

권선계자형 동기전동기의 토크리플 저감을 위한 회전자의 스큐와 비대칭 설계 모델의 비교 분석

이상현, 신영철, 유석현, 김기찬
국립 한밭대*

Comparative Analysis of Skew and Asymmetric Design of The Rotor for Torque Ripple Reduction of Wound Field Synchronous Motor

Sang-Hyeon Lee, Young-Chul Shin, Seok-Hyun Yu, Ki-Chan Kim
Hanbat National University*

Abstract - 본 논문은 권선계자형 동기전동기(WFSM : Wound Field Synchronous Motor)의 토크리플을 저감시키기 위한 설계 기법을 제시하고자 한다. 돌극형 회전자의 극판(Pole Plate)을 좌우 비대칭으로 축방향 길이를 반으로 나누어 2가지 모델에 대한 합성 파형을 분석한다. 기존의 연구된 스큐 기법과 비슷하게 합성 파형에 의해서 토크리플이 저감된다. 그리고 비대칭 기법과 스큐 기법을 비교하는 형식으로 운전 영역 내에서의 몇 가지 운전 점에서 특성을 비교 분석하였다.

그림 1은 권선계자형 동기전동기 기본 모델을 2D로 디자인한 형상과 기본 사양을 표로 나타내었다. 이 전동기는 48slot, 8극으로 출력이 9.4kW인 중형 전동기이다. 정격 운전 지점은 2,600rpm이고, 최대 속도는 5,000rpm이다. 모델의 특성을 분석하기 위해서 설정한 운전 속도 지점은 일정 토크 영역(Constant Torque Region)의 1,500rpm과 2,600rpm 2지점과 약계자 영역(Field Weakening Region)의 3,000rpm, 4,000rpm, 5,000rpm 3지점으로 총 5가지 운전 지점을 해석 하였다. 각 운전 지점에서의 전기자전류와 계자전류는 고정된 값을 유지하면서 d축, q축 전류의 위상각 제어를 이용해서 순시 운전을 해석하였다.

1. 서 론

WFSM은 동기전동기 중의 하나로서 회전자에 자석이 매입된 형태가 아닌 독립된 직류 전원에 연결된 계자 권선(Field Winding)이 감겨있는 동기전동기이다 [1]. 그리고 WFSM은 희토류(Rare Earth Resources) 자석을 사용하지 않아서 페라이트(Ferrite) 자석이 매입된 전동기처럼 비희토류 전동기라고 부르며, 값싼 희토류 자석을 사용하지 않는다는 장점을 가지고 있다. 또한 동기전동기의 특징인 약 계자 제어를 통해서 전기자(Armature)쪽의 d축 전류를 이용해서 계자 자속 량을 줄여서 고속운전을 할 수 있지만, 이는 전류를 더 사용하기 때문에 동손이 증가한다는 단점을 가지고 있다. 하지만 권선계자 동기전동기는 계자 쪽에 권선에 독립적인 직류 전원이 들어오기 때문에 계자전류를 이용해서 자속량을 조절할 수 있다. 따라서 매입자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)보다 가격뿐만 아니라 동손을 저감하여 효율을 높일 수 있는 장점이 있고, 회전자의 형상만 보더라도 원형으로 설계된 매입자석 동기전동기 보다는 돌극(Salient Pole) 구조로 설계된 권선계자 동기전동기가 무게를 줄일 수 있는 장점이 있다.

본 논문에서는 설계 측면에서 토크리플(Torque Ripple)을 저감시키기 위한 설계 연구를 진행하였다 [2]. 권선계자형 동기전동기를 기본 모델로 선정하고 이 모델의 회전자 형상을 비대칭(Asymmetry)과 스큐(Skew) 기법을 이용해서 두 가지 모델을 설계 하였다 [3]. 토크리플은 전동기의 진동과 소음을 유발시키고, 부하에 직접적인 영향을 미치기 때문에 제대로 된 설계가 되지 않으면 정밀한 제어가 어렵게 된다. 따라서 토크리플 저감을 주제로 하는 연구가 활발히 진행 중에 있으며, 본 논문에서 제시된 설계 기법 외에도 회전자나 고정자를 설계하는 여러 가지 기법들이 있다. 해석 방법으로는 유한요소해석법(FEM : Finite Elements Method)을 이용하여 해석하였고, 기본 모델과 설계한 두 모델의 토크리플, 토크와 선간전압을 데이터를 비교 분석하였다.

