

영구자석 매입형 동기전동기 적용 범용 구동 장치 개발

김윤현
한밭대학교 전기공학과

Development of Universal Drive System for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor

Youn-Hyun Kim
Division of Electrical Engineering, Hanbat University

요약 본 논문은 다양한 응용분야에 범용적으로 대응 가능한 IPMSM의 설계기법, 약계자제어 장점 활용 설계, 최적 로터 형상 설계, 제어 필수 파라미터 도출, MTPA, 최대출력 약계자제어, 최대효율제어 등의 고성능 토크제어 기술을 제공한다. 또한 시스템은 제어기 내장형 시스템으로 구성하여 컴팩트하고 유지보수가 용이하여 응용기기의 원가절감 및 제품의 경쟁력 강화를 도모할 수 있는 구조로 개발하였다. 본 논문에서는 IPMSM의 철손 해석과 인덕턴스 산출 해석 방법을 다루었으며 그에 따른 설계 절차를 제시하였고 더불어 벡터제어법과 고정투자율법의 인덕턴스 산정 방법의 비교 검토를 하여 IPMSM의 토크제어에 필요한 파라미터를 제공하였다. 또한 IPMSM의 범용 구동을 위한 시작기 모터와 구동 시스템의 설계 및 제작하고 토크 제어와 속도제어를 수행하여 92% 이상의 IPMSM의 효율과 최소전류최대토크 제어 및 최대출력제어가 유용하게 구현 가능하게 됨을 확인하였다. 또한 d축 q축 인덕턴스의 정확한 값과 약계자제어를 통해 넓은 출력 범위의 구동을 실현할 수 있음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 개발한 IPMSM 구동시스템은 전력소모 최소화 및 산업 현장에서의 전력공급 안정화 요구에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

Abstract This paper reports a high-performance torque control technique for IPMSM design, optimal rotor shape design, calculation of control parameters, MTPA control, field-weakening control, maximum efficiency control, etc. In addition, a system was developed into a structure that can reduce the cost and strengthen the competitiveness of products because it is compact and easy to maintain with a built-in controller configuration. This paper deals with the analysis of iron loss and inductance calculation of an IPMSM, presents a design procedure, and compares two kinds of inductance calculation methods to provide parameters necessary for IPMSM torque control. It was verified that IPMSM efficiency over 92%, MTPA control, and the maximum power control could be implemented after designing and manufacturing a test motor and a drive system for general-purpose use of an IPMSM. It was also confirmed that a wide output range can be realized through accurate values of the d-axis and q-axis inductance and field weakening control. Therefore, it is believed that the IPMSM drive system developed in this study could contribute to minimizing power consumption and stabilizing power supply at industrial sites.

Keywords : Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, Inductance Calculation, Field Weakening Control, Built-in Drive System, Maximum Torque per Ampere Control

*Corresponding Author : Youn-Hyun Kim(Hanbat Univ.)

email: yhyunk@hanbat.ac.kr

Received December 16, 2022

Accepted February 3, 2023

Revised January 30, 2023

Published February 28, 2023

1. 서론

현대 문명의 역사에서 전동기의 사용은 현재 우리가 살고 있는 산업사회의 각종 이기에 적용 되어 편리하고 안락한 삶을 영위하는 초석이 되었다. 우리 생활 전반에 걸쳐 다양한 종류의 동력을 필요로 하는 응용분야에서

무수하게 많은 전동기들이 사용되고 있는 현실에 있으며, 전동기는 현대 문명의 발전에서 빠질 수 없는 절대적인 요소로까지 평가되고 있다. 70년대까지는 주로 직류 모터가 상용화되어 사용되어 왔으나, 90년대에는 고성능 영구자석의 개발에 힘입어 일부 서보 드라이브에 응용되어 왔던 영구자석형 동기모터(SPMSM) 및 BLDC 모터가 OA기기로부터 가전 및 산업 응용분야에까지 적용 범위를 넓히며 서서히 기존 모터를 대체해 나갔다. 21세기 들어서는 영구자석 모터와 릴럭턴스 모터의 장점을 동시에 보유하여 현재까지 알려진 전동기의 종류 중에서 가장 효율이 높기에 다른 전동기에 비하여 체적당 고토크 및 고출력의 성능을 발휘할 수 있는 영구자석 매입형 동기모터(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor : 이하 IPMSM)의 개발과 상용화가 21세기 이후 급속히 부상하고 있다. 그 이유로는 IPMSM은 로터 내부에 자석이 고정되어있기 때문에 보호관은 불필요하여 고속 운전이 가능하고 그에 따른 효율이 향상되며 자석의 형상과 배치의 자유도가 크다. 또한 마그네트 토크와 릴럭턴스 토크를 공용하기에 고토크의 실현이 가능하고 약계자운전이 용이하여 운전속도의 범위가 넓며 역돌극성을 이용한 위치검출로 저속영역에서의 센서리스 운전이 가능하다[1,2].

