

로봇용 IPM 모터 설계 및 제어기 개발

구본관, 최준혁, 김영균, 정인성
전자부품연구원

Research on IPM Motor Design and Fault Detection for Robot Wheel System

Bon-Gwan Gu, Jun-Hyuk Choi, Young-Kyoun Kim, In-Soung Jung
Korea Electronics Technology Institute

Abstract - 본 논문은 IPM 설계 시 인덕턴스 용량을 산정하는 방법과, 모터와 드라이브의 턴 폴트와 상 개방에 의한 고장 시 검출할 수 있는 방법을 제안하였다. IPM의 인덕턴스 용량 산정은 모터의 전압과 전압, 전류의 위상차를 이용하여 선정 하는 방법을 제시하였다. 고장 검출과 관련해서는 가장 일반적으로 많이 발생하는 코일 단락과 개방에 의한 전류의 왜곡 현상을 보기위한 실험 환경을 구성하였으며, 실험 결과를 통하여 전류 왜곡에 의한 고장 검출의 가능성을 제시하였다.

$$L_d = \frac{\Psi_o \cos \alpha - \Psi_a}{i_d} \quad (1)$$

$$L_q = \frac{\Psi_o \sin \alpha}{i_q} \quad (2)$$

그림 2는 인덕턴스를 구하는 과정을 도식화 하였다.

1. 서 론

생활의 편의성 향상과 삶의 질을 높이기 위해서 기계 산업, 가전산업 및 자동차산업 등 여러 분야에서 기계 유압식의 각종 에너지 변환기 및 각종 편의 장치들이 전기모터를 사용한 전동식 메커니즘으로 교체되고 있으며, 수요가 점차 늘고 있다. 이러한 전동식 메커니즘으로의 전환은 자연스럽게 로봇용 산업과 밀접하게 연결되며, 특히 중래에 군사 및 산업용으로 수요가 형성된 로봇산업은 고출력/고성능의 로봇제품 도약과 더불어 점차 인간의 실생활에 밀접한 지능형 로봇산업으로 그 수요가 형성되고 있다.

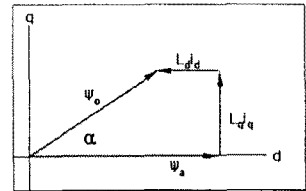
로봇을 구성하는 부품 중에서 로봇용 구동부품은 모터와 함께 드라이브로 구성되어 있다. 모터의 경우 사이즈가 작고 고출력의 IPM모터가 점차 일반적으로 적용되고 있으며, 드라이브는 고 신뢰성 확보를 위하여 고장 시에도 운전이 되도록 하는 고장 검출 및 대응 운전에 대한 연구개발이 활발히 진행 되고 있다.

본 연구에서는 로봇의 구동 휠에 사용되는 400W급의 IPM 모터의 설계 방법과 함께 발생 가능한 고장을 검출하기 위한 연구를 수행 하였다.

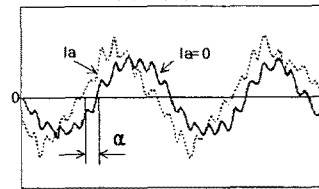
2. 본 론

2.1 해석적 기법을 이용한 IPM형 모터 설계 기술 연구

유한요소법을 이용하여 자속 채교법으로 인덕턴스를 산정하는 방법을 연구하였다. 고정자 권선의 U상에 무부하시 채교 자속과 부하전류가 흐를 때 채교 자속의 위상차를 이용하여 IPM형 모터의 인덕턴스를 구하는 방법이다. 그림 1(a)는 U상에 대한 채교 자속의 벡터 도를 나타내었으며, 그림 1(b)은 U상의 채교 자속을 구하기 위해서 부하 시와 무부하시 유기전압파형을 비교하여 나타내었다. 이때 두 유기전압파형의 위상차를 알 수만 있다면, 최종적으로 다음 식으로부터 IPM형 모터의 인덕턴스를 산출할 수 있다.



(a) 벡터도



(b) 유기전압파형

그림 1. U상에 대한 벡터도 및 유기전압파형

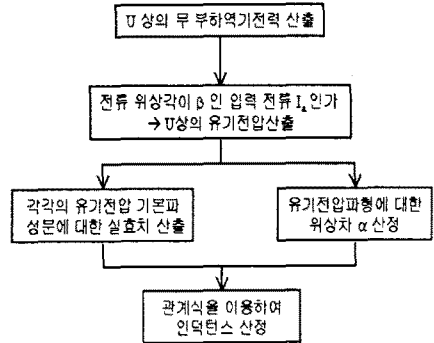


그림 2. 인덕턴스 산정과정

d,q축 전류와 전동기 입력전류와의 관계식은 다음과 같다.

$$I_a = \sqrt{3} I_e \quad (3)$$

여기서 I_a 는 인덕턴스를 통해 자속 발생하는 전류의 실효전류이고, I_e 는 상전류의 실효치이다.

