

## 전동 골프카 구동용 매입형 영구자석 동기전동기 개발

오영진, 유성래, 김지현, 이인우  
(주) 효성 중공업 연구소

### Development of Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Golf Car

Oh Young Jin, Ryu Sung Lay, Kim Ji Hyun, Lee In Woo  
R&D center, Power & Industrial Performance Group, Hyosung co.

**Abstract** - Recently study on components for a electric golf car and a utility car driven by a electric motor has been performed actively, and the study on a drive motor, a inverter and a battery focuses on a small, light weight and high power density source to improve fuel efficiency using limited electric energy. Especially, since a utility car such as a golf car performance depends on initial acceleration and maximum speed capability, a drive system requires high power and large and wide operation area. This study therefore investigates on the interior permanent magnet synchronous motor with high power density and wide operation, and is verified with the test result after design and characteristic analysis is performed

상기의 식은 표 1의 전동 골프카 사양으로부터 전동기에 요구되는 성능을 계산하는 수식이며, 그 계산결과에 의한 전동 골프카용 구동시스템 및 전동기 설계조건은 <표 2>와 같다.

<표 2> 전동 골프카용 구동시스템 및 전동기 설계조건

구 분	단 위	값
정격 출력	kW	5.0
배터리 전압	V	72.0
운전속도 범위	rpm	0 ~ 4500
운전 시간	min.	30.0
정격 속도	rpm	1800.0
정격 토크	Nm	26.5

#### 1. 서 론

근래에 들어 전동기를 구동원으로 하는 전동 골프카나 유틸리티 카의 구성요소에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 구성요소 중에서 전동기에 대한 기술발전은 에너지 밀도가 높은 영구자석 재료의 개발과 더불어 전력변환 기술, 설계기술 분야에서의 발전, 그리고 영구자석 가격의 저렴화에 힘입어 고효율 및 고휘력 전동기를 실용화시키는데 걸림돌로 작용하였던 많은 점들이 해소되어 여러 형태의 전동기가 개발되고 있다. 특히 골프카와 같은 유틸리티카는 초기 가속능력과 최대속도가 골프카 성능을 결정하기 때문에 고휘력과 넓은 운전영역이 기본적으로 구성되어야 한다. 또한 골프카에 장착되기 위해서는 소형, 경량화 되어야 하며, 전지의 용량을 고려하여 고효율을 만족해야 하는 등의 많은 요구조건을 가지고 있다. 본 연구에서는 현재 차량 구동용으로 가장 활발한 연구가 이루어지고 있는 매입형 영구자석 동기전동기를 대상으로 설계 및 특성 해석을 수행하였으며, 부하시험장지에 의한 기본성능시험과 전동 골프카 실차에 의한 주행성능시험을 통해 개발품의 성능을 확인하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전동 골프카용 전동기 설계사양

골프카 주행환경은 평지 및 경사지에서의 토크 및 저항력을 고려하여야 하며, 따라서 골프카용 전동기는 중량, 속도, 등판각 등을 고려하여 정격, 등판, 최대 토크 등을 상정하여야 한다. 전동 골프카의 사양은 <표 1>과 같다.

<표 1> 전동 골프카 사양

구 분	단 위	값
총 중 량	kg	915
속 도	km/h	19
타이어 직경	mm	558
등 판 각	deg	13
감 속 비	-	10
감속기 효율	-	0.92

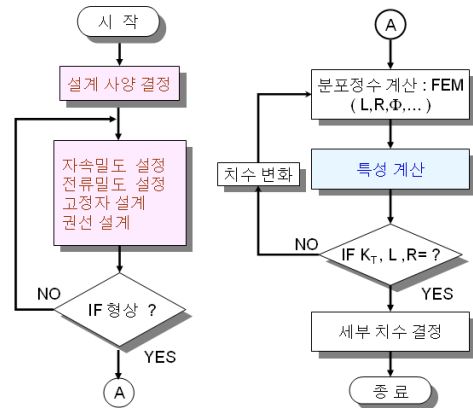
- 1) 등판토크 = 등판력 × 타이어 직경 ÷ [감속비 × 감속기효율]
- 2) 구름저항토크 = 구름저항력 × 타이어 반경 ÷ 감속비
- 3) 전동기 정격속도 = 감속비 × 속도 ÷ [60 × π × 타이어 직경]
- 4) 전동기 정격토크 = 출력 ÷ 속도
- 5) 전동기 최대토크 = 정격토크 + 등판토크 + 구름저항토크
- 6) 전동기 최대토크 시 속도 = 출력 ÷ 최대토크

