

# ISG용 권선형 동기기의 설계 및 IPMSM과 특성 비교

## Design of Wound Rotor Synchronous Machine for ISG and Performance Comparison with Interior Permanent Magnet Synchronous Machine

이 동 수\* · 정 윤 호\* · 정 상 용†  
(Dongsu Lee · Yun-Ho Jeong · Sang-Yong Jung)

**Abstract** - This paper deals with Wound Rotor Synchronous Motor (WRSM) purposely designed for Integrated Starter and Generator (ISG) installed in 42V automotive electrical system. Not only design objective and specifications of WRSM, but its adaptive design to minimize torque ripple and back-EMF Total Harmonics Distortion (THD) are considered. Furthermore, design characteristics of designed prototype have been investigated numerically in terms of torque, back EMF, loss, and efficiency, which are verified by performance comparison with Interior Permanent Magnet Synchronous Machine based on Finite Element Analysis (FEA).

**Key Words** : ISG, WRSM, IPMSM, FEA

### 1. 서 론

차량의 연비 개선과 효율 향상을 위한 ISG (Integrated Starter and Generator) 시스템은 정차 시 엔진을 정지시켜 (Idle stop) 공회전을 통한 연료의 낭비를 방지하며, 출발 시 엔진의 크랭크축을 돌려 신속한 기동이 가능하게 한다. 또한, 운전 중에는 발전기 모드 또는 회생제동을 통해 방전된 배터리를 충전시키며, 가속 시 순간적으로 엔진의 토크를 보조하기도 한다. 이와 같은 기능들을 구현하기 위해 ISG용 회전기의 설계사양은 기존 차량의 42V 시스템을 적용하면서 저속영역에서의 고 토크를 만족하는 동시에 고속영역에서의 정출력 운전이 가능하도록 설정되어야 한다. 하지만 일반적으로 회전기의 특성상 높은 시동 토크와 광범위한 속도 영역에 걸친 정출력 영역을 동시에 만족하기는 어렵기 때문에 이를 만족시키기 위한 다양한 연구들이 진행되고 있는데[1], 제한된 전압에서 요구되는 목표사양을 만족시키기 위해 성능 특성이 우수한 PMSM (Permanent magnet synchronous Motor)가 선호된다[2]. 특히, 회토티 자석을 사용하여 사이즈 최소화 및 고효율 운전이 가능하고 구조적으로 안정적인 IPMSM (Interior Permanent Magnet Synchronous)이 주를 이루지만, 최근 중국의 자원수출 억제 정책에 의한 회토티물질의 가격 상승으로 회토티물질의 수급에 대한 우려와 함께 생산비용 상승의 문제가 대두되고 있는 실정이다. 따라서 회토티 자석을 사용하는 IPMSM을

대체하여 비회토티 또는 회토티 저감형 모델의 개발 및 검토가 필요한 실정이다. 일반적으로 회토티자석을 사용하는 IPMSM은 성능 측면에서 자석의 와전류 손실 및 불가역감자와 같은 문제점을 지니고 있으며[3], 특히, 고속운전 영역에서 인버터가 제어성을 잃게 되어 발생하는 높은 무부하 역기전력은 인버터와 배터리를 비롯한 전체적인 시스템에 치명적인 문제로 작용한다[4]. 이를 미연에 방지하기 위해서는 설계 단계에서 무부하 역기전력이 배터리 전압보다 낮도록 설계되어야 하는데 이 경우엔 동력성능을 만족하기 위한 상대적으로 높은 전류를 필요로 한다. 아울러, 고속운전 시에는 약자속 제어를 위한 과도한 d축 전류를 상시 인가해야 하는 어려움이 있다[5].

위에 기술한 문제들의 해결방안으로 본 논문에서는 WRSM (Wound Rotor Synchronous Motor) 모델을 제시하고자 한다. WRSM은 영구자석을 사용하지 않기 때문에 제작 가격을 월등히 낮출 수 있으며, 영구자석으로 인한 와전류 손실 및 불가역감자에 대한 우려가 없다. 또한, 계자전류를 조절하여 계자 축 쇠교자속을 제어할 수 있기 때문에 IPMSM과 달리 고속에서의 제어 문제가 발생 시 계자전류를 차단하여 역기전의 발생을 억제 할 수 있다. 마찬가지로, 약자속 제어의 경우 계자전류를 낮춤으로써 효과적으로 고속 운전제어를 구현할 수 있다.

