

## 전기자동차용 매입형 영구자석동기전동기 및 제어기 개발

박정우\*, 구대현\*, 김종무\*, 김흥근\*\*

\*한국전기연구소, \*\*경북대학교

### Development of a Interior Permanent Magnet Synchronous Motor and Driver for 2-Motor Driven Electric Vehicle

Jung-woo Park\*, Dae-hyun Koo\*, Jong-moo Kim\*, Heung-geun Kim\*\*

\*KERI, \*\*Kyungpook National University

**Abstract :** This paper describes a development of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) and driver for electric vehicle (EV) which is driven by 2 motors without differential gear. A inverter is designed to drive 2 motors with 6 legs IGBT switches in a control board. Also vector control algorithm is implemented with maximum torque control method in the constant torque region and field weakening control method considering inverter capacity in the constant power region. Prototype IPMSM and inverter have been developed. To verify dynamic characteristics of the those about torque to speed and efficiency etc. We are making an experiment on that. Though that is not completed, we will show results to be acquired .

동되는 전기자동차와는 다르게 좌우 구동 바퀴에 전용의 전동기가 각각 구동을 담당하고 있기 때문에 독립적으로 좌우 구동륜을 제어를 할 수 있어 주행 특성을 개선시킬 수 있으며, 전동기 1대로 구동되는 전기자동차에서 필요로 하였던 차동기어(Differential Gear)와 동력전달 요소(Axle)를 제거할 수 있기 때문에 차체를 경량화시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 대상 차에 대한 사양이 결정되면 요구되는 속도대 토크 사양을 2대의 전동기로 분담하기 때문에 상대적으로 소형 전동기로 추진시스템을 구축할 수 있으며 궁극적으로 바퀴에 전동기를 내장하거나 부착하는 추진시스템 구축을 가능하게 하여 조밀 구조화가 가능해지고, 전동기에 의한 무게중심을 낮게 분산시킬 수 있는 장점을 갖고 있다.

따라서 전동기 2대 구동형 전기자동차를 전제로 하는 시스템 사양을 표1과 같이 정하고 이에 대한 전동기와 인버터 사양을 표2와 3으로 결정하였다. 이에 대한 전동기와 인버터에 시제품을 개발하였으며 이에 대한 실험 결과와 인버터에서 사용한 알고리즘을 소개하고자 한다.

### 1. 서 론

전기자동차는 배기 가스가 없고 저소음이므로 대기 오염을 방지 할 수 있으며 심야전력을 활용하여 충전 을 하게되면 전기에너지의 효율적인 이용 방안을 제시 해 줄 수 있는 장점이 있기 때문에 미국에서는 배출가 스를 규제하는 대기보전법이 만들어졌으며 캘리포니아 주에서는 2003년부터 연간 3000대 이상의 자동차를 판 매 할 경우 10%는 무공해 차량(ZEV)의 판매를 의무 화하고 있다. 유럽과 일본에서도 조만간에 유사한 대 기보전법을 도입할 것으로 예상되며 지구온난화 문제 와 도심의 공해를 해결하기 위하여 전기자동차에 대한 요소기술 개발과 보급을 위한 연구가 전세계적으로 진 행되고 있다.

전동기 2대 구동형 전기자동차는 전동기 1 대로 구

### 2. 매입형 영구자석동기전동기 설계

매입형 영구자석 동기전동기는 리럭턴스 토크를 이용할 수 있어 작은 회전자의 체적으로 큰 토크를 낼 수 있으며 효율이 높은 특징을 가지고 있다. 그 리고 자석을 회전자 안에 매입하므로 기계적으로 튼튼하여 전기자동차용으로 가장 적합하다고 판단 된다.

이에 대한 설계 과정을 요약하면 다음과 같다. IPMSM에 대한 설계 및 특성계산식이 복잡하기 때 문에 초기설계치수 결정은 SPMSM(Surface Type Permanent Magnet Synchronous Motor) 설계방법 을 이용하였다. IPMSM은 구조적으로 회전자에 얇 은 링크부를 가지고 있기 때문에 영구자석의 자속

이 고정자의 권선과 쇄교하지 못하고 링크부의 자로를 통하여 누설된다. 이 누설을 작게 하기 위하여 링크 부의 폭을 되도록 작게 하는 것이 바람직 하지만 전동기 제작시의 제작 상에 어려움이 있고, 고속 회전시 기계적 취약성으로 영구자석의 비산을 일으킬 수도 있으며, 영구자석에 의한 normal force 가진력으로 진동과 소음을 일으킬 수 있는 원인이 될 수 있다. 이러한 점을 고려하여 기계적 신뢰성의 안정성과 누설을 줄이기 위한 적절한 폭의 링크부를 설정하였다.

