계자전류 조합에 따른 ISG용 권선형 동기전동기의 설계 및 특성분석

Design and Characteristic Analysis of Wound Rotor Synchronous Motor for ISG according to Field Current Combination

권 성 준* · 이 동 수* · 정 상 용†
(Sung-Jun Kwon · Dongsu Lee · Sang-Yong Jung)

Abstract - In this paper, design of Wound Rotor Synchronous Motor(WRSM) for Integrated Starter and Generator(ISG) is performed based on Finite Element Analysis(FEA). WRSM can control not only magnitude and phase of armature current, but also field current. Thus, various control methods can be considered. Since driving characteristic of WRSM depends greatly on the control method, characteristic analysis according to possible driving current combination is required. Especially in high speed region, the control method that reduces unnecessary d-axis current by reducing field current is possible, which is similar to field weakening control. By the current combination reducing field and d-axis current, the design minimizing copper loss to increase efficiency on identical driving point is possible. In this paper, high efficient WRSM is designed applying the current combination which can minimize copper loss on each driving point.

Key Words : Wound rotor synchronous motor, WRSM, Armature current control, Finite element analysis, ISG

1. 서 론

현재 자동차 산업은 환경오염의 주요원인인 화석연료를 공급원으로 하는 차량에서, 고부가가치를 가지는 하이브리드 및 전기자동차 개발의 추세로 변화하고 있다. 이러한 추세 변화에도 불구하고 자동차 산업에서 가장 중요시 되고 있는 항목은 차량의 연비 개선 및 효율이며, 차량 연비를 개선하기 위한 방법 중의 하나로 ISG(Integrated Starter and Generator)시스템을 들 수 있다[1].

차량 구동용 ISG는 출발시 엔진의 크랭크축을 돌려 기동을 가능하게 하며, 정차시 엔진을 정지시킴과 동시에 발생하는 공회전을 이용하여 발전을 가능하게 한다. 즉, 차량 구동시 회생제동을 통해 배터리를 충전시키는 발전기모드와, 가속시 엔진의 토크를 보조하는 전동기 모드를 지니는 통합 시스템이다. 이러한 특징 때문에 ISG용 회전기는 저속에서의 고토크와 고속에서의 정출력 조건을 요구하며, 현재 영구자석을 사용한 회전기가 가장 각광받고 있다[2].

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 기술 개발과 발전이 지속적으로 이루어져 왔으며, 최근에는 에너지적(Energy Product)이 높고 감자특성이 우수한 자석이 개발되어 전동기뿐만 아니라, 다양한 분야에서 첨단 제품의 고효율 및 소형화 구현을 가능케 하였다. 그 예로, 산업 분야중 전기자동차 구동용 전동기, 풍력발

전기의 터빈, 하드디스크 드라이브, 자기공명영상 장치 등에서 PMSM을 사용하고 있다. 하지만 최근들어 PMSM에 사용되는 희토류계 영구자석(Rare-Earth Permanent Magnet) 자원의 원가 상승 및 공급 차질 문제로 인해 희토류계 PMSM을 대체할 수 있는 타전동기의 필요성이 대두되고 있다[3].

본 논문에서는 ISG용으로 희토류계 PMSM을 대신하여 권선형 동기전동기(WRSM)를 제안한다. WRSM은 고정자에 3상의 전류를 인가하는 전기자권선 및 회전자에 전류를 인가하는 계자권선으로 구성되어 있어 불필요한 d축 전류를 줄여 동손을 저감할 수 있고, 더 넓은 정출력 영역을 가진다[4-5]. 따라서, WRSM은 전류조합에 의해 다양한 운전제어가 가능하고 고토크, 고속형 운전특성을 지닌다는 점에서 차량용 ISG에서 PMSM을 대체할 수 있다[6].

본 논문에서는 순시정격 10kW 및 연속정격 4kW의 사양을 가지는 ISG용 WRSM을 설계하였고, 전기자전류 및 계자전류의 조합에 따른 자기포화특성, 토크리플, 역기전력 및 효율 등을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 권선형 동기전동기 기본이론 및 운전특성

2.1.1 지배방정식

WRSM은 전기자전류와 계자전류를 각각 제어할 수 있기 때문에 다양한 전류조합에 따른 특성을 가지고 있으나, 일반적인 지배방정식은 IPMSM과 유사하다. 계자자속과 q축 전류에 의한 토크 및 자기저항에 의한 토크가 발생하며, 전류

* School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

† Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University, Korea
E-mail : syjung@ece.skku.ac.kr

