

In-wheel 모터를 이용한 전기자동차 구동시스템의 구현

Implementation of In-wheel Motor Driving System for Electric Vehicle

윤시영* · 이주†
(Si-Young Yun · Ju Lee)

Abstract - In-wheel motor system gets the driving force from direct-driven motor in the wheel of electric vehicle. It is known as good system for vehicles, from an efficiency, packaging, handling and safety. This paper describes motor and inverter technologies, system configuration and control algorithms for in-wheel type electric vehicle. It is necessary to control on an interrelation perspective because this system drives two motors at same time. In system design, IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor) including a wide operating range and high-speed rpm is used and flux weakening control is performed in constant power range. Under the torque command from the host controller, auto control box, inverter's output torque is calculated with using torque estimation technique and applied to actual vehicle driving system. It is verified that the configuration and the algorithm are suitable for the in-wheel motor system.

Key Words : Electric vehicle, In-wheel motor, IPMSM, Vector control, Field weakening, Torque estimation

1. 서론

전기자동차는 동력원에 따라 배터리만을 사용하는 순수 전기자동차와 기존의 연료를 같이 사용하는 하이브리드 전기자동차로 나누며 모터 구동방식에 따라 인휠 타입과 인라인 타입 전기자동차로 구분한다. 전기자동차에 사용되는 인휠 모터 시스템은 기존의 인라인 모터 시스템과는 다르게 구동모터가 자동차 바퀴의 휠 안에 장착되어 있다. 인라인 타입은 보통 축에 연결되어 있는 2개의 바퀴를 모터 한 대로 구동하나 인휠 타입은 바퀴 하나를 모터 하나가 구동하는 독립적인 시스템으로 이루어져 있어 자동차의 추진력을 축을 통해서가 아닌 모터를 직접 제어하여 얻게 되는 방식이다. 인휠 타입의 전기자동차는 기존의 자동차에서 사용하였던 변속기, 축, 차동기어 등을 제거 할 수 있어 구조가 간단해 지고 차체를 경량화 시킬 수 있으며 에너지의 효율 증대를 가져 오는 장점이 있다[1-4]. 또한 모터를 직접 제어하여 토크를 얻기 때문에 빠른 응답성을 가지고 있으며 인라인 방식에 비해 향상된 주행 성능을 가능하게 한다. 특히 차량의 회전 시 각각의 독립적인 토크 발생이 가능하여 추가적인 기능 없이 차량의 안정성을 구현할 수가 있다.

하지만 인휠 모터 시스템은 모터가 바퀴마다 장착됨으로 인하여 모터와 피드백 센서의 개수가 많아져 시스템이 복잡해지고 제어와 제작상의 어려움, 제작비용의 상승 등의 단점을 가지고 있다. 또한 모터에 직접 충격이 가해지기 때문에 내구성이 떨어지는 불리한 점도 있다. 그러나 이러한 단점에도 불구하고 차량공간의 활용성, 디자인의 다양화를 지향

할 수 있어 세계적으로 폭넓게 연구가 진행되고 있다.

현재까지의 인휠 타입 전기자동차에 관한 연구는 대부분 기계적 관점에서 이루어지고 있거나 적용 모터 자체 또는 제어기의 단편적인 부분에 대해서만 진행되고 있어 인버터 통합시스템에 대한 구성과 제어에 대한 적용 연구가 미진한 상태이다[5]. 본 논문에서는 차량에 적용하기 위해 모터와 인버터 사양을 설정하고 이에 대한 특성 파악 및 제어기술을 설명하고자 한다.

전기적인 관점에서 보면 인휠 모터 시스템은 크게 배터리와 모터 그리고 인버터로 구성된다. 원하는 차량의 출력을 위해서는 적절한 모터의 선정이 필요하고 모터 구동을 위한 전력변환 하드웨어 구성과 제어알고리즘 소프트웨어가 필요하다[6]. 따라서 본 연구에서는 체적 당 고토크 및 고속 운전이 가능한 IPMSM(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)를 사용하고 인휠 모터 2개를 동시제어하는 인버터를 통해 시스템의 운전능력과 출력특성에 대해 분석한다. 만일 토크센서의 피드백이 없는 시스템 상태 하에서는 인버터가 출력토크를 지령에 맞게 내보내기 위해서 토크를 추정(Torque Estimation)하는 알고리즘 구현이 필요하다. 보다 정확한 토크 추정 계산을 위해 2중 선형 보간법(Bilinear Interpolation)을 사용하여 비선형구간에서의 L_d , L_q 파라미터를 산정하고 i_d 와 i_q 를 구한다.

