

## 냉각 방식을 고려한 ISG용 6상 WFSM 전동기 설계 기법 연구

이강석\*, 김솔\*\*, 고성현\*, 채수황\*, 이주\*  
한양대학교\*, 유한대학교\*\*

### Considering cooling system, ISG 6Phase WFSM modeling analysis

Gang Seok Lee\*, Sol Kim\*\*, Seoung Hyeon Go\* , Soo Hwang Chae\*,ang Seok Lee\*  
Hanyang University\*, Yuhan University\*\*

**Abstract** - 회토티류 전동기의 경우 타 전동기 대비 성능이 우수하지만 회토티류 자원의 불안정성 및 가격으로 인하여 회토티류 전동기 대체 가능한 비회토티류 전동기의 개발이 활발히 진행 중이다. 비회토티류 전동기는 회토티류 전동기를 대신하여 현재 다양한 분야에서 사용되고 있으며 전장품 분야에서 활발히 연구가 진행되고 있다. 전장품용 전동기의 경우 열 및 냉각방식을 고려한 설계가 필수적이다. 본 논문은 냉각방식을 고려한 전장품 ISG용 WFSM 전동기의 설계 기법을 연구한다.

안 발전기로서 동작하여 엔진으로부터 에너지를 회수하여 배터리를 충전하고 각종 전자장비에 전원을 공급한다.

#### 1. 서 론

회토티류 자석을 사용한 영구자석 전동기는 다른 전동기들에 비하여 성능이 뛰어나고 효율이 높다. 하지만, 고출력 밀도의 핵심 소재가 회토티류의 생산이 편중되어 있으며 가격의 급등으로 인하여 비회토티류 전동기 개발의 필요성이 대두되고 있다[1]. 비회토티류 전동기는 설계 변화가 많고 설계 형상에 따라 특성 변화가 심하므로 설계 기법의 연구가 필요한 상황이다.

비회토티류 전동기는 다양한 분야에서 사용되고 있으며 전기 자동차의 관심이 증가함에 따라 차량용 전동기의 개발이 활발히 진행 중이다. 하이브리드 자동차에 적용되는 기술 중 하나인 ISG 전동기는 주로 회토티류 자석을 사용하고 있으나 비회토티류 전동기로 대체하기 위하여 영구자석을 사용하지 않는 WFSM 전동기개발이 진행 중에 있다[2].

차량용 전동기의 경우 고온의 환경에서 구동되고 있으므로 강제 공랭 및 수냉 방식의 냉각방식을 사용하고 있으며, 본 논문에서는 강제 공랭 방식을 고려한 ISG용 전동기의 설계 기법을 연구한다.

#### 2. 본 론

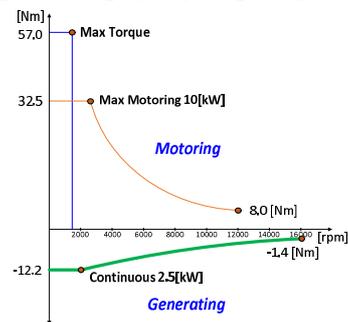
##### 2.1 차량용 ISG 전동기 요구 특성 분석



〈그림 1〉 ISG용 전동기 System

ISG용 전동기의 경우 전기 시스템 내에서 Starter & Generator로서 정지 상태에 있는 차량 내에서 짧은 시간 동안 큰 순시토크를 발생시켜 엔진을 Assist 하는 역할을 한다. 그 이후 차량 엔진의 부하로서 작용해 차량 운전 중 대부분의 시간동안

##### 2.1.1 차량용 ISG 전동기 요구 특성 분석



〈그림 2〉 ISG용 전동기 T-N Curve

그림 2는 ISG용 전동기의 T-N Curve를 나타낸다. 그림 1과 같이 ISG용 전동기의 경우 3가지 운전 영역(Starting, Motoring, Generating)을 가진다. ISG 전동기는 Starting 과 Motoring 운전 영역의 경우 2 sec, 20 sec의 운전 시간을 가지며 이외의 운전시간은 Generating의 역할을 수행한다. 운전 시간을 고려하여 Generating의 요구 특성(2000RPM 12.2 Nm, 16500RPM 1.4Nm)을 주요 설계 특성으로 선정하여 설계를 진행하였다.