U상의 유기전압으로부터 쇄교 자속의 기본과 성분의 실효치는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Psi_{uo} = \frac{V_w}{2\pi f}, \Psi_{um} = \frac{V_m}{2\pi f} \quad (4)$$

여기서 Ψ_{uo} 는 부하 시 유기전압 기본과 성분의 실효치, Ψ_{ua} 는 무부하시 유기전압 기본과 성분의 실효치, f 는 회전주파수를 각각 나타낸다.

이것으로부터 d q축 상의 기본과 성분의 쇄교 자속 실효치는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\Psi_d = \sqrt{3}\Psi_{ua} \quad (5)$$

$$\Psi_q = \sqrt{3}\Psi_{um} \quad (6)$$

식 (5), (6)을 식 (1), (2)에 대입하여 적정의 인덕턴스 값을 산출할 수 있다.

제시한 인덕턴스 산출 방법을 바탕으로 400W급 IPM형 모터 시작품을 설계 하였다. 표1에 400W급 IPM형 모터의 설계 사양을 나타내었다. 그리고 그림 3에 시작품 6극 9슬롯 단면도를 나타내었다.

표 1. 400W급 IPM형 모터 설계 사양

항목	Value	항목	Value
슬롯수	9slots	Rib 폭	1.0mm
극 수	6poles	Bridge 폭	0.75mm
정격 속도	3000rpm	정격 전류	12Arms
직렬턴수/상	36turns	코어 재질	S18
공극길이	1.0mm	영구자석재질	Nd소결(Br=1.2T)

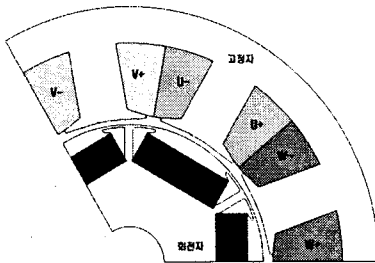


그림 3 1차 시작기 1/3 모델링 단면도

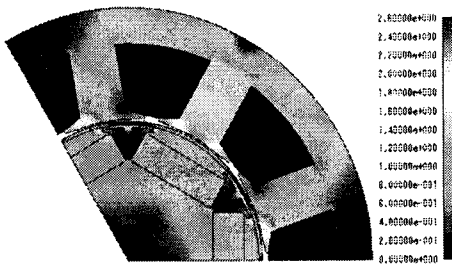


그림 4 무부하시 자속분포도

그림 4는 시작품의 무부하시 자속밀도 분포도를 나타낸다. 자속장벽과 인접한 링크 부분의 자속밀도가 2(T)이상으로서 충분히 포화가 되어 영구자석에 의한 발생자속이 공극으로 쇄교 하지 않고 인접하는 다른 극으로 누설되는 자속량이 최소가 되도록 설계를 하였다.

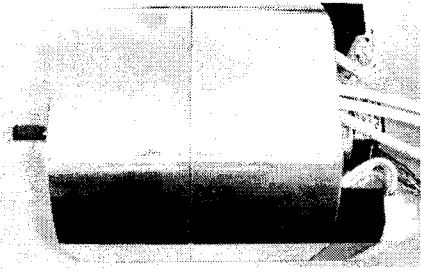


그림 5. 제작된 400W급 IPM형 모터

그림 5는, 설계를 바탕으로 모터를 제작한 결과이다. 모터 우측에는 외부에서 턴 폴트(Turn fault, 단락 실험)할 수 있도록 a상과 b상 코일에 각각의 1/16, 1/8, 1/4, 1/2의 턴 수 부분에서 외부로 탭을 내었다.

2.2 고장 환경 실험용 드라이브 및 실험 환경

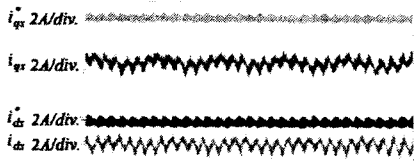
고장 시에 나타나는 실험 결과를 얻기 위한 드라이브는 TI(Texas Instruments)사의 TMS320F28335를 활용하였으며, 벡터 제어 방법을 이용하여 제어를 구현하였다. 전류제어기는 IP제어기를 적용하였으며, Bandwidth = 500Hz, Damping factor = 1로 선정하였다. Switching frequency = 10kHz, DC-link voltage = 42V로 설정하였다.