IPMSM의 설계시에는 영구자석 자기회로를 등가 전기회로로 바꾸어 공극의 자속밀도와 기자력을 구하였다. 즉, 영구자석에 의한 자기회로를 등가전기회로로 표현한 다음, 고정자권선은 정현적으로 분포하며, 링크부를 제외한 철심의 투자율을 무한대로 가정하여 철심표면이  $U_o$ 의 등가위면을 이루고 있다고 보았으며, q축은 대칭성에 의해  $U_1$ 의 자위를 갖는다고 보고 공극자속밀도를 계산하였다.

### 3. 제어 알고리즘

전기자동차의 가속성능을 가장 잘 발휘 할 수 있도록 정토크 영역에서는 단위전류당 최대 토크 제어 기법[ ]을 적용하였으며, 정출력 영역에서는 약계자 제어를 수행하여 최대 운전 영역을 확장하였다.

#### 3.1 정토크 영역에서의 제어

정토크 영역에서는 전압에 대한 포화는 일어나지 않으므로 전류제한치와 토크 식으로부터 단위 전류당 최대 토크 발생을 위한  $i_d$ ,  $i_q$  제어 관계식을 유도할 수 있다.

$$\begin{cases} T = \left(\frac{3}{4}p\right) (\psi_f i_{qs}^r + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r i_{qs}^r) \\ I_a = \sqrt{(i_{ds}^r)^2 + (i_{qs}^r)^2} \leq I_{am} \end{cases} \quad (1)$$

전류 제한 식으로부터

$$i_{qs}^r = \sqrt{(I_{am})^2 - (i_{ds}^r)^2} \quad (2)$$

이므로

$$\begin{aligned} T = & \left(\frac{3}{4}p\right) (\psi_f \sqrt{(I_{am})^2 - (i_{ds}^r)^2} \\ & + (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds}^r \sqrt{(I_{am})^2 - (i_{ds}^r)^2}) \end{aligned} \quad (3)$$

이다. 정토크 영역에서 단위 전류당 최대 토크 제어를 위하여  $i_{ds}^r$ 에 대하여 미분하면

$$i_{ds}^r = \frac{\psi_f - \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_{ds} - L_{qs})^2 (I_{am})^2}}{4(L_{qs} - L_{ds})} \quad (4)$$

$$i_{qs}^r = \sqrt{(I_{am})^2 - (i_{ds}^r)^2} \quad (5)$$

이다. 또는 속도제어기 출력인  $i_{qs}^r$ 을 이용하여  $i_{ds}^r$ 을 결정 할 때는 다음과 같다.

$$i_{ds}^r = \frac{\psi_f}{2(L_{qs} - L_{ds})} - \sqrt{\frac{\psi_f^2}{4(L_{qs} - L_{ds})^2} + (i_{qs}^r)^2} \quad (6)$$

#### 3.2 정출력영역에서의 제어

정출력 영역에서는 전압 제한조건에서 최대출력을 얻도록 제어하는 것이 인버터 용량을 고려한 적절한 방법이라 할 수 있다. 전압에 대한 제한 조건 식으로부터

$$V_a = \sqrt{(V_d)^2 + (V_q)^2} \leq V_{lim} \text{ (or } V_{am}) \quad (7)$$

이고, 정상상태의 전압방정식이

$$\begin{aligned} V_{ds}^r &= R_s i_{ds}^r + (-\omega_r L_{qs} i_{qs}^r) \triangleq R_s i_{ds}^r + V_{do} \\ V_{qs}^r &= R_s i_{qs}^r + (\omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \omega_r \psi_f) \triangleq R_s i_{qs}^r + V_{qo} \end{aligned}$$

$$\text{여기서, } V_{do} \triangleq -\omega_r L_{qs} i_{qs}^r$$

$$V_{qo} \triangleq \omega_r L_{ds} i_{ds}^r + \omega_r \psi_f \quad (8)$$

일때, 간소화를 위하여 고정자 저항에 의한 전압강하 성분을 무시한 항만으로 고려하면 전압제한식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$V_o = \sqrt{V_{do}^2 + V_{qo}^2} \leq V_{om} \quad (9)$$

$$\text{여기서 } V_{om} \triangleq V_{am} - R I_{am}$$

따라서  $V_{qo} = \sqrt{(V_{om})^2 - (V_{do})^2}$ 을 얻을 수 있고 이를 식 (8)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$i_{ds}^r = \frac{1}{L_{ds}} \sqrt{\left(\frac{V_{om}}{\omega_r}\right)^2 - (L_{qs} i_{qs}^r)^2} - \frac{\psi_f}{L_{ds}} \quad (10)$$

$$\text{여기서 } |i_{qs}^r| \leq \left(\frac{V_{om}}{\omega_r L_{qs}}\right), |V_{do}| \leq V_{om}$$

따라서 전류 벡터를 식(10)과 같이 제어하면 고정자 저항을 포함한 단자전압  $V_a$ 는 정상상태에서  $V_{am}$  보다 작도록 제어할 수 있다.