본 논문에서는 이와 같은 성능을 구현하고자 FEA를 기반으로 ISG용 WRSM의 설계 및 특성해석을 수행한 결과를 나타내고자 한다. 목표사양은 순시정격 10kW와 연속정격 5KW이며, 대표적인 두 운전점을 기준으로 토크 특성해석을 통하여 목표 성능 만족여부를 판단한다. 특히, 역기전력 및 손실 특성해석을 수행하여 해석된 결과를 바탕으로 동일한 설계사양을 목표로 설계된 IPMSM과 성능비교 분석을 통해 WRSM의 ISG로써의 경쟁력을 피력하였다.

\* School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunwan University, Korea

† Corresponding Author : School of Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunwan University, Korea

E-mail : syjung@skku.edu

Received : September 18, 2012; Accepted : November 23, 2012

## 2. 본 론

### 2.1 WRSM 모델링

#### 2.1.1 지배방정식

WRSM과 IPMSM의 토크는 영구자석 및 자기저항 (Reluctance)에 의해 발생하며, 속도별 운전특성은 아래 식 (1)과 (2)와 같이 전압 및 전류 제한식에 의해 특성화된다. 참고로, WRSM의 경우엔, 고정자측 전압 및 전류 특성은 회전자 계자전류에 따라 상호 영향을 받게 된다 [6].

$$V_d^2 + V_q^2 \leq V_{max}^2 \quad (1)$$

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

여기서,  $V_d$ 와  $V_q$ 는 d-q축 전압을, 그리고  $i_d$ 와  $i_q$ 는 d-q축 전류를 각각 나타내며, 상응하는 전압방정식은 다음과 같다.

$$V_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \quad (3)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r (L_d i_d + \lambda_f) \quad (4)$$

여기서  $R_s$ 는 상당 저항,  $\omega_r$ 은 전기각 회전속도,  $\lambda_d$ 와  $\lambda_q$ 는 d-q축 쇄교자속을 나타낸다. 특히,  $\lambda_f$ 는 계자자속에 의한 고정자 코일의 쇄교자속으로, IPMSM의 경우 자석에 의한 쇄교자속, WRSM의 경우, 계자전류에 의한 쇄교자속을 의미한다. 참고로, 전자계 토크와 기계적 출력은 다음과 같이 정의 된다 [7].

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} [\lambda_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (5)$$

여기서  $P$ 는 극수를 나타낸다.

식(5)의 첫째항은 회전자에 입력된 계자측 쇄교 자속과 q 축 전류의 상호 작용에 의해 발생하는 영구자석에 의한 토크 성분이고, 두번째 항은 d, q축의 돌극성으로 인해 발생하는 자기저항에 의한 토크 성분이다.

참고로, 계자자속에 의한 d-q축 쇄교자속은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\lambda_q = L_q i_q \quad (6)$$

$$\lambda_d = L_d i_d + \lambda_f \quad (7)$$

d-q축 쇄교자속을 이용하여 전자계 토크( $T_e$ )와 기계적 출력( $P_m$ )을 다음과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 비선형성이 두드러지는 PMSM에서 개별 제어정수를 분리할 필요가 없이 수치해석적으로 통합 추출할 수 있는 용이한 방법이다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (8)$$

$$P_m = \frac{3}{2} \omega_r (\lambda_d i_q - \lambda_q i_d) \quad (9)$$

#### 2.1.2 회전자 구조 및 d-q축 정의

WRSM의 회전자는 슬립링을 통해 입력된 DC 전류가 볼극에 감겨진 권선을 따라 흐르면서 여자된다. 이렇게 형성된 계자를 통해 발전기 모드에서는 역기전력을 발생시켜 배터리를 충전하고, 전동기 모드에서는 q축 전류와의 상호작용을 바탕으로 한 토크를 생성한다.