그러나 IPMSM의 고효율, 고출력 성능이 인지되고 있으나 기술적 어려움과 기술적 인프라가 이루어지지 않아 개발이 구체화되지 않다가 저가격, 고성능의 영구자석의 개발과 자석을 코어로 매입하고 가공/생산하는 기술의 발전 및 그에 따르는 착자 기술 그리고 특히 복잡한 구동 제어 기술이 정립되고, 그 제어 기술의 구현이 가능한 고성능 DSP의 진보에 힘입어 일본, 미국 등에서 최근들어 더욱 활발하게 IPMSM의 개발이 이루어지고 있다[3,4].

따라서 세계시장에서 선진국의 기술에 종속되지 않기 위해서는 국내에서의 IPMSM의 설계 및 제조기술, 구동 제어 기술을 조기에 확보하여 가까운 미래에 더욱 발전된 형태로 도래할 제어용 서보를 바탕으로 한 지능형 자동화 산업생산 구조에서 기술적 우위를 선점할 필요성이 요구되고 있는 상황이고, 고효율 및 고출력 성능을 가진 IPMSM 서보 시스템을 개발하는 것은 매우 중요하다고

볼 수 있다. 또한 본 연구에서 개발하고자 하는 제어기 내장형(Smart) 서보 시스템은, 공간적인 필요 요소가 줄어들어 응용기기를 보다 컴팩트하게 제작할 수 있으며 유지보수도 보다 쉬워진다. 이는 응용기기 산업전반의 원가절감과 제품의 경쟁력 강화로 이어진다고 볼 수 있다. 더하여서, Smart형 시스템은 기존의 복잡하고 전문적인 지식을 요구하는 시스템 구성방법에 비하여 비교적 손쉽고 간단하게 설치 및 구성할 수 있으며 정형화된 운전 체계를 가진 Smart형 시스템은 서보 시스템의 일반화에 보다 더 기여하여 시장을 더욱 활성화할 수 있다고 판단된다. IPMSM은 일정 벡터각으로 제어하는 것이 아니라 영구자석토크와 릴럭턴스 토크의 합이 최대로 되는 벡터각을 속도와 전류 크기에 대해 조사하여 제어하는 가변 벡터각 전류제어를 수행해야한다. 가변 벡터각을 계산하는 전류벡터제어 알고리즘의 성능이 결국 전체 구동 시스템의 성능을 좌우하므로 본 연구의 중요한 핵심 기술이라 할 수 있다

IPMSM 구동장치의 개발을 위한 기존 연구는 영구자석의 형상 설계에 많은 역량을 집중하고 있으며 구동제어 기술은 실험 기반의 전류당 최대토크를 발생시키는 위상각 검출 및 검출값 기반 제어를 구현하고 있다. 반면 본 논문은 다양한 응용분야에 범용적으로 대응 가능한 IPMSM의 설계기법, 약계자제어 장점 활용 설계, 최적 로터 형상 설계, 제어 필수 파라미터 도출, 전류당 최대 토크 제어인 MTPA(Maximum Torque Per Ampere) 제어, 최대출력 약계자 제어 등 기존 연구 내용뿐만 아니라 IPMSM 구동장치의 실제 개발을 위해 필요한 종합적이고 핵심적인 기술을 정립, 제공하고자 한다.

2. 본론

2.1 IPMSM의 특성 해석 기법 개발

2.1.1 철손 해석 기법

IPMSM내의 자계는 다수의 시간 고조파를 함유한다. 특히 인버터 구동 시에는 더욱더 시간 고조파가 중첩되고 상당히 복잡한 변화로 된다. 이러한 고조파 자계에 의한 고조파 철손은 무시할 수 없을 정도로 크다. 따라서 본 연구에서는 이중 전동기 각 부분의 저속 밀도 파형으로부터 직접 철손을 구하는 Yamazaki가 제안한 방법을 이용하여 시간 고조파를 고려한 FEM의 철손을 해석하고자 한다[5].