#### 3.3 제어영역의 결정 방법

q축 전류 기준치  $i_q^*$ 는 기준속도와 실제속도의 차이  $(\omega_r^* - \omega_r)$  값에 따른 PI 제어기의 출력 값으로 결정하고, d축 전류 기준치  $i_d^*$ 는 정토크 영역에서는 식(6)으로 결정하고 정출력 영역(약계자 영역)에서는 식(10)으로 결정한다. 그리고 두 제어영역의 결정은 다음과 같이 한다. 즉 기준속도(base speed)  $\omega_{base}$  보다 작은 영역에서는 ( $V_o < V_{om}$ ) 이므로 단위 전류당 최대 토크 제어 방식에 따라 d축 성분 전류를 결정하고, 영구자석에 의해서 생성된 역기전

력 성분  $\omega_r \phi_f$  값이  $V_{om}$  과 같아지는 임계속도  $\omega_c$  이상에서는 약계자 제어를 수행한다.

$\omega_{base}$  와  $\omega_c$  사이의 영역에서는 식 (9)에  $i_d$  계산 식 (6)와 d축 기준치  $i_d^*$  을 대입하여 구한  $V_{oc}$  을 기준으로,  $V_{oc}$  값이  $V_{om}$  보다 같거나 작으면 즉 ( $V_{oc} \leq V_{om}$ ) 이면 단위 전류당 최대 토크 제어를 선택하고  $V_{oc}$  값이  $V_{om}$  을 넘으면 약계자 제어를 수행하도록 선정한다.

#### 4. 결론

전기자동차용의 매입형 영구자석 동기 전동기를 제작하였다. 그리고 한 대의 제어보드에서 2대의 전동기를 구동할 수 있도록 인버터를 제작하였다. 이에 대한 시작품과 전동기 설계 파라미터를 보였다.

처음에 설계한 전동기에서는 최대 출력이 나오도록 설계를 한 관계로 너무 작은 리액턴스 값 때문에 약계자 제어에 의한 속도 확장에는 어려움이 있었으며 3000[rpm] 이내의 정토크 운전용으로 적합하다. 두 번째로 설계한 전동기는 최대 출력은 다소 떨어졌지만 약계자 제어 방식으로 최대속도를 12000[rpm]까지 확장이 가능하였다. 이때의 감속비는 9:1로 하였다.

인버터에서 사용한 제어 방식은 정토크 영역에서는 단위전류당 최대토크 제어기법을 사용하였으며 정출력 영역에서는 약계자 제어기법을 사용하였다.

#### 참고문헌

- [1] J.R. Hendershot Jr. and TJE Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors", magna physics publishing, 1994.
- [2] A. Levrán and E. Levi, "Design of Polyphase Motors with PM Excitation", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-20, No. 3, 1984.
- [3] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Expansion of operating limits for Permanent Magnet Motor by Current Vector Control considering Inverter Capacity", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol. 26, No. 5, PP. 866~871, 1990.
- [4] S.R. Macminn and T. M. Jahns, "Control Techniques for Improved High Speed Performance of Interior PM Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 27, No. 5, PP. 997~1004, 1991

표 1 전기자동차 설계사양

Item	Spec.
Vehicle	Total mass : 1656[kg] vehicle : 1186[kg] Battery : 400[kg] Driver : 70[kg]
Rated speed	3000[rpm] : 60 [km/h]
Maximum speed	7500[rpm] : 130[km/h]
Acceleration ability	0 → 100 [km/h] : 20 [Sec]
Rated bat. voltage	288[V]
Rated current	70~80[A]
Motor type and driving method	IPMSM 2-motor drive system
Gear ratio	6:1
Height from bottom	larger than 150[mm]

표 2 전동기

Motor Spec.	
Motor type	IPMSM
Cooling method	water cooling
insulation class	H class
Power density	0.3
material of PM	Nd-Fe-B

표 3 구동장치

Inverter spec.	
Power density	0.7 [kW/kg]
Efficiency	95 [%]
Switching frequency	10 [kHz]
Control method	Indirect vector control
IGBT	6 legs

표4 전동기 설계 파라미터

Parameter	Unit	1 차	2 차
Back-EMF per phase	[V]	97.06	52.08
Resistance per phase	{ $\Omega$ }	0.07106	0.0453
d-axis reluctance	[ $\Omega$ ]	0.056	0.3381
q axis reluctance	[ $\Omega$ ]	0.39048	0.9031
short circuit current	[A]	214.6899	107.7
phase current	[A]	56.6711	95.0
Input power	[kW]	17.1862	24.5
Output power	[kW]	16.5016	23.2
Efficiency	[%]	96.0163	94.99
Torque	[N.m]	52.5261	55.59
Synch. pull out torque	[N.m]	169.9440	90.3
max. power	[kW]	53.3895	37.9
Synch. pull out current	[A]	280.3040	215.7
Synch. pull out efficiency	[%]	76.1193	78.1