Received : June 10, 2013; Accepted : August 19, 2013

제한원 및 전압제한타원의 크기에 따라 속도별 운전특성이 결정된다. WRSM의 V_d , V_q , V_f 식을 구하면 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_d + \frac{d\lambda_d}{dt} - \omega_r \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = R_s i_q + \frac{d\lambda_q}{dt} + \omega_r \lambda_d \quad (2)$$

$$V_f = R_f i_f \quad (3)$$

여기서, R_s 는 상당 저항, ω_r 은 전기각속도, λ_d 는 d축 쇄교자속, λ_q 는 q축 쇄교자속을 각각 나타낸다. 또한, 고정자 d-q축 쇄교자속은 다음과 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \quad (4)$$

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (5)$$

여기서, λ_f 는 계자권선에서 생성하는 쇄교자속을 의미한다. 식(1), (2)에 식(4), (5)를 대입하면 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (6)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \lambda_f) \quad (7)$$

다음 식은 전류제한 및 전압제한을 나타낸다.

$$i_d^2 + i_q^2 \leq i_{\max}^2 \quad (8)$$

$$V_d^2 + V_q^2 \leq V_{\max}^2 \quad (9)$$

식(8), (9)를 토대로, $i_d - i_q$ 평면에 전류제한원 및 전압제한타원을 표현할 수 있다. 이때, 전압제한타원의 경우 식(6), (7)을 식(9)에 대입한 후, i_d , i_q 를 변수로 갖는 함수로 변형하여 식(10)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{\left(i_d + \frac{\lambda_f}{L_d}\right)^2}{\left(\frac{V_{\max}}{\omega_r L_d}\right)^2} + \frac{i_q^2}{\left(\frac{V_{\max}}{\omega_r L_q}\right)^2} = 1 \quad (10)$$

또한, WRSM의 전자계 토크식은 다음과 같이 정의된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (11)$$

여기서, P 는 극수를 나타낸다. 식(11)에서, $\lambda_f i_q$ 는 회전자에서 발생하는 자속이 고정자와 상호작용에 의해 발생하는 자석 토크(Magnetic alignment torque) 성분이며, $(L_d - L_q) i_d i_q$ 는 회전자의 돌극성으로 인해 L_d 와 L_q 의 자기저항 차로 인해 발생하는 자기저항 토크(Reluctance Torque) 성분이다. 또한, d-q축 쇄교자속을 이용하여 전자계 토크(T_e)와 기계적 출력(P_m)을 식(12), (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 비선형성이 두드러지는 WRSM에서 개별 제어

정수를 분리할 필요가 없이 수치해석적으로 통합 추출할 수 있는 용이한 방법이다[7].

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (12)$$

$$P_m = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (13)$$

2.1.2 회전자 형상 및 운전특성

WRSM의 계자전류는 슬립링을 통해 입력된 DC 전류가 계자에 감겨진 권선을 따라 흐르면서 여자된다. 이렇게 형성된 계자자속을 통해 발전기 모드에서는 역기전력을 발생시켜 배터리를 충전하고, 전동기 모드에서는 고정자 q축 전류와의 상호작용을 바탕으로 토크를 발생시킨다. 그림 1에 WRSM의 회전자 형상을 나타내었고, 그림 2에 전압제한타원 및 전류제한원에 의한 전동기 모드 시의 동작점을 $i_d - i_q$ 평면 동기좌표계에 나타내었다.

그림 1 권선형 동기전동기의 회전자 형상

Fig. 1 Rotor shape of WRSM

그림 2 WRSM의 전압제한타원 및 전류제한원

Fig. 2 Voltage constraint ellipse and current constraint circle of WRSM

WRSM은 회전자의 돌극성분에 따라 L_d 가 L_q 보다 큰 값을 가지기 때문에, 전압제한타원은 세로로 긴 타원의 형태를 가진다. 약계자제어를 하지 않는 저속 운전구간에서는 $i_d - i_q$ 평면의 1사분면에서 운전한다. 이 때, 자기저항 토크는 전체 토크를 높이는 방향으로 작용한다. 반면 고속 운전시에는 약계자제어를 수행하여 최대토크 위상각이 2사분면으로 이동하게 된다. i_d 가 음의 값을 가지면 식(11) 우변의 마지막 항이 음의 값을 가지게 되어 토크가 감소하게 된다[8]. WRSM은 회전자에 영구자석 대신 계자권선을 사용하여 계

자속을 발생시키므로, 계자전류 제어를 통해 λ_f 의 제어가 가능하다. 또한, 약계자제어시 회전자 d축 자속을 줄이기 위해 고정자 d축 전류를 인가하는 대신 계자권선의 입력전류를 줄임으로써 동일한 효과를 낼 수 있다[9].