아래 그림 1, 2는 각각 IPMSM과 WRSM의 회전자 형상 및 d-q축 동기좌표계에 전압제한 타원과 전류제한 원에 의한 전동기 모드에서의 동작점을 나타내고 있다.

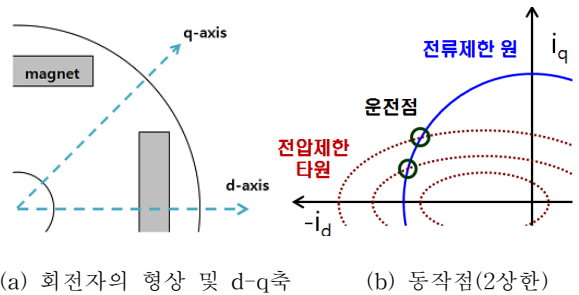


그림 1 매입형 영구자석 동기기 (IPMSM)

Fig. 1 Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)

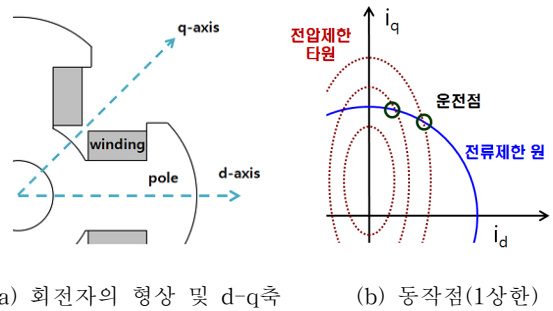


그림 2 권선형 동기기 (WRSM)

Fig. 2 Wound Rotor Synchronous Machine (WRSM)

IPMSM의 경우, 일반적으로 q축 인덕턴스가 크기 때문에 식 (5)의 자기저항 토크 성분이 양수가 되기 위해서는 d축 전류가 음의 방향이 되어야 하므로 그림 1(b)와 같이 운전점이 2상한에 존재하게 된다. 반면, WRSM은 IPMSM과 달리 d축 성분의 인덕턴스가 더 크기 때문에 d축 전류는 양이 되어, 운전점이 그림 2(b)와 같이 1상한에 존재하게 된다.

한편, WRSM에서 계자전류 제어에 따른 쇄교자속  $\lambda_f$ 의 변화는 그림 2(b)에서 전압제한 타원의 크기 및 중심점의 위치에 영향을 주어, 속도별 발생토크 특성을 다양하게 변화시킬 수 있다. 따라서 계자전류, 고정자전류, d-q축 위상각 제어를 통하여 구동환경에 따른 다양한 운전제어가 가능하며 고토크의 고속형 운전특성을 지닌 자동차 ISG용으로 적절하게 응용될 수 있다.

## 2.2 권선형 동기전동기 설계

### 2.2.1 목표사양 및 설계제원

ISG의 설계 목표사양은 아래 그림 3과 같이 전동기 모드에서 순시정격 10kW와 발전기 모드에서 연속정격 5kW이다. 특히, 설계 목표를 아래 표 1과 같이 대표적인 운전점인 A(10kW@2000rpm)와 B(5kW@15000rpm)로 선정하여 해당 운전점에서 설계모델의 특성해석을 통해 목표성능 만족여부를 판단하였다.