Yamazaki의 철손은 우선 전자계 지배방정식과 전압

방정식을 연립하여 자기벡터포텐셜과 전류를 미지수로 하는 시간차분 유한요소법을 적용, 고조파 동손과 각 요소에서의 순시 자속 밀도를 구한다. 그 후 와전류손은 와전류손 계수를 이용, 히스테리시스손은 한 주기분에 해당하는 자속 밀도의 최대치 및 최소치를 찾아 저장한 후 히스테리시스 계수를 이용하여 구하게 된다. 철손 중 와전류손 W_{ie} 는 다음의 Eq. (1)로 표현 가능하다.

$$W_{ie} = \frac{k_c D}{2\pi^2} \int_{iron} \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left\{ \left(\frac{B_r^{k+1} - B_r^k}{\Delta t} \right)^2 + \left(\frac{B_\theta^{k+1} - B_\theta^k}{\Delta t} \right)^2 \right\} dv \quad (1)$$

여기서 Δt 는 데이터의 시간 간격이고 N 은 반복 횟수이다. 히스테리시스 손실은 Eq. (2)로 표현 가능하다.

$$W_{ih} = \frac{k_h D}{T} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{\Delta V_i}{2} \left(\sum_{j=1}^{N_{pr}^i} (B_{mr}^{ij})^2 + \sum_{j=1}^{N_{p\theta}^i} (B_{m\theta}^{ij})^2 \right) \quad (2)$$

여기서 \neq 은 철심에 포함되어진 총 요소 수이고, V_i 는 i 번째의 요소에 대응하는 체적이다. B_{mr}^{ij} , $B_{m\theta}^{ij}$ 는 각각 자속밀도 r 과 θ 성분에 해당하는 각 히스테리시스 루프의 진폭을 의미하며, N_{pr}^i , $N_{p\theta}^i$ 는 i 번째 요소에서 자속밀도 r , θ 성분의 시간 변화에 대한 극대극소치 개수이다.

2.1.2 인덕턴스 해석 기법

인덕턴스(L)를 계산하는 방법으로는 자속 쇄교법과 에너지 중첩법을 사용할 수 있다. 자속 쇄교법은 자기벡터 포텐셜 A 을 이용하여 쇄교 자속수(λ)를 구한 후 이를 여자 전류(i)로 나누어서 구하게 되는데 계산식은 다음과 같다.

$$\lambda = N\phi = N \int_s \vec{B} \cdot d\vec{s} = N \int_s (\nabla \times \vec{A}) \cdot d\vec{s} \quad (3)$$

$$= N \oint_c \vec{A} \cdot d\vec{l}$$

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (4)$$

여기서 N 은 권선의 턴 수이다.

2.2 IPMSM의 고효율 설계

2.2.1 설계 Flow

IPMSM의 초기 설계시 요구하는 특성을 빠른 시간안에 효과적으로 산정하기 위해서는 먼저 등가회로를 이용하여 Parametric Design으로 기동상태 및 정상상태 특성에 영향을 미치는 파라미터의 범위를 결정하고 그 파라미터를 만족하는 자기회로 설계를 수행한다. 고정자 및 회전자에서의 저항 및 누설리액턴스 성분은 집중정수를 이용하여 산정하여도 그 오차는 적다. 그러나, 매입형 영구자석 전동기의 회전자 링크부에서의 자기 포화 현상에 큰 영향을 받는 d-q축 인덕턴스, 무 부하 역기전력을 집중정수로 산정할 경우 상당한 오차를 포함하게 된다. 따라서 본 연구에서 d-q축 인덕턴스 및 무 부하 역기전력은 유한 요소 해석을 통하여 산정하며 이 때, 역기전력은 기동 시 발생할 수 있는 감자 특성을 고려한다. Fig. 1은 IPMSM의 설계 절차를 나타낸다.

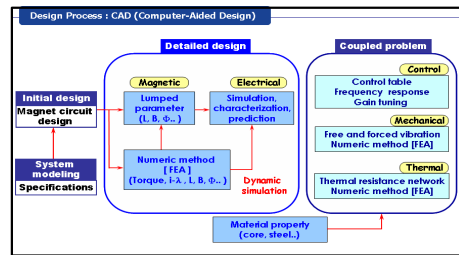


Fig. 1. Design Procedure of IPMSM

2.2.2 IPMSM의 특성 사양 및 설계 파라미터

750[W]급의 IPMSM 설계 모델의 역기전력, 코깅토크, 자속밀도 및 철손 등을 FEA 해석을 통해 분석하였다. Fig. 2는 역기전력과 코깅토크 파형을 보여주고 있다. 역기전력은 약간의 고조파가 포함되고 있지만 전반적으로 정현파를 유지하며 코깅토크는 60[mN-m]로 정격 토크 3.5[N-m]의 약 2% 정도로 양호하게 설계됨을 알 수 있다.