그림 3 계자자속의 크기에 따른 전압제한타원의 변화
Fig. 3 Variation of voltage constraint ellipse according to field flux magnitude

그림 3에 계자자속의 크기에 따른 전압제한타원의 변화를 나타내었다. 계자자속의 크기를 증가시킬수록 식(10)의 λ_f/L_d 항이 증가하게 되어 전압제한타원의 중심점은 왼쪽으로 이동하게 된다. 또한 포화로 인해 L_d 가 감소하게 되어, $V_{max}/\omega_r L_d$ 성분이 증가하고 전압제한타원이 가로방향으로 넓어지는 형태를 보인다.

2.2 권선형 동기전동기 설계

2.2.1 목표사양 및 설계제원

권선형 동기전동기의 설계 목표사양은 순시정격 10kW, 연속정격 4kW이다. 그림 4 및 표 1에 권선형 동기전동기의 운전점과 목표사양을 나타내었다. 순시정격 및 연속정격 각각 2000, 10000, 15000[r/m]의 3가지 운전점을 가지며, 각각의 운전점을 만족하는 설계를 수행하였다.

그림 4 권선형 동기전동기 목표사양
Fig. 4 Target specification of WRSM

설계된 권선형 동기전동기는 최대속도 15,000[r/m]에서 운전하므로, 인버터의 제어가능한 스위칭 주파수를 고려하여 6극을 채택하였다. 슬롯은 27슬롯으로 매극매상 슬롯수는

표 1 운전점별 WRSM의 목표사양

Table 1 Target specification of WRSM on driving points

운전점	A	B	C
순시정격			
속도 [r/m]	2,000	10,000	15,000
출력 [kW]	10	10	10
토크 [Nm]	47.8	9.6	6.4

운전점	a	b	c
연속정격			
속도 [r/m]	2,000	10,000	15,000
출력 [kW]	4	4	4
토크 [Nm]	19.1	3.9	2.6

1.5의 분수슬롯이다. 전기자권선은 역기전력 및 전압제한을 고려하여 3병렬 2턴, 계자 권선은 1병렬 70턴으로 설계하였고, 전기자 권선방식은 가진력의 원인이 되는 토크리플을 줄이기 위하여 분포권을 채택하였다. 또한, WRSM의 최외경은 $\Phi 150\text{mm}$, 공극은 0.8mm로 설계하였으며, 고정자 및 회전자 철심은 35PN230(포스코)을 사용하였다. 최종적으로 설계된 WRSM의 2차원 단면 형상을 그림 5에 나타내었다.

그림 5 WRSM 2차원 단면 형상
Fig. 5 2-dimensional configuration of WRSM

2.2.2 토크리플 저감설계

차량에 탑재되는 ISG용 권선형 동기전동기는 소음 및 진동의 최소화가 필수적이다. 소음 및 진동을 저감하기 위해서는 가진력인 토크리플을 저감하는 설계가 이루어져야 한다.

그림 6 회전자 극호 조절을 통한 토크리플 저감 설계
Fig. 6 Torque ripple reduction design adjusting rotor pole arc

그림 6과 같이 회전자 극호를 1.2mm 감소하여 WRSM의 토크리플을 저감하는 설계를 수행하였다. 그 결과, 운전점 A에서 평균토크가 2.6% 감소하였으나 토크리플이 8.7%에서 3.0%로 저감되었고, 역기전력 THD 역시 8.1%에서 1.1%로

감소하였다. 그림 7에 회전자 극호 조절에 따른 무부하 역기전력 파형의 변화를 나타내었다.

그림 7 회전자 극호 조절 전 · 후의 무부하 역기전력 파형
Fig. 7 No-load Back EMF waveform before and after adjusting rotor pole arc

2.2.3 계자전류 크기에 따른 토크특성

그림 8과 9에 i_d, i_q 에 따른 토크특성과 i_{pk} 위상각에 따른 토크특성을 계자전류 크기별로 나타내었다. 동일한 i_d, i_q 를 인가하더라도, 계자전류의 크기에 따라 토크가 증가하는 것을 확인 할 수 있다. i_f 를 20A까지 인가한 결과 토크는 최대 50.5Nm까지 발생하였다.

또한, 최대토크 운전점은 계자전류가 증가함에 따라 점점 q축으로 이동하게 된다. 이는 회전자 d축 자료가 포화되고, d축 인덕턴스가 q축 인덕턴스와 같아지기 때문이다. 따라서, WRSM은 SPMSM과 유사하게 동작하게 된다.