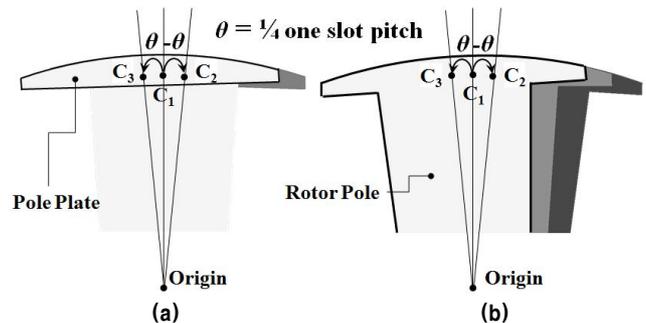
<표 1> WFSM 기본 모델의 토크, 토크 리플과 선간전압 데이터

Speed (rpm)	1,500	2,600	3,000	4,000	5,000
Torque (Nm)	34.69	34.71	30.19	22.40	17.93
Torque Ripple (%)	32.5	32.44	35.72	41	50.95
Line Voltage (Vrms)	14.67	23.71	22.67	23.64	24.03

표 1은 기본모델을 해석한 각 운전 지점의 토크와 토크리플, 선간전압을 나타냈다. 토크리플 값이 정격 운전 지점에서 최소 32.44%이고, 고속 구간에서 50.95%이다. 소개된 모델은 중형전동기로서 기계적 손실이나 전기적인 손실에 큰 영향을 미치지 못하는 소형전동기와는 다르게 토크리플과 같은 손실 부분에서 큰 영향을 받게 된다.

따라서, 설계 측면에서 토크리플을 줄이기 위한 연구를 진행하였고, 기존 연구된 스큐기법과 새롭게 제시하는 비대칭 기법을 소개하려고 한다.

2.2 비대칭 모델과 스큐 모델 소개



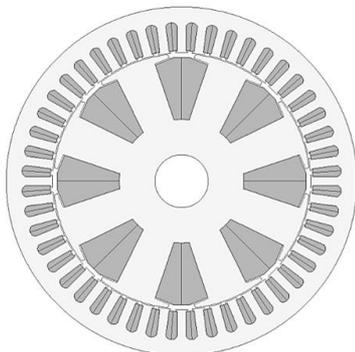
<그림 2> (a) WFSM 비대칭 모델의 회전자 티스 설계 형상, (b) WFSM 스큐 모델의 회전자 티스 설계 형상

그림 2-(a)의 비대칭 모델은 회전자의 축방향 길이를 반으로 나누어서 극판을 한 슬롯피치(Slot Pitch)의 1/4 길이만큼 좌우로 회전시킨 모델이다. 그림 2-(b)의 스큐 모델은 회전자의 축방향 길이를 3단 분리해서 회전자 자체를 비대칭 모델과 동일한 각도인 θ 만큼 좌,우로 회전시켰다.

그리고 비대칭 모델은 극판만 회전시키기 때문에 티스(Teeth)부분은 고정되어 있지만 스큐 모델은 회전자 자체가 회전되기 때문에 극판뿐만 아니라 회전자 자체가 회전된 형태가 된다. 또한 비대칭 모델은 2단으로 분리해서 좌우측으로 회전시켰기 때문에 C1에 위치한 극판이 없고, C3와 C2에 위치한 2개의 회전자가 적층 되어있다. 스큐 모델은 3단 분리하여 좌우측으로 회전 시켰기 때문에 C3, C1, C2에 위치한 3개의 회전자가 적층 되어있다.

2. 본 론

2.1 WFSM 기본모델 소개



WFSM specification	
순시 출력	9.4 kW
최대 전압	34 V _{max}
	24 V _{rms}
최대 속도	5,000 rpm
정격 속도	2,600 rpm

<그림 1> WFSM 기본모델 2D 형상 및 Spec

두 모델의 공통점은 좌우측으로 같은 각도만큼 회전시켰기 때문에 회전자에 티스에서 나오는 공극자속은 전기자에 위상차를 두고 자속이 쇄교한다. 이와 같은 설계 기법은 쇄교자속이 위상차를 두고 쇄교하기 때문에 각각의 파형이 합성된다. 그러므로 회전자 설계 시에 극판 또는 회전을 회전시키는 각도에 따라서 합성되는 양이 달라지므로, 고조파를 감소량을 분석하면서 회전 각도를 정해야 한다.