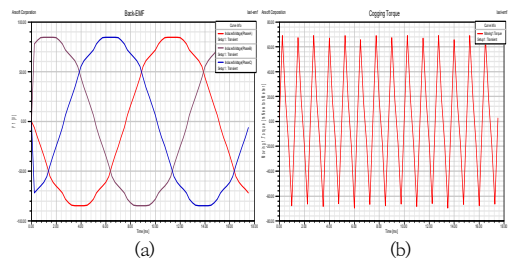


Fig. 2. Analysis waveform of designed model. (a) Back EMF (b) Cogging Torque

Fig. 3은 고정자의 자속밀도 분포를 보여주고 있다. 자속은 요크는 0.2[T]로 포화는 없이 낮은 편이나 치 부분의 자속밀도는 1.5[T]로 부분적 포화 예상된다.

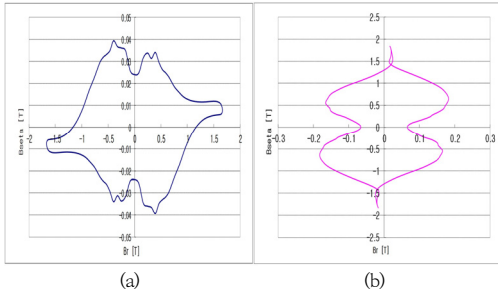


Fig. 3. Flux density of stator.
(a) Tooth flux (b) Yoke flux

Fig. 4는 IPMSM 해석 모델의 구조도를 Fig. 5는 해석 모델의 해석한 철손 분포를 보여주고 있다. 철손은 회전전자보다 고정자에서 대부분 발생하며 총 철손은 32[W] 정도로 동손과 비슷한 값을 가지며 출력의 5[%] 정도로 분석되었다.

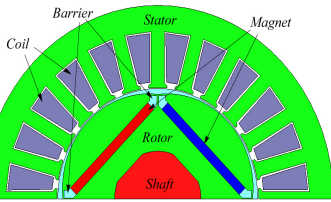


Fig. 4. Structure of IPMSM.

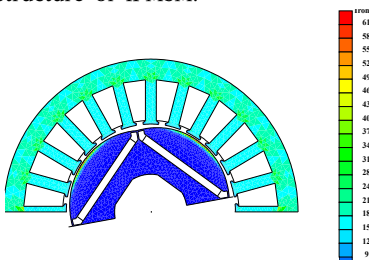


Fig. 5. Distribution of iron loss.

2.3 IPMSM의 인덕턴스 파라미터 비교

본 연구에서 벡터제어법과 고정투자율법 인덕턴스 측정법을 수행하여 두 방법의 유효성을 비교 검토하였다.

Fig. 6은 전류 5A에 대해 벡터제어법과 고정투자율법에 대한 비교 데이터를 나타내고 있다. 벡터제어법의 경우 전류 위상각이 증가함에 따라 인덕턴스 차 (L_q-L_d) 값이 고정투자율법에 비해 커짐을 알 수 있다. 여기에서

인덕턴스의 차 (L_q-L_d)가 크면 릴럭턴스 토크가 커짐을 나타내며, 릴럭턴스 토크가 커지는 것은 넓은 범위의 약 제자영역 및 고속 영역 운전이 가능하다.

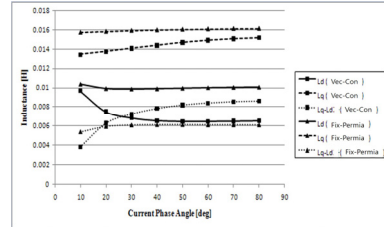


Fig. 6. Inductance comparison according to the phase angle.

Fig. 7은 전류위상각 20도에서 전류의 크기에 따른 해석방법에 대한 비교 데이터를 나타내고 있다. 보통 전류가 증가하면 고정자와 회전에 철심에 포화현상이 발생하여 d축 인덕턴스 L_d 값이 줄어든다. Fig. 7은 두 해석법 모두 d축 인덕턴스 L_d 가 줄어들음을 알 수 있다. 또한 포화현상으로 인해 인덕턴스 차(L_q-L_d) 또한 줄어들기 때문에 릴럭턴스 토크가 줄어들게 됨을 알 수 있다.

