

전기자전거용 독립여자권선 영구자석 전동기의 구동제어기 설계

최진욱¹, 손영대², 강규홍²
동서대학교¹, (주)젬텍²

Drive Controller System in PM Motor with Independently Excited Winding for an Electric Bicycle

Jin Wook Choi¹, Young Dae Son², Gyu Hong Kang²
Dongseo University¹, GemTech Co., Ltd²

Abstract - This paper presents for the torque characteristics and improving the efficiency of driving system of electric bicycle which applied IEWPM(Independently Excited Winding Permanent Magnet) motor. IEWPM motor can expand the number of phase from 3 phases to multi-phase like SRM motor because stator windings are unconnected directly. BLDC motor raise rotor's electromagnetic torque per unit volume by using Spoke type permanent magnet. By using two phases per phase and applying excited width, advance angle and bipolar control, we confirmed higher torque at a low speed, higher output at a high speed, and efficiency improvement at a wide speed control area.

1. 서 론

전기자전거는 기존의 내연기관 형태의 운송수단과는 다르게 여러가지 측면에서 유리한 점을 갖는다. 최근, 환경문제와 유가상승 등의 문제로 대안 교통수단이 절실히 현실에 전기자전거는 중국, 유럽, 일본, 대만, 그리고 미국 등지에서 상당한 주목을 받고 있는 실정이다. 이와 같이 전기자전거의 수요가 확대의 일로에 있는 배경은 낮은 에너지 비용, 환경 친화성, 대도시의 심각한 주차문제 등에 있어서 많은 장점을 가지고 있기 때문이다. 현재, 전기자동차와 전기자전거 시스템에 활발히 적용되고 있는 Y결선 BLDC 모터나 SRM 모터를 대신할 수 있는 새로운 형태의 전동기 즉, SRM의 독립여자권선과 BLDC의 영구자석(IPM)을 모두 가지고 있는 독립여자권선 영구자석(IEWPM ; Independently Excited Winding Permanent Magnet) 전동기를 적용한다.

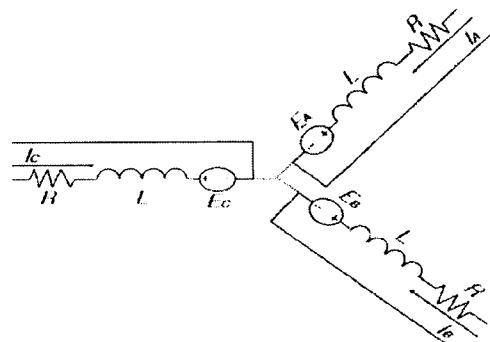
본 논문은 전기자전거 구동시스템에 적용을 위한 독립여자권선 영구자석 전동기의 진상각 제어법에 따른 토크 특성분석과, 시스템 모델링 및 시뮬레이션과 부하시험을 통한 구동제어 특성을 분석하고자 한다.

2. 독립여자권선 영구자석 전동기 시스템

2.1 독립여자권선 영구자석(IEWPM) 전동기

본 논문에서 적용한 IEWPM 전동기는 회전자 외경 표면에 영구자석을 접합한 SPM 타입이 아니고, 회전자 속에 직접 영구자석을 삽입한 구조를 가지는 Spoke타입 IPM 전동기이며, 회전자 전동기 축의 반경 방향으로 자속이 배열되어 자속이 집중되므로 SPM 타입보다는 높은 자속밀도를 가진다. 또한, 상호 결선된 일반적인 권선

구조가 아닌 상간에 서로 분리된 독립여자권선을 가지고 있어 상수의 증가가 용이하고 제어기 설계시 자유도가 높다. 또한, 각 상의 권선이 독립적으로 구성되어 전원단에 병렬로 연결되는 구조를 가진다. 따라서, IEWPM은 기존의 3상 BLDC 전동기의 구동방식과는 달리 각 상을 독립적으로 구동할 수 있어 구형파나 정현파 구동시 통전각을 0°~180°까지 구동 가능하므로 3상 중 특정 한 상의 권선이나 스위칭 소자에 이상이 발생한 경우에도, 2상으로 안정적인 구동이 가능하다.