##### 2.2 전동 골프카용 전동기의 전기설계

본 장에서는 영구자석을 회전자 속에 매입하는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor: IPMSM)의 설계 및 특성해석 내용을 나타내었다. 전동 골프카용 전동기의 요구 사양은 기저속도(Base speed)에서 정격 출력 5[kW]를 만족하고 4500[rpm]까지 속도확장이 필요하다. IPMSM의 초기설계는 회전자의 설계에 널리 이용되고 있는 장하 분배법을 이용하였으며, 세부설계는 수치해석을 이용하여 전자기, 구조, 열 특성을 고려하였다. 그리고 결과 검증 을 위해 부하시험 및 실차시험을 수행하였다.

##### 2.2.1 등가 자기회로법을 이용한 IPMSM의 초기설계

영구자석 동기전동기를 설계하는 방법에는 장하분배법과 퍼미언스법이 주로 이용된다. 퍼미언스법은 자속의 경로를 간단한 형태로 고려하여 등가 자기회로를 형성하여 극당 자속을 결정하는 방법으로 이는 회전자의 기본 치수가 결정되어야 적용 가능하다. 장하분배법은 출력과 용량이 결정되면 장하비에 의한 전기장하와 자기장하로부터 극당 자속의 비를 결정하고 출력과 용량을 만족하는 기기의 치수를 결정하기 때문에 회전자 치수가 결정되지 않아도 적용할 수 있다. 그러나 장하분배법의 경우 많은 가정을 수반하기 때문에 설계의 정밀도는 다소 떨어지지만 이는 수치해석적인 방법으로 보완이 가능하다. <그림 1>은 영구자석 동기전동기의 설계 과정을 나타내며, <표 3>은 초기설계 결과를 나타낸다.

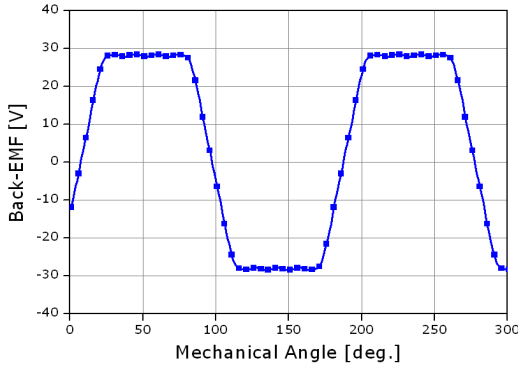


<그림 1> 영구자석 전동기 Design Process

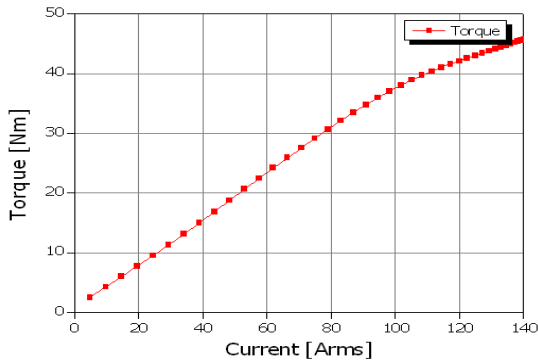
〈표 3〉 초기 설계 결과

구 분	단 위	값
영구자석 Br	T	1.25
고정자 외경	mm	165
적층 길이	mm	100

2.2.2 전자계 수치해석을 이용한 세부특성 계산



〈그림 2〉 정격속도 시 상 유기전압 특성



〈그림 3〉 입력 전류에 따른 출력토크 특성

〈그림 2〉는 초기 설계된 IPMSM을 대상으로 한 1상 유기전압 특성 해석 결과를 나타낸다. 해석결과는 정격속도인 1800[rpm]에서 26.01 [Vpeak]를 나타내었으며 이를 유기전압 상수로 환산하면 0.01445 [Vpeak/rpm]이 된다. 〈그림 3〉은 입력전류에 따른 출력토크 특성을 나타낸다. 회전자 초기각 60[deg]에서 최대토크를 나타내므로 이 각을 전동기 부하각으로 설정하고 전류에 따른 출력 토크 특성을 해석하였다.

〈표 4〉는 정격시의 전동기의 손실과 효율을 나타낸다. 동손의 경우 I<sup>2</sup>R 식을 이용하여 계산하였으며, 철손은 Steinmetz equation을 적용한 전자계 수치해석의 후처리 과정을 통해 계산하였다.