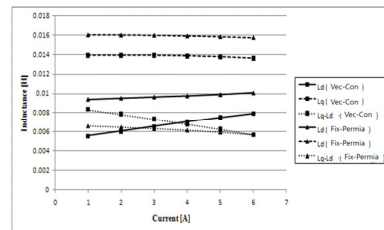


Fig. 7. Inductance comparison according to current.

2.4 범용 구동 제어기 개발

2.4.1 구동 인버터 전체 구성도

Fig. 8은 100[W] 도어 구동용과 0.75[kW]와 [1kW]의 서보 드라이브의 구동 인버터 전체 구성도를 나타내고 있다. 본 연구의 구동 인버터는 주요 핵심 소자인 CPU로 T.I사의 DSP인 TMS320 F28xx시리즈를 사용하였으며 그 내부에 있는 인버터 구동 PWM 신호 발생회로에 의해 발생된 PWM 신호는 파워부의 Gate 구동 회로를 거쳐 IGBT 모듈에 입력되어 IPMSM에 필요한 제어 전압을 인가한다. 모터의 속도/위치 정보는 IPMSM에 부착된 엔코더로부터 DSP에 입력되어 속도/위치를 검출하였고 전류는 전류센서값이 DSP의 A/D 컨버터에 입력되어 디지털 값으로 전환되어 제어기에 이용된다.

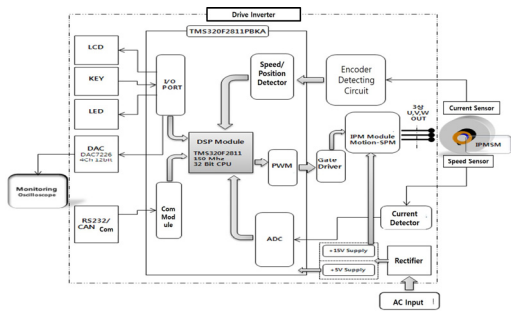


Fig. 8. Drive Inverter Configuration

Fig. 9는 구동 인버터의 H/W와 디지털제어기의 S/W의 연결 구성도를 나타내고 있다. 속도제어기와 전류제어기 그리고 IPMSM의 MTPA 토크 제어기 및 약계자제어기와 그에 필요한 속도, 위치 및 전류의 연산은 DSP TMS320F2811의 S/W 프로그래밍에 의해 구현하였다.

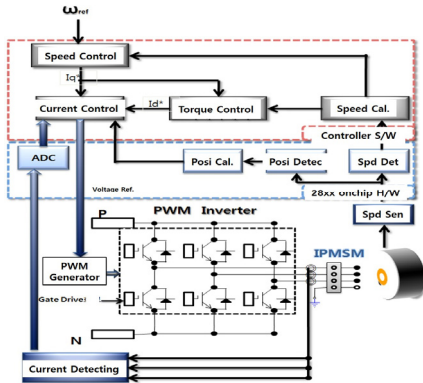


Fig. 9. H/W & S/W configuration of Inverter

IPMSM 구동 드라이버에서 TMS320F2811는 1msec 주기의 속도제어기와 100usec 주기의 전류/토크 제어기를 수행하였으며 고속 연산 처리 속도 능력에 의해 제어기 구현이 가능하면 그 외의 고성능 제어 알고리즘 구현을 위한 가능한 여유 연산시간을 확보할 수 있었다.

IGBT 모듈은 단전원 구동과 보호회로 기능이 내장된 페어차일드사에서 새로 개발한 SPM(Smart Power Module)인 FSBF10CH 60BT(도어 구동용 100W급)와 FSB20CH60(서보 구동용 0.75kW와 1kW급)를 사용하였다.

2.4.2 전류 제어기 개발

전류검출회로의 전류검출 센서는 ACS712소자를 사용하였다. ACS712는 185mV/A의 민감도 특성을 갖는

다. 즉, 전류가 ±13.5135(A)일 때 ±2.5V를 출력 한다. 따라서 ADC 최대 입력 전압 범위가 0~3[V]이므로 그림 38의 회로와 같이 5[v]를 3[V]로 낮추고 증폭회로에서 2배하여 입력하면 전류가 ±6.7565(A)일 때 0~3[V]로 ADC에 입력되고 12bit ADC에 의해 변환된 검출된 전류는 0~4095까지의 Digital 값으로 표현이 가능하다.