R: 고정자 저항, L: 자기인덕턴스, E: 역기전력

그림 1. IEWPM 전동기 등가회로
Fig. 1. Equivalent circuit of IEWPM motor

$$V_A = RI_A + L \frac{dI_A}{dt} + e_A \quad (1)$$

$$V_B = RI_B + L \frac{dI_B}{dt} + e_B \quad (1)$$

$$V_C = RI_C + L \frac{dI_C}{dt} + e_C \quad (1)$$

IEWPM 전동기와 Y결선 BLDC 전동기는 각 상의 고유 성질은 동일 하지만, 서로 다른 등가회로와 전압 방정식을 나타낸다. 그림 1과식 (1)은 IEWPM 전동기의 등가회로와 전압방정식을 나타낸다. 전동기의 고정자 저항, 역기전력, 자기인덕턴스 등의 값은 전동기 구조 변화에 영향을 받는다. 따라서, 전동기의 결선의 변화에는 영향을 받지 않으므로 각 상의 전기적 위치는 Y결선 3상 BLDC 전동기와 동일하므로 역기전력과 상전류 파형은 동일하다[3].

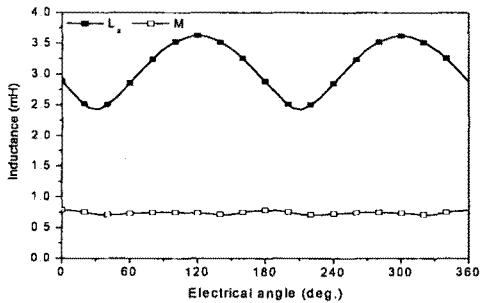


그림 2 유한요소 해석법의 자기, 상호 인덕턴스 특성
Fig. 2. Self and mutual inductance by using FEM

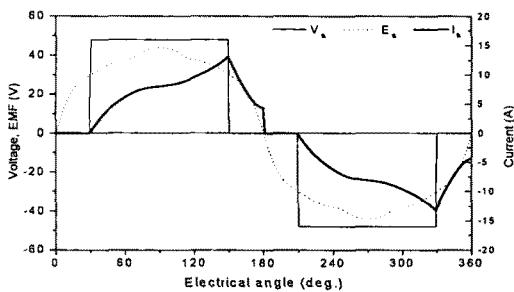


그림 3. 역기전력과 전류파형의 동적해석
Fig. 3. Dynamic analysis of back EMF and current

그림 2, 3은 유한요소법(FEM)과 전압방정식으로부터 해석한 SPOKE타입의 독립여자권선 영구자석(IEWPM) 전동기의 인덕턴스 특성과 전류 특성을 나타낸다.

2.2 쇠적 전상각 제어

전상각 제어는 상의 역기전력이 양의 최대값이 되는 순간이나 음의 최대값이 되는 순간부터 따져서 트랜지스터를 터온시키는 앞선 각을 의미하며 인버터 각 암의 상, 하단부 트랜지스터의 터온 시점과 관련된다. 전상각 제어시 각 트랜지스터의 게이트 펄스은 일반적으로 120°이나, 거의 180°까지 증가시키면 전동기의 고속 구동 성능을 개선한다. 전상각은 -60°에서 120°까지의 영역에서 제한된다.

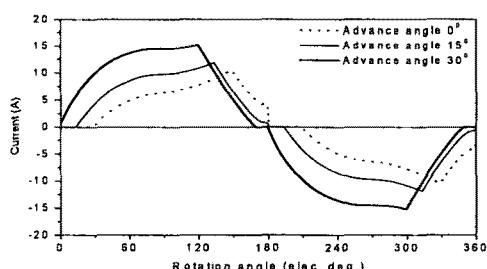


그림 4. 전상각에 따른 전류파형
Fig. 4. Phase current waveform according to advance angle

그림 4는 전상각에 따른 상전류 파형을 나타내고 있다. 전상각이 30°일 때 전류파형이 최대가 됨을 알 수 있다.

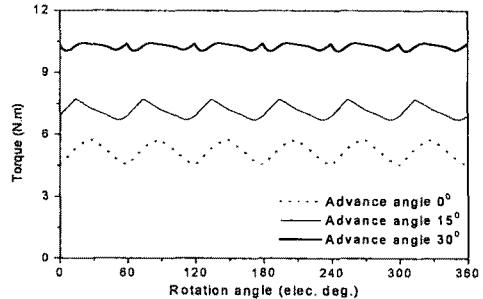


그림 5. 전상각에 따른 평균 토크
Fig. 5. Average torque according to current advance angle

그림 5에서는 전상각에 따른 평균 토크값을 나타내었다. 전상각이 30°이고 여자폭이 120°일 때 전류리풀은 감소되고 전류의 진폭이 증가하게 되는데 이렇게 하면 기동각에서 큰 전류를 얻을 수 있다.