IPMSM의 고속운전을 위해 정출력 구간에서 약자속제어를 하며 전류의 크기뿐만 아니라 전류 위상각을 함께 고려한 벡터제어를 사용하여 향상된 제어특성을 가지도록 한다.

2. 인휠 모터 시스템

2.1 시스템

인휠 모터 시스템의 구조가 그림 1에 나타나 있다. 바퀴에 모터가 각각 장착되는 부분을 제외하면 일반 전기자동차

† Corresponding Author: Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Korea

E-mail : julee@hanyang.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Received : April 18, 2013; Accepted : May 22, 2013

와 같은 구조를 가지고 있다. 내부 구성은 크게 배터리와 2개의 인휠 모터, 인버터, 상위제어시스템인 ABX(Auto Control Box), ECU(Electronic Control Unit) 등으로 구성된다. 여기서 ABX는 가속 페달과 브레이크 페달, 전·후진 신호를 입력변수로 하여 토크 명령값을 생성하며 인버터에 지령을 전달하는 기능을 가진다. 물론 ECU에서 ABX의 기능을 가지도록 할 수 있지만 본 연구에서는 중간 매개 역할을 하는 ABX unit을 두어 진행한다.

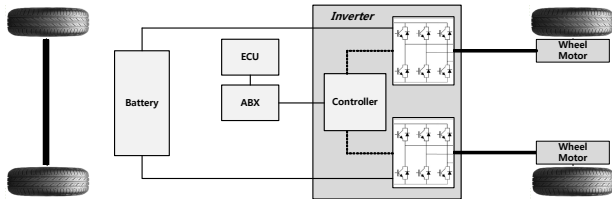


그림 1 인휠 모터 시스템의 구조
Fig. 1 In-wheel motor system architecture

2.2 모터

인휠 모터 시스템을 구현하기 위해서는 큰 기동토크와 폭넓은 속도구간, 높은 출력밀도 등을 가진 모터가 요구된다. 이에 대한 요구를 만족시키기 위해 적절한 모터의 선정이 필요하다. 또한 인휠 시스템은 모터가 바퀴에 장착되기 때문에 작은 중량을 가지는 것은 기본적으로 요구되는 사항이다. 전기자동차에는 보통 DC모터와 BLDC(Brushless DC)모터, PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor), 유도기 등이 사용되고 있으나 현재 가장 많이 사용되고 되는 것은 영구자석 모터이며 그 중에서도 고효율 및 고속회전에 큰 장점을 가지고 있는 IPMSM이 주로 사용되고 있다[7].

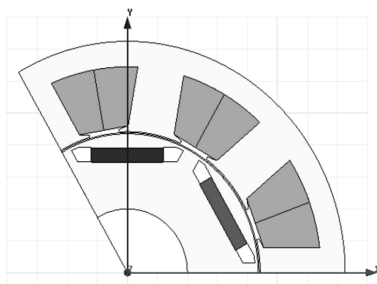


그림 2 3상 6극 IPMSM
Fig. 2 IPMSM with 3phases 6poles

본 논문에서는 전기자동차 중 소형자동차를 대상으로 하며 최대출력 16.4[kW]로 하는 3상 6극 IPMSM을 이용하여 연구를 진행한다. 모터의 전기적 설계사양은 FEM(Finite Element Method)을 이용한 전자기 해석을 통해 결정한다. 그림 2는 연구에 이용한 모터의 단면도이다.

표 1은 모터의 전기적인 사양을 나타낸다. 모터의 정격속도는 2,800[rpm]이며 최대속도는 12,100[rpm]이다. 기저속도(Base Speed) 이하에서는 정토크 운전을 하고 기저속도 이상의 정출력 구간에서는 약자속 운전을 한다. 모터의 실제 출력을 확인하여 설계 시뮬레이션 값과 비교 검토한다.