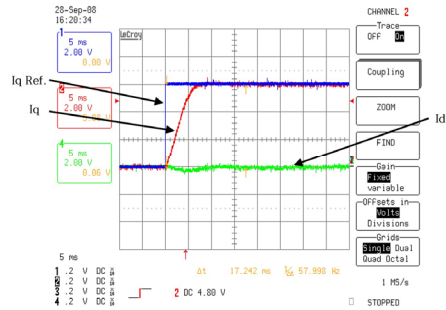


Fig. 10. Test waveform of current control

Fig. 10은 본 연구에서 제작된 IPMSM에 개발된 구동 인버터로 전류제어를 수행한 파형이다. 전류제어기는 PI 제어기로 구성되었으며 토크전류 Iq와 자속전류 Id의 제어가 원활히 동작함을 그림이 보여주고 있다.

2.4.3 속도 제어기 개발

본 연구에서는 IPMSM에 내장시킨 1회전에 2500 펄스의 엔코더를 부착하여 구동하였고 4채배 회로를 거쳐 1회전에 10000 펄스의 분해능을 가진다. 4극 IPMSM의 경우 전기각으로 1극 180도가 2500 펄스가 되므로 결국 0.072도의 위상 분해능을 가질 수 있다. 속도 검출회로와 M/T 방법의 속도 계산 방법을 이용, 시간 계산을 75MHz의 CPU CLKOUT 파형을 16분주하여 계산하면 다음과 같다.

$$Speed(Digital) = \frac{\Delta P}{\Delta T} \times Factor \quad (5)$$

모터 속도가 2000[RPM] 속도일 경우 1[msec]에서 ΔP는 333이고 ΔT는 4687이며 Factor를 215로 하면 실제속도 2,000[RPM]의 스케일한 디지털 속도값은 2330이다.

Fig. 11은 본 위치 검출 회로에 의한 위치 검출값에 의한 자극 위치의 코사인파형과 IPMSM의 역기전력 파형으로 두 파형의 위상이 잘 일치하여 본 개발 회로의 위치 검출이 잘 동작함을 알 수 있다.

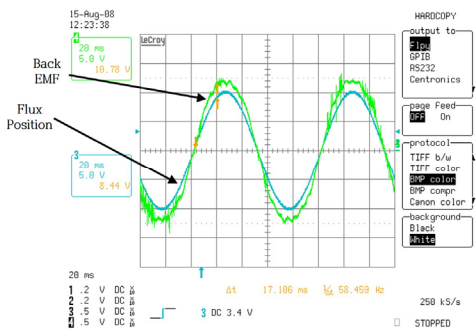


Fig. 11. Waveform of flux position & back EMF

Fig. 12는 본 연구에서 제작된 IPMSM에 개발된 구동 인버터로 속도제어를 수행한 파형이다. 속도제어기는 PI 제어기로 구성되었으며 그림과 같이 속도 제어가 잘 동작함을 알 수 있다.

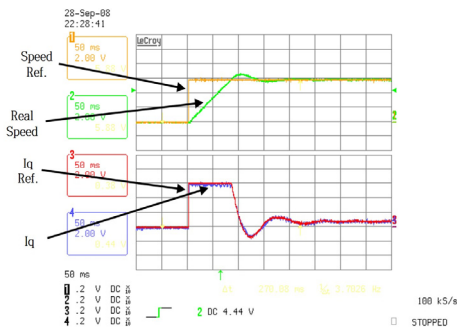


Fig. 12. Test waveform of speed control

2.4.4 MTPA 제어

Eq. (6)은 현재 가장 일반적으로 알려진 MTPA(최대 토크제어)의 식이다. 상기 그림 2의 토크제어기의 속도제어기 출력인 I_q 지령치를 아래 식에 대입하여 I_d 지령치를 만들어 전류제어를 수행하는 것이 MTPA 제어의 방법이다.

$$i_d = \frac{\Psi_a}{2(L_q - L_d)} - \sqrt{\frac{\Psi_a^2}{4(L_q - L_d)^2} + i_q^2} \quad (6)$$

Fig. 13은 MTPA 토크제어로 속도제어를 시뮬레이션 수행하였을 때의 속도와 토크 및 I_q , I_d 그리고 전류최대치 I_{max} 를 보여주고 있다. 2000[RPM], 3[N·m] 부하 시 전류최대치는 $I_d=0$ 제어의 5[A] 보다 적은 4.9[A]가 흐른다.