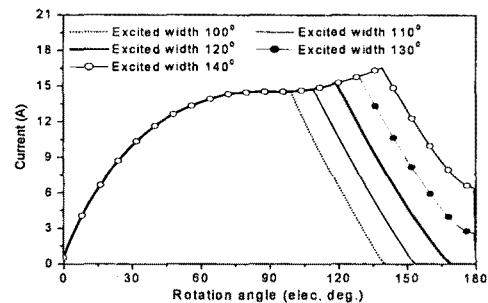


그림 6. 여자폭에 따른 상전류 파형
Fig. 6. Phase current waveform by excited width

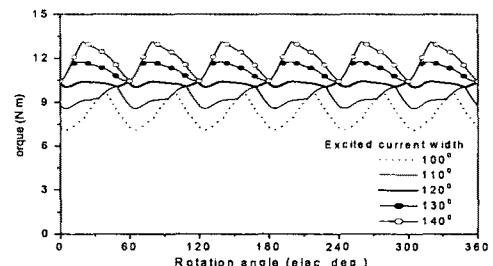


그림 7. 유한요소해석에 의한 토크파형
Fig. 7. Toque waveform by using FEM

그림 6은 여자폭 변화에 따른 상전류를 나타내고, 그림 7은 여자폭의 증가에 따른 토크 증가를 보여주고 있다. 토크 리풀은 여자폭 120°에서 최소가 됨을 알 수 있다. 전상각 제어법 적용시, 전동기의 고정자 상당 등가 인덕턴스가 충분히 커야 하는데, 전동기의 인덕턴스가 너무 낮으면 전동기가 정격 전력 및 고속에서 동작할 때 전동기 전류가 정격값을 초과해 버리므로, 전동기와 인버터에 대한 부가적인 냉각장치가 필요하게 되며 반도체 소자의 정격값이 비례하여 증가하게 된다. 회토류 자석을 이용한 고출력밀도 BLDC 전동기는 일반적으로 낮은 인덕턴스 값을 가지므로 전동기 설계시 이에 대한 대책이 요구되는데, 기본주파수 모델법을 이용하여 필요한 최소인덕턴스 값을 산정하는 방법도 제시되고 있다[1].

2.3 제작된 IEWPM 전동기의 구동제어기 설계

그림 8은 독립여자권선 영구자석 전동기 구동제어 시스템의 구성도를 나타내고 있다. 전동기의 전자계 특성은 유한요소법을 이용하였으며 이를 컨버터와 결합하여 특성을 분석하였다.

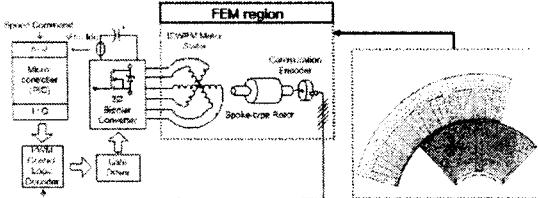


그림 8. 구동제어 시스템 전체 구성도

Fig. 8. Analysis process and configuration of SPOKE type I EWPM motor

2.4 IEWPM 전동기의 구동제어기 제작

그림 9에 나타낸 IEWPM 전동기의 구동제어기는 마이크로컨트롤러와 CPLD를 이용하여 크기를 최소화 하였고, 단상 풀브리지 컨버터를 3개 접속하여 3상 인버터를 구성하였다.

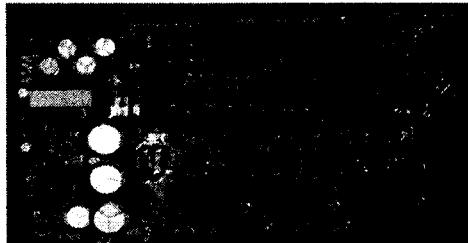


그림 9. 제작된 IEWPM 전동기의 구동제어기

Fig. 9. The designed controller for IEWPM motor

또한, 상당 두개의 전류(轉流) 광센서를 사용하여 풀브리지 인버터를 구성하는 각 하프브리지 인버터의 서로 교차된 상, 하단부 트랜지스터를 구동하도록 하는데, 겹형태의 엔코더 휠에 대한 센서의 상대 위치에 따라 오프시간이 결정되도록 한다. 이렇게 하면 각 상의 접점 순서의 타이밍을 제어하기 위해 부가적인 전자회로가 필요치 않으며, 펄스 여자폭 제어가 자연적으로 이루어진다. 또한, 전동기 자체가 독립여자권선 형태를 가지므로 다양 설계가 용이하여 전압제어시 설계상 융통성이 높아지며, 전류파형이 준구형파 형태를 가지므로 열적 손실을 유발하는 토크 리플도 구형파 전류파형 방식에 비해 낮아져, 높은 평균 토크 및 피크 토크값을 가지게 되어 효율이 상대적으로 높아진다.