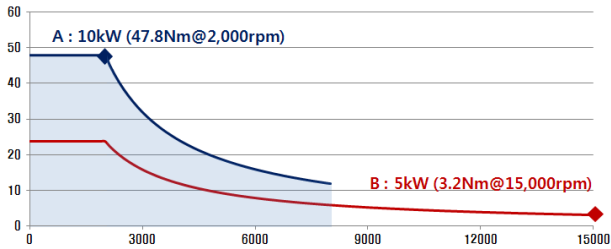


그림 3 ISG의 설계 목표

Fig. 3 Design objective of ISG

표 1 대표 운전점 A, B

Table 1 Representative operating point A and B

운전점	출력 [kW]	토크 [Nm]	속도 [rpm]
A	10	47.8	2000
B	5	3.2	15000

그림 4에는 설계된 WRSM의 2차원 단면상의 구조 및 운전점 A (47.8Nm@2000rpm)에서 운전시 자속밀도 및 자기력선 분포에 대해 나타내고 있다. 설계된 WRSM는 최대속도 15000rpm에서 인버터의 제어가능한 스위칭주파수를 고려하여 6극을 채택하였으며, 슬롯수는 27로 매극매상 슬롯수 1.5의 분수슬롯으로, 권선방식은 분포권을 선택하였다. 최외경은  $\Phi 144\text{mm}$ , 공극은 0.8mm로 설계 되었으며, 코어의 재질은 S08급(35PN230, 포스코)으로 사용하였으며, 공랭식 구조를 지닌다.

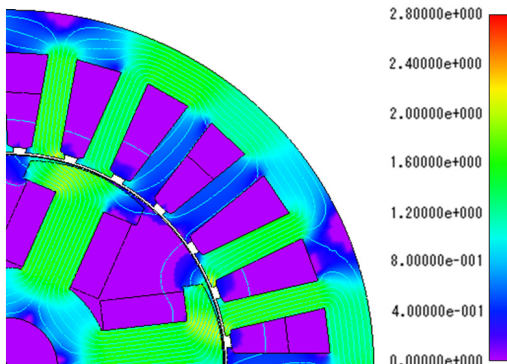


그림 4 WRSM의 자속밀도 분포도

Fig. 4 Magnetic flux density of WRSM

### 2.2.2 토크리플 저감설계

ISG는 차량에 탑재되므로 소음 및 진동 특성이 중요하며, 이를 저감시키기 위해서는 가진력인 토크 리플을 저감하는 설계가 이루어져야 한다. WRSM의 토크리플 저감을 위하여 아래 그림 5와 같이 회전자 극호 조절을 통한 설계를 수행하였으며, 이를 통해 평균토크가 4.6% 감소하였으나 토크리플을 11.2%로 저감할 수 있었으며, 역기전력 THD 또한 1.3% 저감시킬 수 있었다.

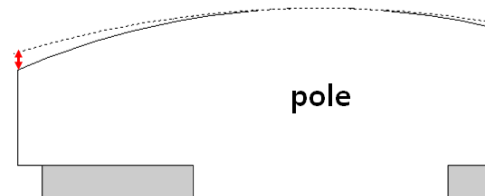


그림 5 토크리플 저감 설계

Fig. 5 Design for torque ripple reduction

### 2.2.3 WRSM 특성 분석

앞서 언급한 바와 같이 WRSM은 전류크기 및 전류위상 각 뿐만 아니라 계자전류에 의한 계자자속을 제어할 수 있기 때문에, IPMSM에 비해 다양한 제어방식이 고려될 수 있다. 제어방식에 따라 WRSM의 운전특성이 크게 좌우되므로, 운전가능한 다양한 전류조합에 따른 특성분석이 필요하다.

그림 6은 운전점 A (47.8Nm@2000rpm)의 성능을 만족하는, 계자전류별 고정자 전류크기 및 이에 따른 동손을 나타낸 것이다. 이때 그림에서 나타난 고정자측 입력전류는 해당 계자전류에서 운전점 A를 운전할 수 있는 최소의 전류값이다. 각 전류조합에 따른 토크리플 및 철손의 영향은 미미했지만, 상대적으로 전류조합 변화가 동손에 미치는 영향은 컸다. 따라서 WRSM의 제어알고리즘을 결정 시 전류 조합에 따른 전동기의 동손은 필수적으로 고려될 필요가 있다.