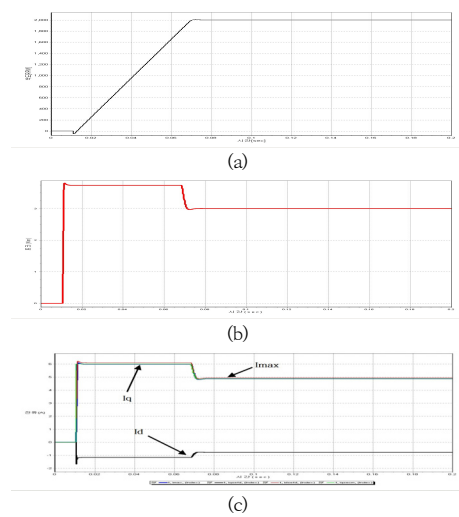


Fig. 13. Waveform of MTPA control
(a) Speed (b) Torque (c) Current

2.4.5 약계자 제어

본 논문의 제어 시뮬레이션은 3가지 제어법인 $i_d = 0$ 제어와 MTPA(최대토크/전류) 제어, 약계자 제어를 비교 분석하였다. 6[A]의 전류 제한과 80[V]의 전압 제한을 기준으로 하였다. 또한, 최대 출력 제어에 있어 정토크 영역과 정출력 영역의 기준이 되는 기저속도는 4,732[rpm]으로 하였다.

Fig. 14는 각 제어의 전류 특성으로 $i_d=0$ 제어는 3300[rpm]에서 포화가 됨을 알 수 있으며, MTPA는 5500[rpm], 약계자제어는 7500[rpm]에서 포화가 되어 약계자제어가 고속의 넓은 운전 영역을 가지고 있음을 알 수 있다.

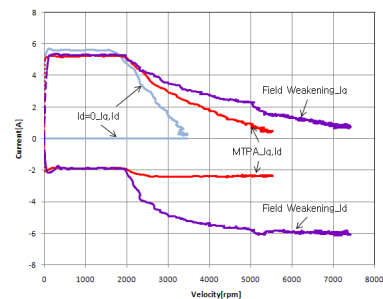


Fig. 14. Measurement of d and q-axis current of each control according to speed

Fig. 15는 각 제어의 토크 특성으로 토크리플에 의해 큰 폭의 변화가 있지만 토크 파형의 평균은 약계자 제어에서 가장 크다는 것을 알 수 있다.

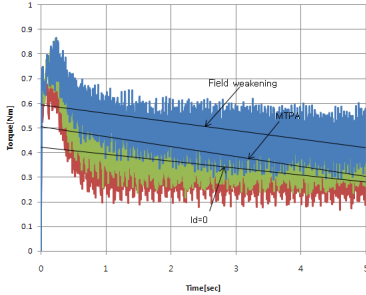


Fig. 15. Measurement of torque and comparison according to each control

2.5 IPMSM 범용 구동 장치의 제작 및 모터 특성 시험

Fig. 16은 본 연구에서 설계, 제작된 IPMSM의 실물 사진을 보여주고 있고, Fig. 17은 Smart 구동 장치에 장착 가능하도록 제작된 PCB 보드들의 전체 조립도를 보여주고 있다. 또한 Fig. 17은 모터와 드라이브를 일체형으로 구성하기 위한 Smart 구동장치의 구성과 결합된 모습을 보여주고 있다.



Fig. 16. Manufactured sample motor

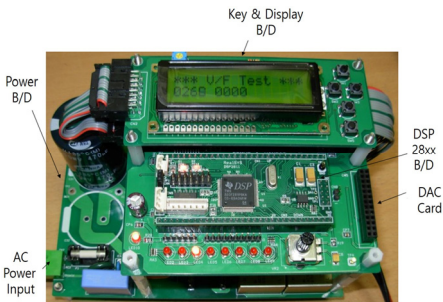


Fig. 17. Assembly Board

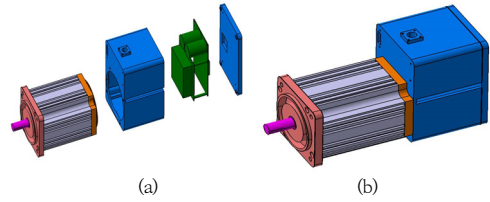


Fig. 18. Smart drive device module
(a) Separation drawing (b) Combined drawing

Fig. 19는 본 연구에서 설계, 제작된 IPMSM의 전류 위상각에 따른 토크 특성의 시뮬레이션과 시험 결과이다. 위상각 0도는 $I_d=0$ 인 경우이며 I_d 값이 음의 값을 가지면서 전체 토크는 증가하는데 이는 릴럭턴스 토크가 더해지면 생기는 현상으로 위상각이 15도 근방에서 최대 토크를 발생함을 알 수 있다.