〈표 4〉 정격 운전 시 전동기 효율 특성해석 결과

구 분	단 위	값
동 손	W	65.2
철 손	W	203.0
총 손실	W	268.2
효 율	%	94.9

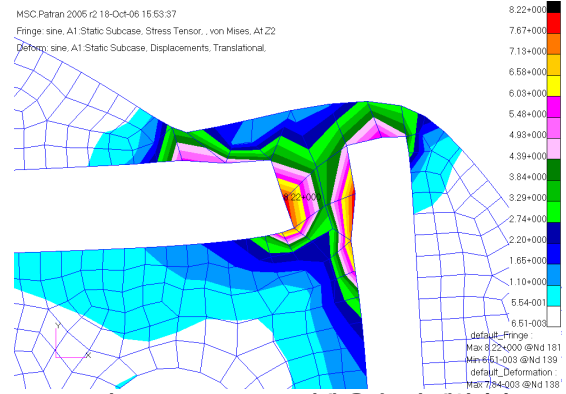
2.3 전동 골프카용 IPMSM의 구조 안정성 해석

회전자 구조강도 해석조건은 아래와 같으며 초기 입력 값은 인가토크 2.71[kg · m], 허용응력 270[Mpa]이다.

- ① 회전자 축 주위는 강제로 가정하고 고정경계조건을 적용
- ② 회전자 토크에 의한 하중이 ±45°,±90위치에서 최대로 발생하므로, 각 위치에 대해 load case 1, 2로 구분
- ③ 회전자의 회전력을 고려하지 않고 4500[rpm], 6750[rpm]의

원심력을 고려하였을 때를 고려하여 load case 3, 4로 구분

상기의 해석조건에서 정의한 Load Case 1에서 Load Case 4까지의 해석결과는 〈표 5〉와 같다. 해석결과 모든 경우에 대하여 안전율이 3.0 이상으로 회전자는 안정적인 구조로 설계되었음을 알 수 있다. 〈그림 4〉는 Load Case 1의 해석 결과에서 최대 응력부를 나타낸 것이다.



〈그림 4〉 Load Case 1 최대 응력부의 해석결과

〈표 5〉 회전자 응력해석 결과

구 분	최대 응력 [Mpa]	안전율
Load Case 1	82.0	3.3
Load Case 2	89.0	3.0
Load Case 3	38.7	7.0
Load Case 4	87.0	4.0

2.4 전동 골프카용 IPMSM 시험평가

설계 및 특성해석 결과를 바탕으로 시제품을 제작하여 특성시험을 통하여 설계의 타당성을 검증하였다. 운전특성 시험은 속도범위 200[rpm]에서 4500[rpm]까지로 하고 입력토크 범위를 5[Nm]에서 26.5[Nm]로 하였으며, 정격속도 이상의 약계자 운전영역에서는 출력을 정격 출력으로 고정하여 정출력 특성에 대한 특성시험을 수행하였다. 〈표 6〉은 정격에서의 운전특성 시험결과 중 효율특성을 나타낸다. 효율 특성의 경우 오차가 0.2%로 시험결과와 해석결과가 거의 동일함을 알 수 있다.

〈표 6〉 정격 운전 시 시험결과

구 분	단 위	값	
효 율	시험치	%	94.7
	계산치	%	94.9

3. 결 론

본 논문에서는 전동 골프카용 5kW IPMSM을 대상으로 장하분배법과 전동기 전자계 해석 및 회전자 구조강도 해석을 통하여 전기적 특성 및 회전자의 구조안정성을 계산하였고 그 결과를 바탕으로 시제품 제작 및 시험평가를 수행하여 설계 및 해석결과의 신뢰성을 확보하였다. 시험 결과를 보면 정격출력 효율이 설계치인 94.9%와 거의 동일한 94.7%라는 시험결과를 나타내었다. 이는 전동 골프카용 IPMSM의 개발에 있어 전자기적인 특성 뿐 아니라 구조 안정성 등 다양한 측면을 고려한 설계가 진행되어 보다 정확한 결과를 얻은 것이라 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] 이근호, 이지영, 홍정표, “42V 전동식 에어컨 시스템용 영구자석 매입형 동기전동기 및 드라이버 개발”, 대한전기학회논문지, 제54권6호, pp.269-277, 2005

[2] T.J.E. Miller. “Design of Brushless Permanent Magnet Motor”. Oxford:Clarendon Press, 1994-00-00.

[3] Gyu-Hong Kang,Jung-Pyo Hong(외 3인). “Improved parameters modeling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis”, in Proc. compumag 99. 1999-10.