차량용 전동기의 경우 고온의 환경에서 구동되어야 하므로 열을 고려 설계가 필수적이다. 열 문제를 해결하기 위하여 현재 차량용 전동기 시스템에서는 강제 공랭 및 수냉 방식의 냉각방식을 사용하고 있으며 강제 공랭 및 수냉 방식에 따라 전류밀도가 산정된다. 본 연구에서는 강제 공랭 방식을 선정 하였으며 이에 따라 전류밀도의 제한은  $4A_{rms}$ 로 선정한다.

냉각 방식에 따라 선정된 전류밀도는 주요 설계 특성이 Generating 운전 영역에 적용한다.

##### 2.2 3상/ 6상 전동기 비교

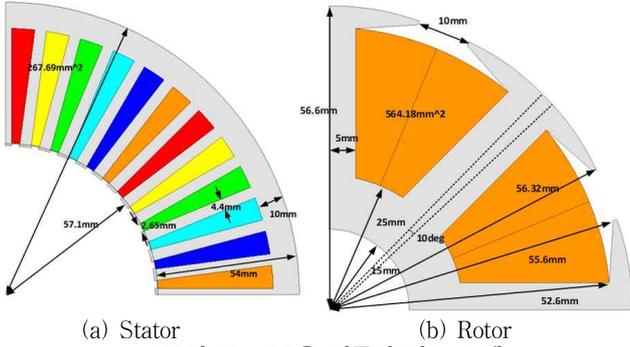
전동기에서의 발열은 권선에서 주로 발생한다. 발열량은 전류의 제곱에 비례하며 발열량 저감을 위해서는 전류밀도 저감 방법이 필요하다.

현재 산업에서 주요 사용되고 있는 전동기는 3상 구동이 주로 사용되고 있으며 요구 특성을 만족하기 위하여 6상 구동도 사용되고 있다. 6상 구동 시스템의 경우 더블 인버터를 사용하여 싱글 인버터를 사용하는 3상 구동 시스템보다 복잡한 단점을 가지고 있다. 하지만 동일 출력 특성을 가질 경우 아래의 식에서 나타내듯이 전류의 요구량이 저감되어 전류밀도 저감에 큰 효과를 기대할 수 있다.

$$3\text{상 구동 출력} : 3V_a I_a \cos\theta \eta_m = T_m \omega_m$$

$$6\text{상 구동 출력} : 6V_a I_a \cos\theta \eta_m = T_m \omega_m$$

### 2.3 기초 모델 설계



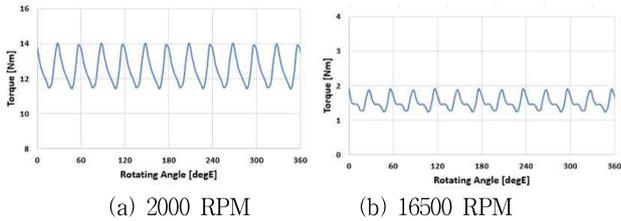
(a) Stator (b) Rotor

**<그림 3> ISG용 전동기 기초 모델**

**<표 1> ISG용 전동기 설계 파라미터**

	Value	Unit
Pole/Slot	8/48	
Stator diameter	224.2	mm
Rotor diameter	113.2	mm
Air gap length	0.5	mm
Shaft diameter	30	mm
Stack length	46	mm
Fill Factor(stator/rotor)	0.3/0.45	
Turn/Slot(stator)	20	turn
Turn/Slot(rotor)	106	turn

그림 3은 ISG용 전동기 기초모델을 나타내며 표 1은 기초모델 설계 파라미터를 나타낸다.