표 1 모터의 전기적 사양

Table 1 Specifications of motor

항목	단위	사양
극수/슬롯수	-	6/9
상 저항	mΩ	10.3
입력전압	Vdc	330
정격출력	kW	5.8
정격토크	Nm	19.8
정격속도	rpm	2800
최대출력	kW	16.4
최대출력	Nm	56
최대속도	rpm	12100

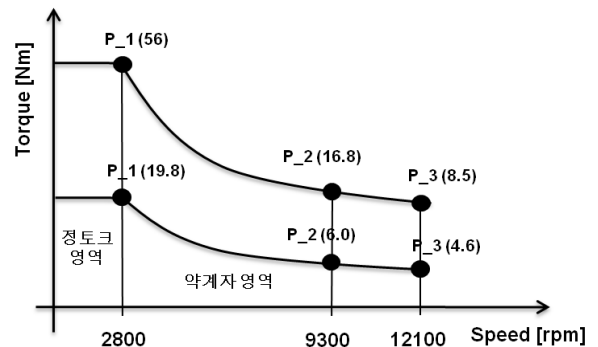


그림 3 모터의 T-N 곡선
Fig. 3 T-N curve of motor

그림 3은 모터의 속도 대 토크 곡선을 나타낸다. 구간별로 정토크 영역과 약자속 제어구간인 정출력 영역이 표시되어 있으며 출력사양에 따라 정격출력과 최대출력이 나타나 있다. 각 지점에서의 값은 출력토크를 나타내고 최대토크는 56[Nm]이며 최대출력은 16.4[kW]이다. 여기에 나와 있는 속도 12,100[rpm]은 모터가 낼 수 있는 최고속도 사양을 나타낸다.

모터의 구동은 보통 정격구간에서 이루어지지만 단시간 정격구간인 최대출력의 구간에서도 사용해야 한다. 정격 운전구간을 벗어난 영역에서는 모터나 인버터에 매우 높은 열이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 수냉식 또는 공냉식의 냉각시스템이 있어야 하며 제어기에서 온도측정이 가능하도록 하여 제어알고리즘에 반영하여야 한다.

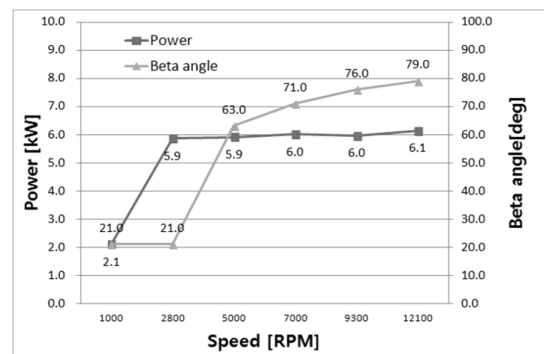


그림 4 FEM을 이용한 모터의 정격출력과 베타각(100℃)
Fig. 4 Rated power and beta angle characteristic using FEM(100℃)

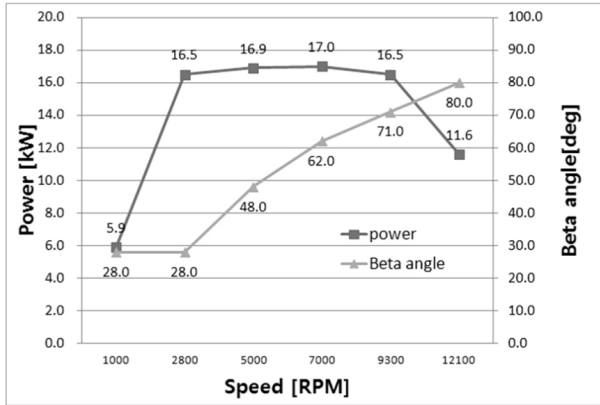


그림 5 FEM을 이용한 모터의 최대출력과 베타각(100℃)
 Fig. 5 Maximum power and beta angle characteristic using FEM(100℃)

그림 4와 5는 모터의 정격출력과 최대출력에 대해 FEM을 통해 계산된 100℃ 상태 하에서의 출력과 베타각을 나타낸다.