그림 8 $i_d - i_q$ 조합별 토크특성
Fig. 8 Torque characteristic by $i_d - i_q$ combination

그림 9 전류-위상각별 토크특성
Fig. 9 Torque characteristic by current-phase

2.2.4 계자전류 제어에 따른 특성분석

WRSM은 계자전류 제어를 통해 계자자속을 변화할 수 있어 운전점을 만족하는 다양한 전류조합을 가진다. 그러므로 고속영역에서 계자전류를 감소시켜 불필요한 d축전류를 줄이는 제어가 가능하다.

그림 10 운전점 C에서의 전류조합 및 위상각
Fig. 10 Current combination and phase on driving point C

그림 11 운전점 C에서의 손실 및 효율
Fig. 11 Loss and efficiency on driving point C

그림 10은 최대속도 15,000[r/m]인 운전점 C에서 계자전류 크기별 목표성능을 만족하는 각각의 전기자전류의 크기와 위상각에 대해 나타내고 있다. 계자전류의 크기가 감소할수록 역기전력이 줄어들어 전압제하에 도달하는 rpm이 높아지며, 계자자속을 상쇄하는 불필요한 d축 전류를 저감할 수 있어 위상각이 q축에 가까워지게 된다. 또한 약계자 제어에 필요한 전기자 전류가 감소하므로 전기자 전류의 크기가 낮아지게 된다. 그림 11에 운전점 C에서의 계자전류별 손실 및 전동기 효율에 대해 나타내었다. 이때 4가지 계자전류는 모두 운전점을 만족한다. 동일한 운전점에서 계자전류가 감소할수록 전기자전류 역시 감소하게 되어 동손이 점차 낮아지는 경향을 보인다. 또한, 동일한 출력을 가지므로 전체 효율이 높아지게 된다.

2.2.5 동손을 최소화한 권선형 동기전동기의 특성분석

WRSM은 IPMSM과 달리 계자전류에 의한 계자자속의 제어가 가능하여 다양한 제어방식이 고려될 수 있다. 즉, 제어방식에 따라 WRSM의 운전특성이 크게 좌우되므로, 운전 가능한 다양한 전류조합에 따른 특성분석이 필수적이다. 본 논문에서는 계자전류가 가변적이므로, 각 운전점별 목표성능을 만족하는 전기자전류와 계자전류의 조합 중 동손을 최소화하는 전류조합을 선정하여 설계를 수행하였다. 그림 12에 순시정격 및 연속정격 2,000[r/m], 15,000[r/m]에서의 자속밀도 분포도를 나타내었다.

그림 12 WRSM의 운전점별 자속밀도 분포도
Fig. 12 Magnetic flux density distribution of WRSM on driving points

순시정격과 연속정격 모두 2,000[r/m]의 운전점에서 낮은 효율을 보인다. WRSM은 PMSM과 달리 계자전류를 포함하고 있기 때문에 고토크를 내기 위해서는 많은 양의 전류 인가가 필요하여 운전점 A, a에서 동손이 높게 나타나는 경향을 보인다. 또한, 철손은 낮은 값을 가지므로 저속 운전

구간에서 손실의 대부분은 동손으로 발생함을 확인할 수 있다. 표 2와 3에 순시정격과 연속정격에서 각 운전점별 WRSM의 성능특성 및 손실 해석결과, 그리고 이를 바탕으로 계산된 전자계 효율에 대해 나타내었다.

표 2 운전점별 동력성능, 손실 및 효율특성 (순시정격)

Table 2 Performance, loss and efficiency characteristics on driving points (Instantaneous)

운전점	A	B	C
속도[r/m]	2,000	10,000	15,000
출력[kW]	10.07	10.05	10.05
토크[Nm]	48.1	9.6	6.4
토크리플[%]	3.3	3.6	3.9
$I_{pk}[A]$	772.4	222.1	201.9
$I_f[A]$	17.8	6.8	5.8
역기전력 $[V_{ll_pk}]$	16.4	49.6	64.6
동손			
고정자[W]	1302.1	107.7	89.0
회전자[W]	731.0	106.7	78.2
합계[W]	2033.1	214.4	167.1
철손			
고정자[W]	49.7	205.8	190.7
회전자[W]	2.2	8.5	9.5
합계[W]	51.9	214.3	200.1
효율			
$\eta[\%]$	82.9	95.9	96.5

표 3 운전점별 동력성능, 손실 및 효율특성 (연속정격)

Table 3 Performance, loss and efficiency characteristics on driving points (Continuous)