2.5 IEWPM 전동기의 부하실험

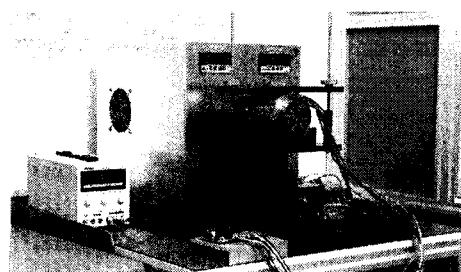


그림 10. IEWPM 전동기의 부하시험 장면

Fig. 10. Load test of IEWPM motor

표 1은 그림10의 부하시험 장치를 이용하여 IEWPM 전동기의 부하시험을 수행한 결과이며, RPM 변화에 따른 소모전류, 토크, 효율을 파악하였다. 엔코더를 기계각 $+1^{\circ}, -1^{\circ}$ 의 변화를 주며 최적의 위치를 찾았을 때 진상각 30° 의 위치와 동일함을 알 수 있었다.

표 1. 진상각 변화에 따른 부하특성

Table. 1. Load characteristic according to advance angle change

No	Torque(Kg Cm)	rpm	Vdc	Idc	Pout	Pin	Efficiency	Torque Const art
1	6.7	5002	48	9.07	343.758115	435.36	0.78959508	0.072392503
2	11.73	4502	48	13.76	541.673977	560.48	0.82012169	0.083542151
3	18.8	4004	48	19.3	772.122818	928.4	0.83346591	0.09546114
4	28.8	3495	48	26.5	1032.462144	1272	0.81169408	0.10650566

No	Torque(Kg Cm)	rpm	Vdc	Idc	Pout	Pin	Efficiency	Torque Constant
1	7.7	5002	48	10.9	395.065206	523.2	0.75509422	0.069229359
2	13.6	4504	48	15.8	628.306798	758.4	0.82846356	0.08435443
3	20.8	4003	48	21.1	854.05019	1012.8	0.84325651	0.096060655
4	29.8	3501	48	27.9	1070.1455	1339.2	0.79090312	0.10487385

No	Torque(Kg Cm)	rpm	Vdc	Idc	Pout	Pin	Efficiency	Torque Constant
1	7.7	4502	48	9.69	355.574563	485.12	0.76447919	0.077874097
2	14.9	4005	48	15.2	612.101238	729.6	0.83895455	0.096065789
3	24.5	3484	48	22	875.545458	1056	0.82911562	0.108135364

표 2. IEWPM 전동기 설계사양

Table. 2. Specification of IEWPM motor

상 수	3
출 력	500W
사용전압	DC 48V
상저항	0.6Ω
외 경	117mm
축방향길이	138mm

3. 결 론

본 논문에서는 기존의 전기자전거에 적용되고 있는 Y 결선의 BLDC 모터나 SRM 모터를 대신하는 독립여자권선 영구자석 전동기(IEWPM Motor)를 제안하고, 구동제어기를 설계하였다. 유한요소법을 이용한 Spoke 태입 IEWPM 전동기의 전류파형 특성 해석 및 토크특성을 해석하고, 단상 풀브리지 컨버터를 3개 접속한 3상 인버터에 진상각 제어법을 적용하여 회로 동작상태 분석 및 토크 특성을 비교해 죄적 회로 터풀러지 및 죄적 전상각을 실험적으로 도출할 수 있었고 또한, 전상각과 여자폭에 따른 회로 동작해석 및 죄적 여자폭 구동회로 설계를 할 수 있었다. 따라서, 제안한 IEWPM 전동기와 구동제어기는 전기자전거 뿐만 아니라 다양한 분야의 개인 수송 시스템에 적용될 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.S. Lawler, J.M. Bailey, J.W. McKeever and J. Pinto, "Limitations of the Conventional Phase Advance Method for Constant Power Operation of the Brushless DC Motor," Proc. of IEEE SoutheastCon 2002, pp.174~180, April 2002.
- [2] B. K. Lee, Mehrdad Ehsani, "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives," Electric Power Components and Systems, 31: 841- 868, 2003.
- [3] K.-J. Jo, J.-S. Oh, "Characteristic Analysis of Independent 3 Phase BLDC Motor," The Korea Institute of Power Electronics, pp.277~284, May 2007.