2.3 인버터

인버터는 크게 전원부와 제어부로 구성되어 있다. 전원부는 DC 배터리 전압을 사용하여 모터를 구동하는 부분이며 이 전압을 제어하여 모터의 입력으로 사용하게 된다. 전원모듈은 IGBT 및 필드커패시터, 전류센서 등으로 구성된다. 제어부는 하나의 제어보드와 두 개의 IGBT 드라이브 모듈로 구성되어 있으며 제어 보드는 게이트 보드를 제어하여 직류 전원을 교류전원으로 전력 변환을 하는 기능을 가지며 2개의 모터제어를 위한 3상 3-leg 2개의 IGBT 드라이브 모듈을 포함하고 있다.

본 연구에 사용한 방식은 각 모터마다 6개의 스위치를 사용한 3-leg 방식으로 모터를 각각의 드라이브 모듈이 담당하는 구조이다. 그러나 스위치를 줄이기 위해 특별히 5-leg를 이용하여 하나의 인버터 드라이브 모듈로 두 개의 바퀴를 동시에 구동시키는 회로를 제안한 논문이나 2상 동기기를 기본으로 하여 2상의 각 상을 풀 브리지 인버터로 구현하는 회로를 제안한 논문 등 다른 방식을 제안한 논문도 있다[8].

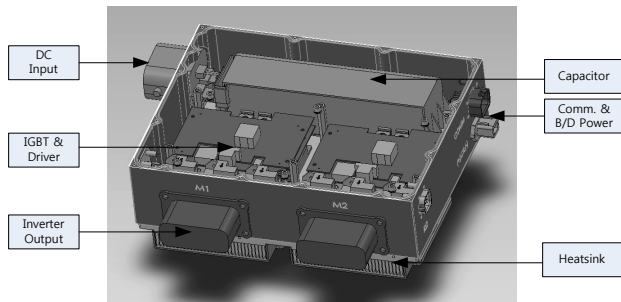


그림 6 인버터의 내부 구조
 Fig. 6 Structure of inverter

인휠 모터 시스템에 인버터의 내부 구조를 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보듯이 인버터는 하나의 CPU와 2개의 IGBT 드라이브회로, DC입력, 인버터 출력을 가지고 있다.

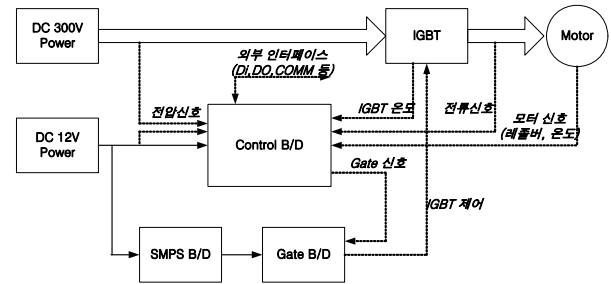


그림 7 인버터의 파워선 및 신호선
 Fig. 7 Power and signal line of inverter

그림 7은 인휠 모터에 사용한 파워와 신호선의 흐름도를 나타낸다. 컨트롤 보드는 게이트 보드를 통해 IGBT를 제어하며 모터를 포함한 외부 디바이스로부터 피드백 신호를 받는다. 이 신호에는 입력전압, 출력전류, 온도, 모터의 위치정보, 온도 등을 포함하고 있다. 인버터의 스위칭 주파수는 10[kHz]이며 벡터제어를 이용한 전류제어 알고리즘은 100us 마다 수행된다. 인버터의 전기적 사양이 표 2에 나타나 있다.

표 2 인버터의 전기적 사양
 Table 2 Specifications of inverter

항목	단위	사양
정격전압	Vdc	330
제어전원	Vdc	12
전압변동	Vdc	220~380
Derating 전압	Vdc	220
냉각방식	-	강제공냉식
제어방식	-	토크제어
제어조건	-	2축제어

3. 제어 알고리즘

교류전동기를 운전하는데 있어 주로 사용하는 방법으로 벡터제어가 있다. 본 논문에서는 전압과 전류, 자속 등을 d, q축으로 분리하여 제어를 하는 벡터제어 방식과 전류위상각을 이용하여 최대토크를 이용하는 방식을 사용한다. 인버터는 100us 주기로 전류제어를 수행하고 출력전류나 토크에 포함된 고조파가 다른 변조 방식보다 적은 공간 벡터 전압 펄스 폭 변조(Space Vector PWM) 방식을 이용하여 구현한다.