운전점	a	b	c
속도[r/m]	2,000	10,000	15,000
출력[kW]	4.00	4.18	4.08
토크[Nm]	19.1	4.0	2.6
토크리플[%]	3.4	3.1	3.5
$I_{pk}[A]$	368.5	141.3	116.1
$I_f[A]$	8.8	4.3	3.4
역기전력 $[V_{ll_pk}]$	12.3	31.8	36.7
동손			
고정자[W]	296.4	43.6	29.4
회전자[W]	178.7	42.7	26.7
합계[W]	475.0	86.2	56.1
철손			
고정자[W]	31.1	109.0	136.8
회전자[W]	1.2	4.4	6.1
합계[W]	32.4	113.4	142.9
효율			
$\eta[\%]$	88.7	95.5	95.4

그림 13에 각 운전점에서의 철손 분포를 나타내었다. 계자권선에는 DC전류가 인가되므로, 운전시 회전자 철심에는 일정한 방향의 flux가 흘러 공극 표면 근처에서만 국부적으로 철손이 발생하고, 대부분의 철손은 고정자에 분포함을 확인할 수 있다.

그림 13 WRSM의 운전점별 철손 분포도

Fig. 13 Iron loss distribution of WRSM on driving points

3. 결 론

본 논문에서는 수치해석 기반 FEA를 통하여 자동차 ISG 용 WRSM을 설계하였고, 계자전류의 크기에 따른 특성분석을 수행하였다. 회전자 극호를 조절하여 토크리플을 저감하였고, 계자전류의 크기에 따른 WRSM의 토크특성에 대해 분석하였다. 또한, 고속 운전시 계자전류 제어를 통해 불필요한 d 축 전류를 줄이고, 고정자 및 회전자에서의 동손을 저감하여 효율을 향상시키는 방법에 대해 고찰하였다. 제안된 WRSM은 높은 토크와 넓은 운전영역을 가지며, 동손저감을 통해 높은 효율을 보인다. 또한, 회로류 자석을 사용하지 않아 IPMSM을 대체할 경쟁력을 갖춘 ISG용 모터로 평가된다.

감사의 글

본 연구는 2013년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20114030200030)

References

- [1] L.Chedot, G.Friedrich, "Integrated starter generator: the need for an optimal design and control approach. Application to a permanent magnet machine", in IEEE IAS Trans, pp. 551-559, 2007.
- [2] A. Girardin, G. Friedrich, "Optimal control for a Wound Rotor Synchronous starter generator", in Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, pp. 14-19, 2006.
- [3] A.Coria-Cerezo, C.Battle, G.Espinosa, Passivity-based control of a wound-rotor synchronous motor", IET Control Theory Appl., vol. 4, no. 10, pp. 2049-2057, 2010.
- [4] G. Friedrich, "Experimental comparison between Wound Rotor and permanent magnet synchronous machine for Integrated Starter Generator applications", in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2010 IEEE, pp. 1731-1736, 2010.
- [5] Huijuan Liu, Longya Xu, Mingzhu Shangguan, W.N. Fu, "Finite element analysis of 1 MW high speed wound-rotor synchronous machine", Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 48, no. 11, pp. 4650-4653, 2012.
- [6] A.E.Magri, F.Giri, A.Abouloifa, M.Haloua, "Nonlinear control of wound-rotor synchronous-motor", in Proc. IEEE Int. Conf. Control Appl., pp. 3110-3115, 2006.
- [7] G.Bertotti, "General properties of power losses in soft ferromagnetic materials", IEEE Trans. Magn., vol. 24, no. 1, pp. 1273-1281, 2004.
- [8] P. Pellerey, V. Lanfranchi, G. Friedrich, "Influence of the load angle on the magnetic pressure harmonic content of a WRSM", in IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 883-888, 2010.
- [9] J.S. Ostroff, R.F. Paige, "The logic of software design", Software, IEE Proceedings, vol. 147, no. 3, pp. 73-80, 2000.

저 자 소 개

권 성 준 (權 成 俊)

2012년 동아대학교 전기공학과 졸업, 2012 ~ 현재 성균관대학교 대학원 전자전기공학부 석사과정

이 동 수 (李 東 洙)

2010년 동아대학교 전기공학과 졸업, 공학사, 2013년 성균관대학교 대학원 전자전기공학부 졸업(석사), 현재 성균관대학교 대학원 전자전기공학부 박사과정

정 상 용 (鄭 相 龍)

2003년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업, 공학박사, 2003 ~ 2006년 현대자동차 연구개발본부 선임연구원, 2006 ~ 2011년 동아대 전기공학과 조교수, 2011 ~ 현재 성균관대학교 전자전기공학부 부교수