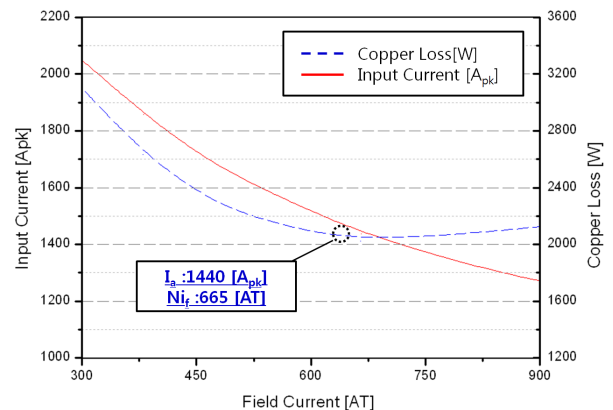


그림 6 계자전류에 따른 고정자 전류 및 동손 특성

Fig. 6 Stator current and copper loss versus field current

### 2.3 WRSM과 IPMSM 특성비교

#### 2.3.1 자기포화특성 비교

그림 7은 설계된 WRSM와 성능비교를 위해 검토된 ISG용 IPMSM의 2차원 단면상의 구조 및 운전점 A에서 운전시 자속밀도 및 자기력선 분포에 대해 나타내고 있다. IPMSM의 회전자에는 V-형상에 단층 구조이며, 자석은 38MGOe급의 NdFeB 계열의 희토류 자석이 사용되었다. 극수 및 슬롯수를 비롯하여 외경과 공극길이는 WRSM와 동일하며, 마찬가지로 고정자 코일 사양 및 전류밀도 등도 동일하다. 특히, IPMSM의 경우엔 WRSM에 비해 높은 토크 밀도를 나타내어, 적층길이가 약 40% 감소되었다.

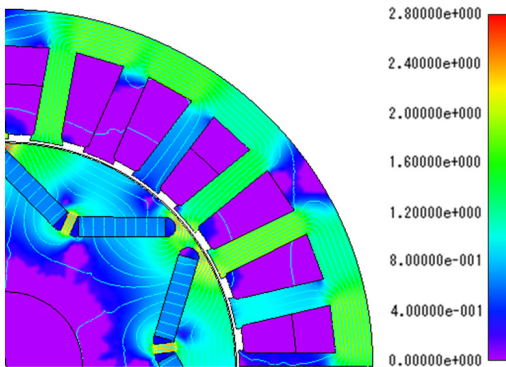


그림 7 IPMSM의 자속밀도 분포도  
Fig. 7 Magnetic flux density of IPMSM

#### 2.3.2 토크특성 비교

표 2는 운전점 A(47.8Nm@2000rpm)와 운전점 B(3.2Nm@1500rpm)에서 두 전동기의 평균 토크와 토크 리플 특성을 나타내고 있다. 참고로, WRSM의 입력전류는 해당 운전점에서 동손을 가장 낮게 발생시키는 전류 조합으로 고려하였다. 두 운전점에서 설계목표를 만족하는 평균토크를 발생하기 위한 전류 크기는 WRSM이 낮게 나타났는데, 정토크 운전에서는 계자전류를 상승시키고(665AT), 고속 약자속 운전에서는 계자전류를 줄여 IPMSM과 같이 불필요한 d축 전류를 줄일 수 있었기 때문이다.

표 2 토크특성 비교

Table 2 Torque characteristics comparison results

구분	IPMSM	WRSM
A	입력 전류	1721[Apk] (665[AT])
	평균 토크	47.8[Nm]
	토크 리플	5.9[%]
B	입력 전류	207[Apk] (225[AT])
	평균 토크	3.2[Nm]
	토크 리플	9.4[%]

토크 리플 측면에서는 운전점 A에서 0.3%만큼의 근소한 차이에 불과했지만, 고속 운전점 B에서는 3.6%로 WRSM의 결과가 우수하였다. 이는 약자속 제어시에 고조파 영향으로 인한 IPMSM의 높은 토크 리플 문제점에 대한 유효한 해결책으로 평가될 수 있겠다. 참고로, 그림 8과 9에는 각 운전점에서는 IPMSM과 WRSM의 토크 특성을 비교하였다.