인버터는 상위제어기의 토크 지령에 따라 이에 대응하는 전류와 전류위상각을 계산한 후 제어를 통해 출력을 내보내게 된다. 지령을 전류의 형태가 아닌 토크의 형태로 받을 경우 토크를 전류 값으로 바꿔 줘야 한다. 모터에 토크센서가 장착되어 있을 경우는 이 값을 피드백 받아 제어를 수행하면 되지만 시스템이 토크센서를 가지고 있지 않은 경우에

는 인버터는 자체 계산에 의해 토크 값을 계산하여야 한다.

토크를 계산하는 방법에는 크게 실험적 데이터에 의한 것과 토크 추정 기법에 의한 방법이 있다. 실험적 방법은 M-G(Motor-Generator) Set 등을 이용한 전류 크기 및 위상각에 의한 토크 데이터를 추출하는 방법으로 토크를 발생시키는 데에 정확하다 할 수 있다. 그러나 전 구간의 데이터 표본 추출이 필요하고 전류위상각의 변화가 큰 약자속 구간 같은 곳에서는 데이터의 샘플링 간격에 따라 정확도에서 큰 차이가 난다. 토크를 추정하는 방법에는 General Torque Equation (GTE), Flux estimation with Compensation Scheme (FCS), Sliding Mode Observation (SMO), Model Reference Adaptive System (MRAS) 등이 있다[9]. 제일 간단하고 계산량이 적은 방법으로 일반적인 토크 추정기법(GTE)을 들 수 있다. 영구자석의 쇠교자속의 값과 d축, q축 인덕턴스 값을 상수로 하여 토크를 계산하는 방법으로 계산이 간단하나 인덕턴스 변동에 대한 오차율이 존재한다. 본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 계산된 파라미터를 가지고 일반적 토크 추정기법을 이용하여 토크를 계산하고 오차율을 최소화하기 위해 각각의 구간에서의 인덕턴스 값을 적용한다.

3.1 IPMSM의 토크 방정식

IPMSM의 전압과 토크 방정식을 d, q축으로 표현하면 다음의 식과 같이 된다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & r_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

여기서, v_d, v_q : d,q축 전압 i_d, i_q : d,q축 전류
 L_d, L_q : d,q축 인덕턴스 R_s : 상저항
 ω_r : 회전자 각속도 ϕ_f : 계자자속
 p : 미분연산자 P : 모터의 극수 T_e : 토크

3.2 정토크 구간에서의 토크 계산

IPMSM에서는 $L_d \neq L_q$ 이므로 릴럭턴스 토크가 존재하며 $L_d < L_q$ 이므로 식(2)에 보면 $i_d < 0$ 의 경우, 즉 음의 값을 가지는 d축 전류가 흐를 경우 릴럭턴스 토크가 영구자석에 의한 토크와 합쳐져서 출력 토크를 증가시킬 수 있다. 동일한 토크를 발생시키는 i_d, i_q 의 조합은 여러 가지가 있다. 그 중 i_s 가 최소가 되는 전류의 조합을 가지는 것이 최대토크 제어, MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 기법이라 하며 이것을 이용하여 제어를 한다.

고정자 전류와 i_d, i_q 의 관계식은 다음과 같다.

$$I_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \leq I_{s(\max)} \quad (3)$$

정토크 구간에서의 토크는 허용 가능한 최대전류 $I_s(\max)$ 에 의해서 제한된다. 따라서 전류제한영역 $I_s \leq I_{s(\max)}$

내에서만 고정자 전류가 존재하게 된다. 이는 토크를 증가시키기 위해 전압을 증가시키기에는 한계가 있다는 것을 말하며 최대전압에 도달했을 때 더 이상 고정자 전류를 크게 할 수 없다.