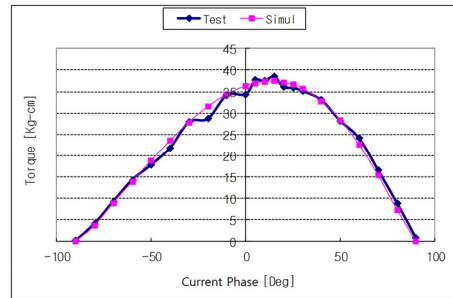


Fig. 19. Torque according to current phase

3. 결론

영구자석 매입형 모터는 영구자석 토크와 릴럭턴스 토크를 공용하는 모터로 현재 알려진 종류 중에서 가장 효율이 높은 모터로 인지되고 있으나 제어와 설계 및 양산성 등의 어려움으로 활성화가 늦어지고 있다.

논문은 IPMSM의 철손 해석과 인덕턴스 산출 해석 방법을 다루었으며 그에 따른 설계 절차를 제시하였다. 더불어 벡터제어법과 고정투자율법의 인덕턴스 산정 방법의 비교 검토를 하여 IPMSM의 토크제어에 필요한 파라미터를 제공하였다. 또한 IPMSM의 범용 구동을 위한 시작기 모터와 구동 시스템의 설계 및 제작하고 토크 제어와 속도제어를 수행하였다.

본 연구의 결과 효율 92% 이상의 IPMSM의 설계가 가능하였으며 전류당 최대토크 제어 및 최대출력제어가 유용하게 구현 가능하게 되었고 d축 q축 인덕턴스의 정

확한 값과 약계자제어를 통해 기존 Id=0제어 보다 전류 당 최대토크 제어는 약 60%, 약계자제어 기반 최대출력 제어는 약 120%의 증가된 넓은 출력 범위의 구동을 실현할 수 있음을 확인하였다.

따라서 본 논문에서는 영구자석 매입형 모터와 구동 드라이브의 고 효율화 연구 개발 및 제품화하여 서보 시스템에서의 불필요하고 낭비적인 전력소모 요소를 제거하고, 지속적인 증대요구가 예측되는 산업 현장에서의 전력공급 안정화 요구에 대하여 고효율 제품의 개발에 기여하고자 한다. 확보된 선진형 고효율 모터의 설계 및 제조기술 및 제어기술을 바탕으로 서보 산업계의 기술력을 한 단계 고양시키며 서보 응용 산업 전반에 걸쳐 제품 및 제조, 생산기술의 경쟁력을 강화할 수 있는 밑거름의 역할을 할 수 있을 것으로 사료된다.

김 윤 현(Youn-Hyun Kim)

[정회원]



- 1989년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 : 한양대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1989년 3월 ~ 1999년 2월 : LG 산전연구소 책임연구원
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한밭대학교 전기공학과 교수

<관심분야>

전기기기, 전력전자

References

- [1] S. K. Baek, H. K. Oh, M. H. Kwak, S. W. Kim, "A Design Method of Three-phase IPMSM and Clamping Force Control of EMB for High-speed Train", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 19, No. 4 pp. 578-585, 2018.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.4.578>
- [2] S. K. Baek, C. S. Jeon, "A Design Method Considering Torque and Torque-ripple of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Response Surface Methodology", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society Vol. 20, No. 6 pp. 557-564, 2019.
DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.6.557>
- [3] Z. Wu, G. J. Su, "High-Performance Permanent Magnet Machine Drive for Electric Vehicle Applications Using a Current Source Inverter", 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, p.p 2812-2917, Aug. 7. 2008 in USA.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758404>
- [4] J. S. Ko, J. S. Choi, D. H. Cjung, "Maximum Torque Control of IPMSM", IEEE , SICE-ICASE International join conference 2006, pp 18-21. Oct. 2006 in Bexco. Busan Korea.
- [5] K. Yamazaki, Y. Seto, "Iron loss analysis of interior permanent-magnet synchronous motors-variation of main loss factors due to driving condition", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 42, No. 4, pp. 1045-1052 July-Aug. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2006.876080>