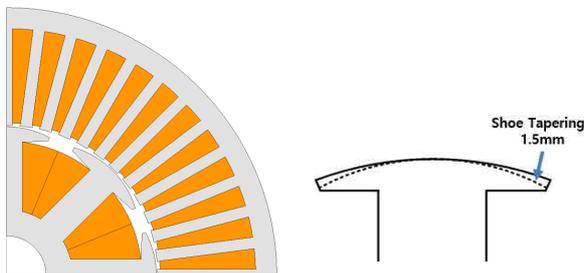


(a) 2000 RPM (b) 16500 RPM  
**<그림 4> ISG용 전동기 기초 모델 토크 특성**

그림 4는 2000RPM, 16500RPM에서의 기초모델 토크 특성을 나타낸다. 기초모델의 경우 요구 특성을 만족하는 토크 특성(2000RPM 12.56Nm, 16500RPM 1.51Nm)을 지나 높은 토크 리플(2000RPM 20.85%, 16500RPM 46.44%)로 인한 토크 리플 저감 설계가 필요하다.

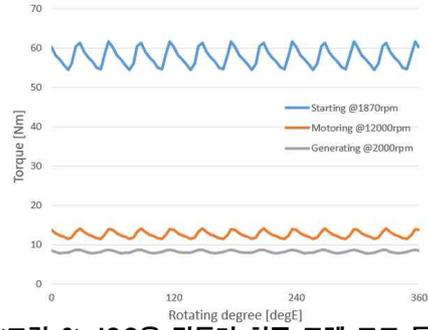
### 2.3 최종 모델 설계

토크 리플 저감 설계를 통하여 최종 모델 설계를 진행하였다.



**<그림 5> ISG용 전동기 최종 모델**

그림 5는 토크 리플 저감 최종 모델을 나타낸다. 토크 리플 저감을 위한 Tapering 구조는 고정자 shoe와 회전자 shoe에 적용 가능하며 본 연구에서는 회전자 Shoe tapering 설계를 진행하였다.



**<그림 6> ISG용 전동기 최종 모델 토크 특성**

그림 6전 최종 모델의 토크 특성 그래프를 나타내며 토크 리플 저감과 함께 요구 토크 특성을 만족한다.

**<표 2> ISG용 전동기 특성**

	Starting	Generating		Unit
Speed	1870	2000	16500	RPM
Stator current	190	52	28	$A_{rms}$
Rotor current	40	9.5	7	$A_{rms}$
Stator current density	12	3.3	1.8	$A_{rms}/mm^2$
Rotor current density	17	4	3	$A/mm^2$
Torque	57.5	12.5	1.4	Nm
Torque ripple	8.1	7.4	8.1	%

표 2는 ISG 전동기 최종 모델 특성을 나타낸다. 표 2에서 나타내듯이 요구 토크 특성을 만족하였으며, Generating 운전영역에서 냉각 방식을 고려한 전류밀도 제한을 만족하였다.

### 3. 결 론

본 연구는 냉각 방식을 고려한 차량용 ISG WFSM 전동기 설계 기법을 연구하였다. 냉각 방식에 따른 전류밀도를 만족하기 위하여 전류 밀도 저감 효과가 있는 6상 구동의 전동기의 최종 모델을 설계하였다. 하지만 ISG 시스템의 경우 비교적 고온의 구동 환경에서 구동되므로 열-전자기를 고려한 추가적인 최적 설계가 필요하다. 강제 공랭 및 수냉방식의 경우 유체의 흐름을 고려한 열 해석이 추가적으로 필요하나 연구의 효율성을 고려하였을 경우 대체 방안을 통한 해석이 적합할 것으로 예상된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2018년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2018201010633A)

이 성과는 2016년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2016R1A2A1A05005392)

#### [참 고 문 헌]

- [1] 조운성, 유준열, 홍정표, “영구자석 보조 권선계자형 동기전동기 전기적 특성 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, 683-684, 2018
- [2] 박진철, 홍년환, 황성우, 채승희, 홍정표, “반응표면법을 이용한 ISG용 WFSM의 계자 유기 전압 및 토크 리플 저감 최적 설계”, 대한전기학회 학술대회 논문지, 806-807, 2015