2.3 고장 발생시의 실험 결과

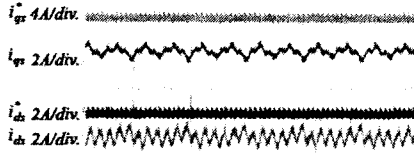
모터와 인버터의 고장 유형 중 가장 많이 발생하면서도 미리 감지하여 사고를 방지할 수 있는 고장은 모터 코일사이에 발생하는 턴 폴트와 인버터 암(arm) 개방 고장이다. 턴 폴트는 모터 코일이 열에 의해서 모터 고정자 코일 사이의 절연 층이 파괴되면서 서로 단락되어, 모터의 출력 뿐 아니라, 열 발생을 증가시킨다. 발생된 열은 시간이 지남에 따라 다른 정상적인 코일까지 절연 층을 파괴시켜 고장의 범위가 증가 하므로, 빠르게 고장을 검출하여 범위가 확대 되는 것을 막아야 한다. 두 번째로 인버터의 한 암(arm) 개방에 의한 고장은 세 상중 하나의 상에서 고장이 발생하여 전류가 도통되지 않는 상태이다. 고장의 발생원인은 모터 단선, 드라이브 스위치 파괴, 게이트 드라이브 고장, 케이블 단선 등으로 다양하게 나타난다.

2.3.1 턴 폴트의 실험 결과

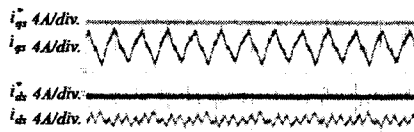
그림6은 턴 폴트시의 실험 결과를 나타낸다. (a)는 정상 조건에서, (b) 1/16 턴 폴트, (c) 1/8 턴 폴트시의 실험 결과이다. 속도는 2500rpm이며, 각각의 고장 상황에서 d-q 축의 전류 명령 치와 전류 응답 결과를 보여준다. 턴 폴트가 심해지면서, d-축의 전류 응답은 별다른 변화를 보이지 않지만, q-축의 전류 응답은 250Hz의 하모닉을 포함하고 있다. 이는 2500rpm의 전기각 속도인 125Hz의 두 배로 나타나고 있으므로, Negative sequence 전류 성분이 발생하였음을 알 수 있다. Negative sequence 전류 성분은 모터의 회전 방향이 아닌, 반대 방향으로 동일한 전기 각 속도록 일정한 크기의 전류성분이 회전하면서 생기는 성분이다. 일반적인 동기좌표계가 모터가 회전하는 방향인 Positive sequence만을 추종하므로, 반대 방향으로 회전하는 Negative sequence 전류는 기본 전기각 주파수의 두 배로 나타난다. 턴 폴트를 검출하기 위해서는 턴 폴트의 양에 따른 Negative sequence상의 전류 성분을 크기 및 노이즈 대비 신호 검출 능력에 따라 적정량을 선택하여 고장 검출 알고리즘을 작성할 필요가 있다.



(a) 정상 조건



(b) 1/16 턴 폴트



(c) 1/8 턴 폴트

그림 6. 턴 폴트 고장시의 실험 결과
(2500rpm, 5msec./div.)

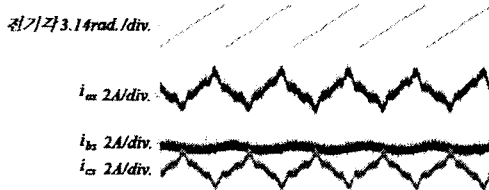


그림 7. b-상 개방 시의 실험 결과
(1000rpm, 10msec./div.)

2.3.2 암 개방 실험 결과

그림7은 모터의 a,b,c상 중 b상을 개방 되었을 때의 실험 결과를 나타낸다. 모터의 전기 각이 한 주기를 회전할 때, b상에 전류가 도통되지 않으므로, a상과 c상에만 전류 리플이 생기면서, 서로 간에 약 180도 정도의 상차이가 나게 된다. 이 고장 또한 Negative sequence 전류의 크기 감시를 통하여 검출 할 수 있으며, 앞 절의 턴 폴트보다 그 양이 많아 쉽게 검출 가능할 것으로 판단된다.

3. 결 론

본 논문은 로봇 휠에 사용되는 구동모듈에 사용되는 IPM 설계방법과 고장 시 드라이브에서 나타나는 신호들에 대하여 연구하였다. IPM모터의 설계에서는 적정의 인덕턴스용량을 선정하는 방법을 제안하였고, 턴 폴트와 암 개방 고장에 대한 실험을 통해 고장 진단을 할 수 있는 신호를 실험적으로 도출하였다. 차후 드라이브가 동작하는 온라인 상태에서 고장 진단을 할 수 있도록 고장 감지 알고리즘 개발을 진행 할 계획이다.

[참 고 문 헌]

[1] S.F. Farag, R.G. Bartheld, and T.G. Habetler, "An integrated on-line motor protection system", IEEE Industry

Applications Magazine, March/April, 21-26, 1996

[2] A. Stavrou, H.G. Sedding, J. Penman, "Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors", IEEE transactions on energy conversion, Vol.16, March, 2001

[3] R. Tallam, T. Habetler, R. Harley, "Stator winding turn-fault detection for closed-loop induction motor drives", IEEE transactions on industry applications, Vol.39, May/June, 2003