식(2)와 식(3)을 이용하면 i_d 에 대한 식(4)와 i_q 에 대한 식(5)를 구할 수 있다.

$$I_s^2 = i_d^2 + i_q^2 = i_d^2 + \left(\frac{T_e}{P_x (\phi_f + L_x i_d)} \right)^2 \quad (4)$$

$$I_s^2 = i_d^2 + i_q^2 = \left[\frac{1}{L_x} \left(\frac{T_e}{P_x i_q} - \phi_f \right) \right]^2 + i_q^2 \quad (5)$$

여기서, $L_x = L_d - L_q$, $P_x = \frac{P}{2}$

토크에 대해 최소의 d, q축 전류로 미분을 하여 0이 되는 해를 구하면 주어진 토크에 대한 최소의 d, q축 전류를 구할 수 있다.

d축 전류 i_d 에 대해 식(4)를 미분하면

$$2i_d - 2 \left(\frac{T_e}{P_x} \right)^2 (\phi_f + L_x i_d)^{-3} (L_x) = 0 \quad (6)$$

$$i_d (\phi_f + L_x i_d)^3 - \left(\frac{T_e}{P_x} \right)^2 (L_x) = 0 \quad (7)$$

q축 전류 i_q 에 대해 식(5)를 미분하면

$$-2 \frac{T_e}{L_x^2 P_x} \left(\frac{T_e}{P_x i_q^3} - \frac{\phi_f}{i_q^2} \right) + 2i_q = 0 \quad (8)$$

$$i_q^4 - \frac{T_e}{L_x^2 P_x} \left(\frac{T_e}{P_x} - \phi_f i_q \right) = 0 \quad (9)$$

식(8)과 식(9)와 같이 각각 i_d 와 i_q 에 대한 4차방정식이 된다. 제어주기 내에 방정식을 계산하여 전류 값을 구하는 것은 시스템의 상당한 부담요인으로 작용한다. 따라서 데이터 생성의 단순화와 편이성을 위해 i_d 와 i_q 를 실시간으로 계산하지 않고 미리 구하여 테이블화 하여 적용한다. 샘플링 사이의 값들은 2중 선형 보간법(Bilinear Interpolation)을 사용하여 구한다.

3.3 정출력 구간에서의 토크 계산

토크를 증가시키기 위해 전압을 증가시키면 인가할 수 있는 최대전압에 도달하게 된다. 이 지점이 기저속도가 되며 더 이상 토크를 증가시킬 수 없게 된다. 이 기저속도 이상에서는 정출력 구간으로 속도를 증가시키기 위해 약자속제어를 하여야 한다.

식(10)은 모터의 전압제한 조건을 나타낸다.

$$V_s = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \leq V_{s(\max)} \quad (10)$$

고정자 저항 성분의 전압강하를 무시하고 정상상태에서

정격의 d, q축 전류 I_d, I_q 가 흐르는 경우 v_d, v_q 에 관한 식은 다음과 같이 된다.

$$v_d = -\omega_r L_q i_q \quad (11)$$

$$v_q = \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f \quad (12)$$

$$(\omega_r L_q i_q)^2 + (\omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f)^2 \leq V_s^2(\max) \quad (13)$$

식(11), (12), (13)을 정리하여 i_d 에 대한 식으로 표현하면 식 (14)와 같이 2차식이 된다.

$$(L_d^2 - L_q^2)i_d^2 + 2L_d\phi_f i_d + \phi_f^2 + L_q^2 I_s(\max)^2 - \left(\frac{V_s(\max)}{\omega_r}\right)^2 = 0 \quad (14)$$

정격속도에서의 최대전류값 $I_s(\max)$ 를 구하고 전압과 전류 제한 조건을 모두 만족하는 i_d, i_q 를 구하면 식(15)와 식(16)으로 나타낼 수 있다. 여기서 i_d 의 값은 자속이 감소하는 방향으로 작용하여야 하므로 음의 값을 갖는다.

$$i_d = \frac{-L_d\phi_f + \sqrt{(L_d\phi_f)^2 + (L_d^2 - L_q^2)(\phi_f^2 + L_q^2 I_s(\max)^2 - (\frac{V_s(\max)}{\omega_r})^2)}}{(L_d^2 - L_q^2)} \quad (15)$$

$$i_q = \sqrt{I_s^2 - i_d^2} \quad (16)$$

4. 실험 결과

그림 8은 M-G Set 장비를 이용한 모터, 인버터의 부하 시험환경을 나타낸다. 제어기의 입력전원은 시험을 위해 배터리가 아닌 DC 전원공급장치를 사용하며 속도에 대한 토크 발생, 속도, 토크에 대한 전류위상각 시험 등을 수행한다.