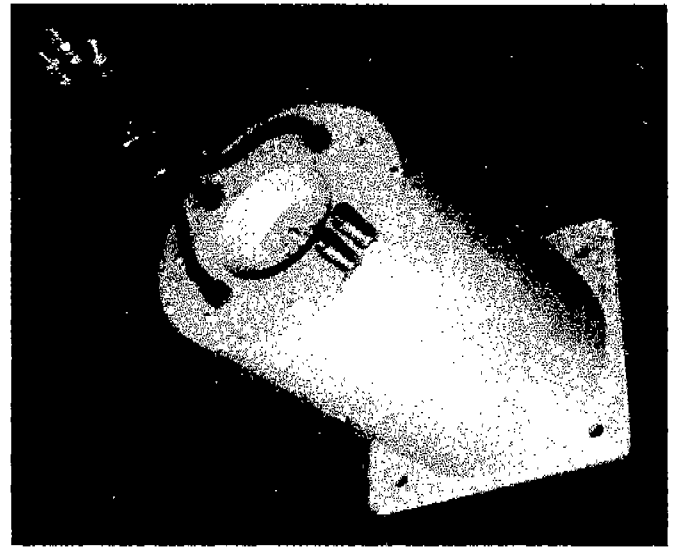


그림 2 매입형 영구자석동기전동기(시제품)

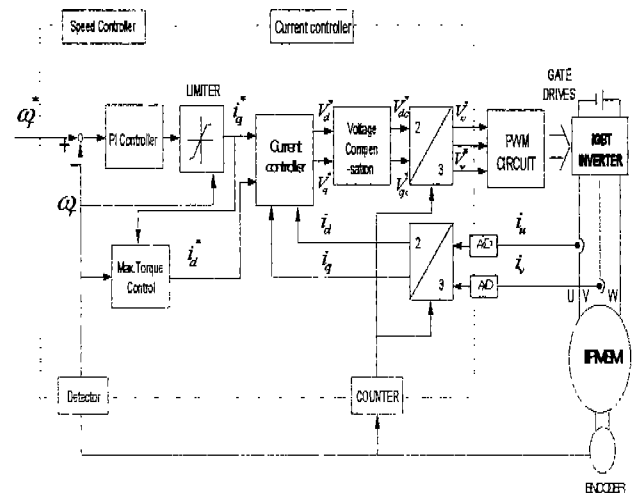


그림 3 최대 토크 제어기 구성도

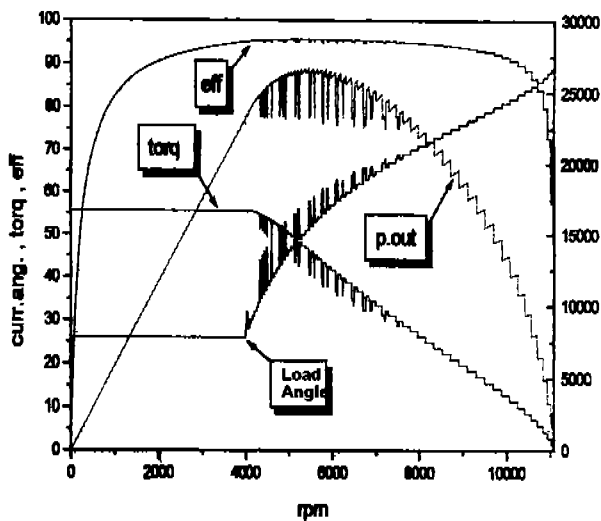


그림 1 속도에 따른 전동기 특성

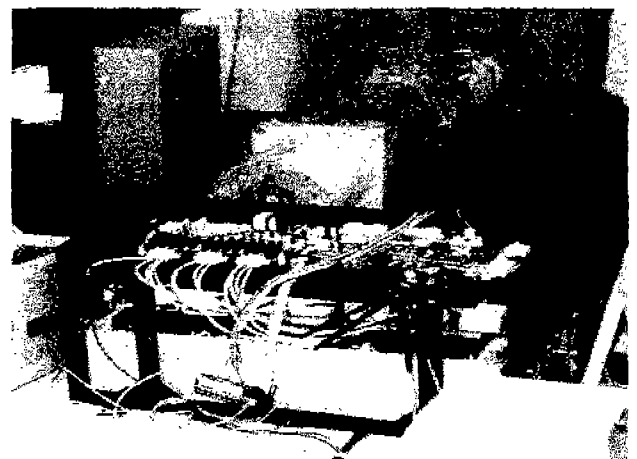


그림 4 전동기 구동장치(시제품)