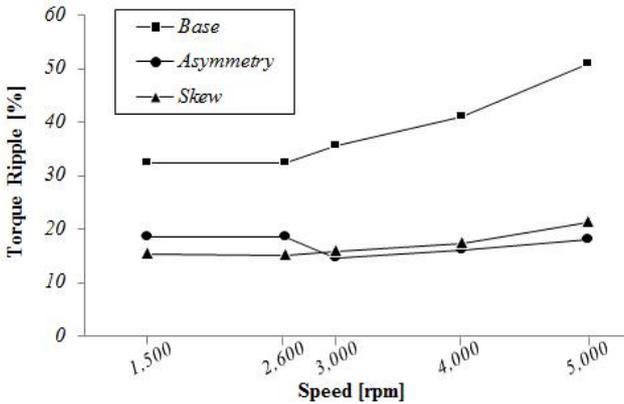
2.3 기본, 비대칭, 스큐 모델의 FEM 해석 비교

〈표 2〉 비대칭 모델의 토크, 토크 리플과 선간전압 데이터

Speed (rpm)	1,500	2,600	3,000	4,000	5,000
Torque (Nm)	34.78	34.77	30.18	22.24	17.62
Torque Ripple (%)	18.51	18.53	14.49	16.13	17.99
Line Voltage (Vrms)	14.57	23.52	22.35	22.32	22.48

〈표 3〉 스큐 모델의 토크, 토크 리플과 선간전압 데이터

Speed (rpm)	1,500	2,600	3,000	4,000	5,000
Torque (Nm)	34.43	34.47	29.92	22.31	17.82
Torque Ripple (%)	15.24	15.20	15.78	17.31	21.17
Line Voltage (Vrms)	14.54	23.49	22.37	22.52	22.86



〈그림 3〉 WFSM 기본, 비대칭, 스큐 모델의 토크리플 비교

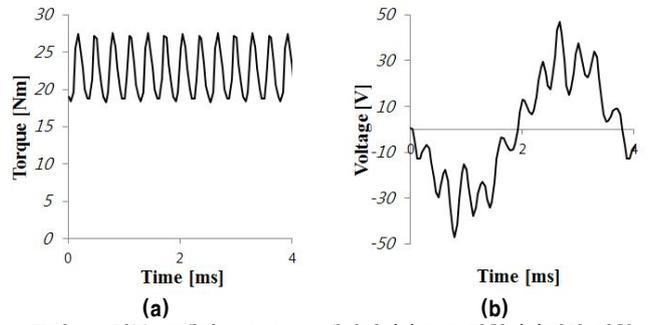
$$T = \frac{P}{2} [\phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] = T_m + T_r \quad (1)$$

$$P_m = \omega_m T = 2\pi \frac{N}{60} T \quad (2)$$

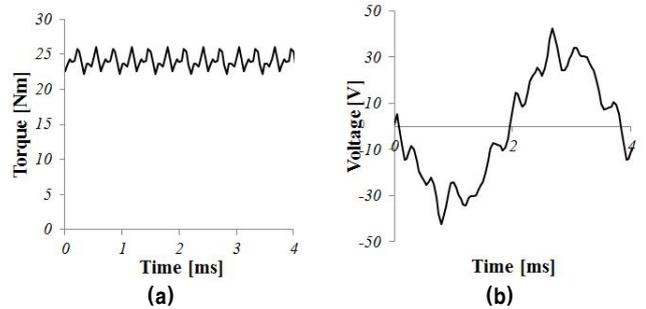
T = 토크
 P = 극수
 ϕ_a = 전기자 쇄교자속
 i_d = d축 전류
 i_q = q축 전류
 T_m = 마그네틱 토크
 T_r = 릴럭턴스 토크
 P_m = 기계적 출력
 ω_m = 회전각속도
 N = 회전속도

그림 3은 비대칭 모델과 스큐 모델의 속도에 따른 토크리플 값을 나타낸 그래프이고, 표 2와 표 3은 비대칭 모델과 스큐 모델의 속도에 따른 토크, 토크리플과 선간전압 데이터를 정리한 것이다. 그림 3의 토크리플 데이터 값만 보더라도 표 1의 기본 모델의 토크리플보다 현저하게 감소된 것을 알 수 있다. 두 모델간의 토크리플은 정 토크 영역과 정 출력 영역이 역전되는 현상을 보이고 있지만, 큰 차이는 나지 않는다. 하지만 고속운전을 많이 사용하는 모터의 경우에는 비대칭 기법을 이용하여 약계자 영역에서 고조파를 줄이고, 그에 따른 토크리플과 철손을 줄일 수 있다는 강점이 있다.