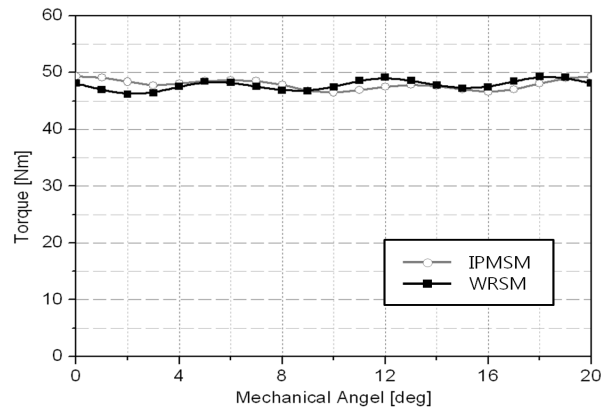


그림 8 운전점 A에서의 토크 리플 특성비교 파형  
Fig. 8 Torque ripple waveform at the operating point A

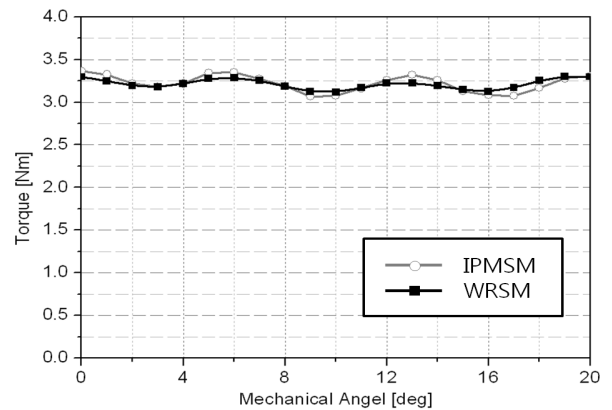


그림 9 운전점 B에서의 토크 리플 특성비교 파형  
Fig. 9 Torque ripple waveform at the operating point B

#### 2.3.3 코깅토크 특성 비교

표 3에는 코깅 토크 해석결과를 비교하여 나타내고 있다. WRSM의 경우엔 최악의 조건을 고려하고자, 계자전류를 운전점 A에서 필요로 하는 최대 계자전류 665AT를 고려하였다. 결과적으로 WRSM이 1.3Nm 적게 나타났으며, 이에 대한 구체적인 결과가 그림 10에 나타나 있다.

표 3 코깅토크 특성비교

Table 3 Cogging torque comparison results

구분	IPMSM	WRSM
코깅 토크(pk-pk)	1.35[Nm]	0.05[Nm]

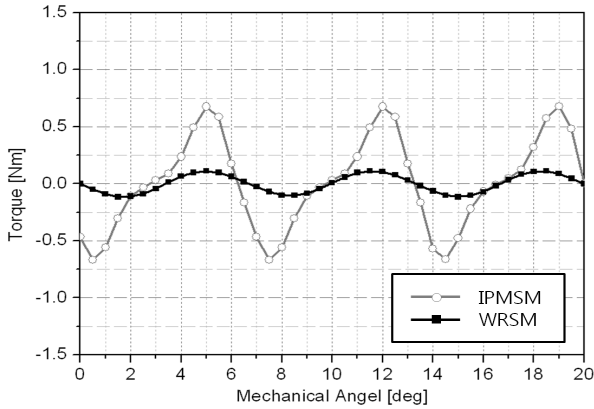


그림 10 코깅토크 특성비교 파형  
Fig. 10 Cogging torque comparison

2.3.4 무부하 역기전력 특성비교

표 4와 그림 11은 최고속도 15000rpm에서의 무부하 역기전력 해석결과를 비교하여 나타내고 있다. IPMSM는 상온 조건의 영구자석 성능이 고려되었으며, WRSM의 경우 계자전류에 따라 역기전력이 가변적이므로 운전점 A를 만족하기 위해 필요로 하는 최대 계자전류 665AT가 고려되었다. 선간 RMS 기준의 무부하 역기전력은 WRSM이 10.6Vrms\_ll 높지만 THD는 1.8% 적게 나타났다. 이를 통해 영구자석에 의한 자속량의 효과를 실감할 수 있으며, 반면 적절한 WRSM 설계를 통해 역기전력의 공간고조파 저감을 구현할 수 있었다.