그림 9는 최대출력에 대해 파라미터 보정을 통해 추정한 지령토크와 시험장치에서 측정된 출력토크를 속도-토크 곡선으로 표시한 것이다. 그림 10에서 보면 최대속도 부근에서 오차율이 크게 나타나는 것을 볼 수 있으나 이를 제외영역에서는 대체적으로 목표 오차율 5% 이내에 있는 것을 확인할 수 있다. 최대속도에서 오차율이 크게 나타나는 것은 전류위상각이 가장 크게 변화하는 지점으로 정확한 값을 구하지 못한 점과 토크가 상대적으로 작아 측정기기의 오차가 심하게 나타나는 실험적 요인으로 파악된다.

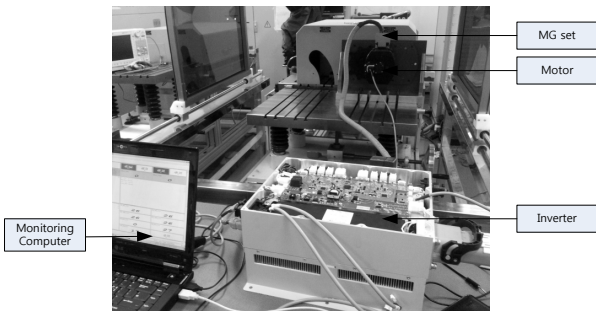


그림 8 M-G Set을 이용한 모터, 인버터 시험
Fig. 8 Motor and Inverter test using M-G Set

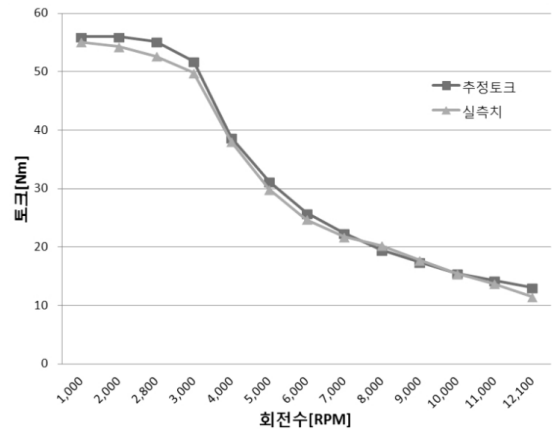


그림 9 최대부하에서의 T-N 곡선(추정토크, 출력토크)
Fig. 9 T-N curve on maximum load (estimation torque, output torque)

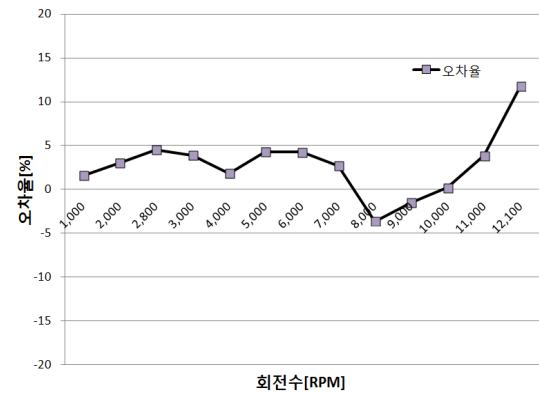


그림 10 속도에 대한 추정토크와 출력토크의 오차율
Fig. 10 Error rate of T-N curve on maximum load for estimation and output torque)