식 (1)과 (2)를 보면 토크와 출력에 대한 식을 표기하였다. 식 (1)은 동기전동기의 토크 식으로 q축 전류만을 사용하는 마그네틱 토크와 d축과 q축 전류를 사용하는 릴럭턴스 토크로 분류 할 수 있다. 고속 구간을 운전하기 위해서는 d축 전류를 더 인가해서 마그네틱 토크를 줄이면서 릴럭턴스 토크의 힘으로 회전하게 되는데 이때의 출력은 식 (2)와 같이 토크와 비례 관계에 있다. 따라서 표 4와 같이 최대 전압을 쓰는 두 모델의 토크 관계를 출력으로 볼 수 있으므로 비대칭 모델이 스큐 모델에 비해서 정토크 영역에서는 출력 좋다는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 기본 모델의 4,000rpm에서의 (a)토크 파형 (b)전압 파형



〈그림 5〉 비대칭 모델의 4,000rpm에서의 (a)토크 파형 (b)전압 파형

그림 4는 기본 모델의 약계자 운전 구간 4,000rpm에서의 토크 파형과 전압 파형을 나타낸 것이다. 표 1과 같이 토크 파형에 리플이 많이 발생하는 것을 알 수가 있다. 또한, 전압 파형에도 리플이 많이 끼여있는 것을 알 수가 있다. 이 같은 상태에서 운전하게 되면 토크리플에 의한 모터의 소음, 진동이 발생하고 제어 측면에서도 어렵다. 그리고 전압 파형의 최대 전압이 그림 4-(b)와 같이 튀는 현상이 나타나게 되면, 배터리 허용 최대 전압을 초과하는 문제점이 발생한다. 하지만 비대칭 기법을 이용하게 되면 그림 5와 같이 토크 및 전압 파형의 리플이 줄어든 것을 알 수가 있다. 이와 같이 리플이 감소한다는 것은 그만큼 고조파가 줄어든다는 것으로서, 고조파에 의한 철손도 저감시킬 수 있으므로 효율에서도 효과를 볼 수가 있다. 모터에서는 토크리플 뿐만 아니라 효율도 중요한 요소이기 때문에 고려해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 권선계자형 동기전동기를 기본 모델로 잡고 스큐 기법과 비대칭 기법을 이용하여 토크리플을 저감하기 위한 설계를 진행 하였다. 제시한 두가지 모델 모두 적층 길이는 변함없이 같은 회전각도로 2단, 3단 회전시켰기 때문에 전기자와 계자의 극단 끼리 접촉 면적이 같으므로 쇄교 자속량은 같다고 예상 할 수 있다.

하지만 스큐 모델은 회전자 자체가 회전하고, 비대칭 모델은 회전자의 극판만 회전하기 때문에 회전자 극(Rotor Pole)의 체적이 다르면서 계자 권선의 길이가 다르게 된다. 권선의 길이 차이로 인해서 저항이 다르게 되고 동일한 전류를 인가했을 때 쇄교 자속량에 차이가 생긴다. 쇄교 자속량의 차이로 인해서 토크 값이 다르게 되고, 스큐 모델보다 높은 출력을 낼 수 있다. 또한 고속운전에서 토크리플이 유리하다는 장점이 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] Ki-Chan Kim, Ju Lee, Hee Jun Kim and Dae-Hyun Koo, "Multiobjective Optimal Design for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor" *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 45, pp. 1780-1783, March 2009.
- [2] Sang-Hwa Do, Byeong-Hwa Lee, Ho-Young Lee, and Jung-Pyo Hong, "Torque ripple reduction of wound rotor synchronous motor using rotor slits" *IEEE Inter. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, pp. 1-4, Oct. 2012.
- [3] Chu, W.Q., and Zhu, Z.Q., "Investigation of Torque Ripples in Permanent Magnet Synchronous Machines With Skewing" *IEEE Transaction on Magnetics*, vol. 49, pp. 1211-1220, March 2013.