표 4 역기전력 특성비교

Table 4 Back-EMF characteristics comparison results

구분	IPMSM	WRSM
역기전력 (15000rpm)	36.0[Vrms_ll]	46.6[Vrms_ll]
역기전력 상수	0.0024[Vrms_ll/rpm]	0.0031[Vrms_ll/rpm]
THD	3.4[%]	1.6[%]

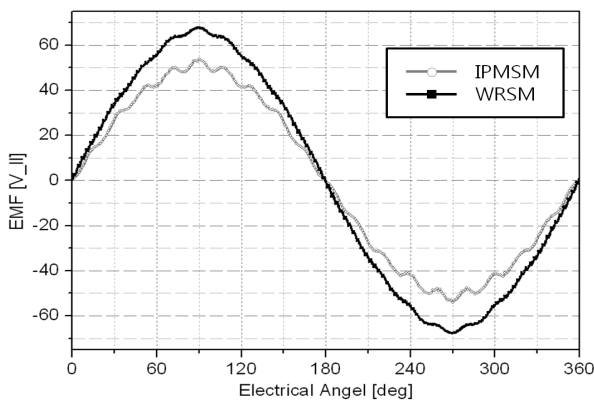


그림 11 무부하 역기전력 특성비교  
Fig. 11 No-load back-EMF waveform

IPMSM의 경우, 앞서 언급하였듯이 고속 운전에 따른 전압제한을 고려하면, 무부하 역기전력이 높아 전기자 코일 턴수가 슬롯당 수회 정도에 불과하여, 높은 입력 전류가 요구되거나 설계의 자유도가 떨어지게 된다. 반면, WRSM는 계자전류 조절을 통해 무부하 역기전력을 임의로 조절이 가능하므로 이와 같은 제약으로부터 자유롭다.

2.3.5 손실 및 효율 특성비교

표 5는 운전점 A와 B에서의 손실 해석결과 및 이를 바탕으로 계산된 전자계 효율을 나타내고 있다. WRSM은 계자전류를 포함하고 있기 때문에 두 운전점 모두 동손이 높게 나타난다. 철손의 경우엔 WRSM이 고속 운전에서 매우 낮은 값을 나타내었다. 이를 고려하여, 효율을 산정해보면, 저속 운전점 A에서는 IPMSM의 효율이 높게 나타났고, 고속 운전점 B에서는 WRSM의 효율이 높게 나타났다. 이를 통해 IPMSM은 저속의 고토크 운전에 적합한 높은 토크밀도형이며, WRSM은 고속 운전에 적합한 높은 출력밀도형으로 구분된다. 참고로, 그림 12와 13은 고속 운전점 B에서의 철손 분포도를 나타내고 있는데, 두 모델 모두 대부분의 철손이 고정자에 분포하고 있으며 회전자에서는 공극 근처의 표면에서 국부적으로 발생하고 있다.

표 5 손실 특성비교

Table 5 Loss characteristics comparison

구분	IPMSM		WRSM	
	A	B	A	B
동손	1573.3 [W]	22.8 [W]	2022.1 [W]	87.6 [W]
철손	69.0 [W]	555.9 [W]	95.0 [W]	248.4 [W]
총손실	1642.3 [W]	578.7 [W]	2117.1 [W]	336.0 [W]
효율	83.0 [%]	89.6 [%]	79.1 [%]	93.7 [%]

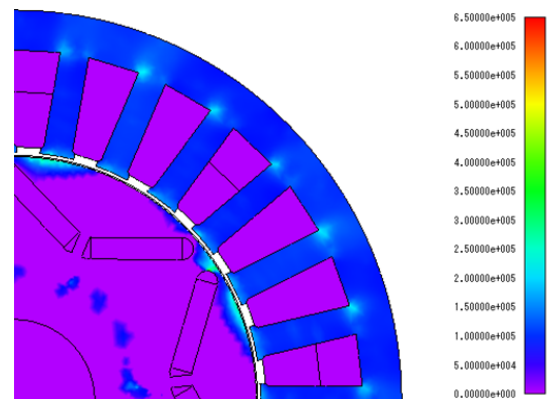


그림 12 운전점 B에서의 IPMSM의 철손 분포도  
Fig. 12 Iron loss density of IPMSM at the operating point B