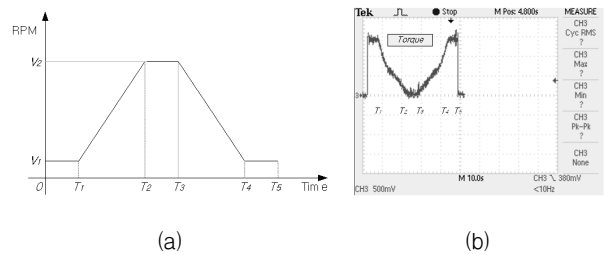


그림 11 (a) 가속속 프로파일 (b) 속도에 따른 최대출력토크
Fig. 11 (a) Acceleration/deceleration velocity profile (b) Maximum torque per velocity

그림 11은 전체 50sec 동안 최대 속도까지의 가속 운전 에 대한 출력토크를 나타낸다. M-G Set의 속도제어 하에 부하 profile을 생성한다. 이 시험으로 차량의 최대부하 상태에서 가속 시 토크 지령 대비, 출력토크의 오차율을 파악하였다. 측정 결과, 목표 사양 5% 이내에 만족한 값을 얻었으며 실제 차량에 장착하여 테스트를 진행하여 차량의 적용에 적합함을 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 인휠모터 구동시스템의 목표사양에 따른 모터와 인버터의 모델 구현과 시뮬레이션을 하였으며 실차 시험을 통해 성능을 확인하였다. 모터와 드라이버의 특성과 구동을 위한 토크 추정기법을 설명하고 출력을 확인하였다. 이러한 시스템 구조와 제어방법이 인휠 모터 시스템에 적용할 수 있음을 확인하며 최적의 시스템 연구에 도움이 되리라 사료된다.

차후 전기자동차의 약자속 운전 시 고정자 저항성분 전압을 고려한 연구가 계속적으로 필요하며 특히 IPMSM의 경우 부하와 운전속도에 따라 파라미터가 변동되는 특성을 고려한 제어기의 설계가 요구된다.

References

- [1] U-sok Chong, Beom-jin Jeon, Seung-ki Sul, Jin-hoon Jung, "A Study on the Control of 4WD EV", KIEE, pp.172-174, Nov. 1994.
- [2] Soo-Mok Lee, Yong-Min Jeong, Won-Yong Sung, Og-Jin Kim, and Byoung-Kuk Lee, "Advanced control-algorithm of In-wheel motor driving system for electric vehicle", KIEE, 2012.11, 348-350
- [3] Watts, A., Vallance, A., Whitehead, A., Hilton, C. et al., "The Technology and Economics of In-Wheel Motors," SAE Int. J. Passeng. Cars - Electron. Electr. Syst. 3(2):37-57, 2010.
- [4] King-Jet, T., and Chen, G.H., "Computer-Aided Design and Analysis of Direct-Driven Wheel Motor Drive", IEEE transaction on Power Electronics, Vol. 12, NO. 3, May 1997, pp. 517-519.
- [5] Youngchoon Choi, Chiman Park, Jeongmin Kim, Seoho Choi, Hyunsoo Kim, "Control Algorithm for a In-wheel Independent Drive Electric Vehicle", KSAE, pp.2054-2059, 2008.
- [6] J. Wai, T. M. Jahns, "A New Control Technique for Achieving Wide Constant Power Speed Operation with an Interior PM Alternator Machine", Industry Applications Conference, 2001.
- [7] Jain, M., "Suitability Analysis of In-Wheel Motor Direct Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles", Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE
- [8] B. Francois, A. Bouscayrol, "Decoupled control of two induction motors fed by a five-phase voltage source inverter", in Proceedings of the ElectrIMACS'99, vol. 3, Lisbon, September 1999, pp. 313 - 318.
- [9] Kheng Cher Yeo, "Comparison of Torque Estimators for PMSM", Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities, 14-17 Dec. 2008.

저 자 소 개



윤시영 (尹始永)

1993년 한양대 전기공학과 졸업, 1995년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 현재 동 대학원 박사과정, 1995~2000년 ㈜삼성중공업 중앙연구소, 현재 ㈜아이파워컨 부장



이주 (李柱)

1986년 한양대 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업, 1998~1993년 국방과학연구소 연구원, 1997년 일본 큐슈대학교 System 정보과학연구과 박사졸업, 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원, 1997년~현재 한양대 전기공학부 교수