 역기전력의 고조 파를 분석한 것이다. 속도리플은 1회전이 주기이며, 해석 모델은 100극이므로 1회전당 50주기의 역기전력이 유기 된다. 따라서 1회전을 주기로 역기전력의 고조파를 분석 하면 그림에서 보는 바와 같이 50차 고조파가 가장 크 게 나타난다. 50차 고조파는 역기전력의 기본파가 된다.

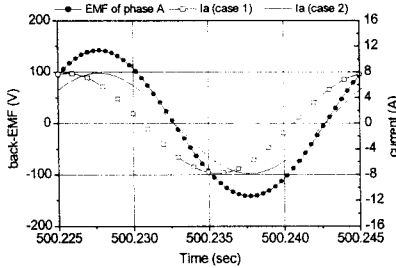
3.3 출력 특성

기계적인 1회전당 역기전력의 주기 및 크기가 변화하는 경우 전류에 의한 토크 및 출력특성을 다음과 같이 두 가지 경우를 비교 분석하였다.

- case 1 : 전류 주파수를 50[Hz]로 일정하게 유지.
- case 2 : 전류 주파수와 역기전력의 주파수가 동일.



(a) case 1 전류와 역기전력 주기 일치



(b) case 1 전류와 역기전력 위상 불일치

그림 9. A상 역기전력 및 전기자 전류

그림 9는 case 1과 case 2에서 한 상의 역기전력 및 전기자 전류를 나타낸 것이다. case 1 및 case 2 모두 속도리플에 의해 역기전력의 주기는 달라지게 되나, case 1의 경우는 전기자 전류의 주기가 항상 일정하므로 어느 정도 시간이 지나면 그림 9(b)와 같이 역기전력과 전기자 전류에 위상차가 나는 경우가 발생하며 이때 출력은 (-)값이 된다. 반면에 case 2의 경우는 전기자 전류의 주기가 역기전력의 주기와 같으므로 출력은 항상 (+) 값을 가지게 된다.

그림 10과 그림 11은 각 case에서 한 상에 의한 출력을 나타낸 것이다. case 1에서는 역기전력과 전기자 전류의 위상차에 의해 출력이 (-)가 되는 구간이 생긴다. case 2에서는 전기자 전류가 일정하고 역기전력이 속도에 비례하므로 이들의 곱으로 표현되는 출력은 속도리플과 같은 형태로 나타나게 된다.

그림 12는 각 case에서 3상에 의한 출력을 모두 더한 것이다. case 2에서는 3상 권선에 의한 출력이 거의 일정한 형태로 나오나 속도리플과 같은 형태의 리플이 존재한다. 이것은 역기전력이 회전속도에 비례하고 전기자 전류는 일정하기 때문이다. case 1은 역기전력과 전기자 전류에 위상차가 발생하여 한 상의 출력이 (-)값이 되는 구간이 발생하므로 3상의 출력을 모두 더했을 때 case 2보다 출력리플이 더욱 심하게 발생되며 case 2의 평균 출력은 case 1보다 작아지게 된다.

4. 결 론

본 논문에서는 직접구동형 영구자석 동기전동기의 자체 해석 결과로부터 회전자의 질량 불평형에 의한 토크 및 속도리플과 역기전력 고조파 성분을 분석하였다.

입력토크가 일정하더라도 회전자의 질량 불평형은 중

력에 의해 1회전을 주기로 하는 토크리플 및 속도리플이 발생하며 이에 의한 역기전력의 리플이 발생한다. 따라서, 본 논문에서는 직접구동형 전동기의 회전자 질량 불평형으로부터 속도 리플이 발생하는 경우 속도 및 출력 특성을 분석하였다. 전류의 위상을 역기전력의 위상과 일치하도록 운전하더라도 전류값이 일정할 경우 출력리플이 발생하게 된다. 그러므로 직접 구동형 전동기에서 정밀 속도제어를 구현하기 위해서는 전자기적인 설계뿐만 아니라 기계적인 속도 및 토크 변화를 고려해야 함을 알 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Kais Atallah, Zi Qiang Zhu, David Howe and Terry S. Birch, "Armature Reaction Field and Winding Inductances of Slotless Permanent-Magnet Brushless Machines", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, Sept. 1998, p3737- 3744.
- [2] 강규홍, 홍정표, 김규탁, 박정우, "직접 구동 슬롯리스형 영구자석 동기전동기의 설계", 대한전기학회 논문지, 49권, 12호, Dec. 2000, p789-796.
- [3] Ungtae Kim and Dennis K. Lieu, "Magnetic Field Calculation in Permanent Magnet Motors with Rotor Eccentricity : Without Slotting Effect", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG. 34, No. 4, 1993, p14-21.

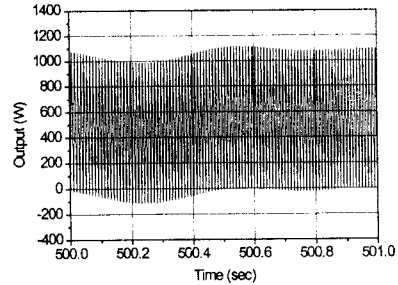


그림 10. A상에 의한 출력 (case 1)

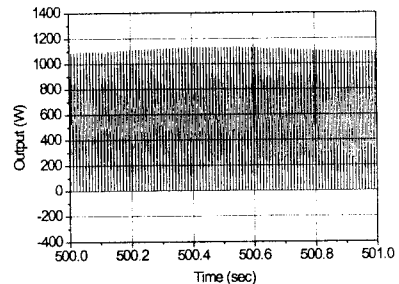


그림 11. A상에 의한 출력 (case 2)

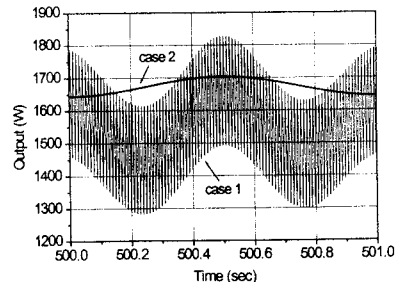


그림 12. case 1과 case 2의 출력 비교