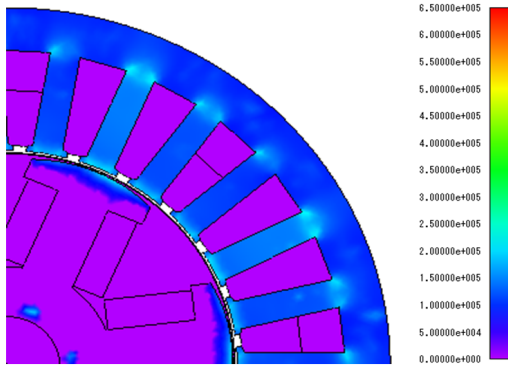


그림 13 운전점 B에서의 WRSM의 철손 분포도  
 Fig. 13 Iron loss density of IPMSM at the operating point B

### 3. 결 론

본 논문에서는 FEA를 통하여 특성해석을 기반으로 자동차 ISG용 WRSM의 설계를 수행하였으며, 특성해석 결과를 IPMSM과 비교 분석하였다. 제안된 WRSM은 차량의 소음 및 진동의 원인이 될 수 있는 토크 리플, 코깅 토크, 역기전력 THD, 철손 등에서 우수한 성능을 보였으며, 계자전류 제어를 통한 계자자속 조절에 따른 역기전력 특성변화와 약 계자 제어성 증대는 최대의 장점이다. 이를 통해, 회토티 영구자석을 사용하지 않는 측면에서, WRSM은 IPMSM의 대체 모터로 경쟁력을 갖춘 것으로 평가할 수 있겠다.

### 감사의 글

본 논문을 성균관대학교 전기기기 연구실 석사과정 故정윤호 군에게 바칩니다.

### References

- [1] J.W. Jung, S.H. Lee, G.H. Lee, J.P. Hong, D.H. Lee, K.N. Kim, "Reduction Design of Vibration and Noise in IPMSM Type Integrated Starter and Generator for HEV," IEEE Trans on Magn, vol. 46, no. 6, pp. 2454-2457, June, 2010.
- [2] J.H. Seo, S.M. Kim and H.K. Jung, "Rotor-design strategy of IPMSM for 42 V integrated starter generator," IEEE Trans on Magn, vol. 46, no. 6, pp. 2458-2461 2010.
- [3] J.E. Walters, R.J. Krefeta, G. Gallegos-Lopez and G.T. Faticc, "Technology considerations for belt alternator starter systems," SAE SP, pp. 101-108, 2004.
- [4] G. Friedrich and A. Girardin, "Integrated starter generator," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 15, no. 4, pp. 26-34 2009.
- [5] S. Lee, Y.S. Jeong, Y.J. Kim, S.Y. Jung, "Novel Analysis and Design Methodology of Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Using Newly Adopted Synthetic Flux Linkage," IEEE Trans. on

Industry Electronics, vol. 58, no. 9, pp. 3806-3814, Sept, 2009.

- [6] D. Lee; S. Lee; J.W. Kim; C.G. Lee; S.Y. Jung, "Intelligent Memetic Algorithm Using GA and Guided MADS for the Optimal Design of Interior PM Synchronous Machine," IEEE Trans. on magn, vol. 47, no. 5, pp. 1230-1233, May, 2011.
- [7] S.Y. Kwak, J.k. Kim, H.K. Jung, "Inductance and torque characteristic analysis of multi-layer buried magnet synchronous machine," KIEE Trans. Elect. Machinery Energy Convers. Sysy., vol.4-B, pp.211-216, 2006.

### 저 자 소 개



#### 이 동 수 (李東洙)

2010년 동아대학교 전기공학과 졸업, 공학사, 2011년~현재 성균관대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정



#### 정 윤 호 (鄭允昊)

2011년 동아대학교 전기공학과 졸업, 공학사, 2011년 ~ 2012년 성균관대학교 대학원 전자전기컴퓨터공학부 석사과정



#### 정 상 용 (鄭相龍)

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