

전기자전거 구동제어 시스템 설계

조성남*, 최진욱**, 손영대***
동서대학교

Design of Electric Bicycle Drive System

Sung-Nam Cho*, Jin-Wook Choi**, Young-Dae Son***
Dongseo University

Abstract - 본 논문에서는 전기자전거 및 전기스쿠터에 적용할 수 있는 독립여자권선 3상 영구자석 전동기의 구동제어 시스템 구현 및 특성 파악을 수행하였으며, 역기전력에 대한 상전류의 위상각을 조정하는 진상각 제어법(홀센서가 부착된 위치센서 보드의 미세 조정)의 적용을 통해 상전류의 파형개선과 출력 및 토크향상을 기하였다. 또한, 기존 허브타입 전동기의 단점을 개선시킨 Spoke타입 독립여자권선 영구자석 전동기를 내장한 하이브리드 구동장치를 설계하여 적용하였다. 시뮬레이션 및 실험을 통해 광범위한 속도영역에서 본 구동제어 시스템의 출력 및 효율개선 특성을 확인하였다.

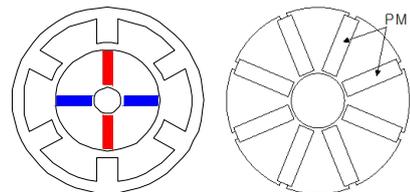
1. 서 론

최근, 환경문제와 유가 상승 등으로 인해 환경 친화적인 전동력 응용 전기자전거 시장이 다양한 분야에서 그 적용영역이 확대되고 있으며 특히, 중국, 유럽, 일본, 대만, 그리고 미국 등지에서 상당한 주목을 받고 있다. 적용대상으로서, 도시내에서의 주차 및 교통관련 경찰관의 법집행 용도와 자전거 경주시의 안내자전거, 공원내의 탐방용 수송수단, 그리고 레저, 쇼핑 및 출퇴근 교통수단을 들 수 있으며, 환경친화적인 개인용 이동수단으로서 최근 괄목할 만한 성장추세에 있다고 볼 수 있다. 이와 같이 전기자전거의 수요가 확대일로에 있는 배경은, 이동거리당 낮은 에너지 비용(자동차에 비해 1~2%), 보험료, 운전면허증, 등록비, 주차료, 교통흐름의 개선, 환경친화성 및 탑승자의 건강에 있어서 많은 장점이 있기 때문이다. 또한, 전 세계 전기자전거 시장의 40%를 점유하고 있는 중국뿐만 아니라 전 세계 제조사들의 90%는 외형형 Pan cake 형태의 전동기를 휠의 중앙에 설치하여 직접구동하는 허브타입 구동장치를 채택하고 있으나, 이 방식은 직접구동 방식이므로 기동시나 언덕을 올라갈 때 과도한 에너지를 소비하며, 자전거 앞바퀴에 설치하는 경우는 자전거의 균형을 깨뜨릴 수 있다. 본 연구에서는 전동기를 내장한 하이브리드 구동장치를 개발이 위치한 자전거의 중앙에 설치하여 전동기 기동시나 경사지역 운전시에 배터리의 전류소모를 줄이고, 배터리의 수명연장과 주행거리 연장이 가능하도록 하였다. 또한, 본 연구의 독립여자권선 영구자석 전동기는 상호 결선된 일반적인 구조가 아닌 상간에 서로 분리된 독립여자권선을 가지고 있어 상수의 증가가 용이하고 제어기 설계시 자유도가 높다고 할 수 있다. 즉, 기존의 전기자전거용 전동기가 많이 사용되어 온 3상 Y결선 BLDC 모터에 비해 소형·경량이고 넓은 속도 제어 범위에서 고효율을 유지할 수 있고 결상 시에도 운전이 가능한 Spoke타입 독립여자권선 영구자석 전동기를 적용하였는데, 이는 고정자 권선이 상호 연결되어 있지 않으므로 SRM과 마찬가지로 상수를 현재의 3상에서 다상으로 쉽게 확장할 수 있고, BLDC 전동기와 같이 Spoke 타입 영구자석을 사용하여 회전자의 단위체적당 전자기적 토크를 증가시킬 수 있으며, 상당 2개의 위치센서를 사용하여 여자폭 제어와 진상각 제어 및 바이폴라 제어가 가능하므로 저속에서의 높은 토크와 고속에서의 대출력, 넓은 속도제어 영역에서의 고효율, 빠른 응답성과 역전성을 가지며 타 전동기에 비해 제작단가가 싼 장점이 있다. 특히, 막대형태의 자석을 회전자의 철심에 삽입하기 때문에 초고속 회전시 기계적으로 안정되며 자석의 삽입형태가 자속집중을 증가시키므로 같은 종류의 자석을 사용한 타전동기에 비해 전동기의 크기를 소형화할 수 있으므로 생산원가를 낮출 수 있다. 전동기의 상전류는 전동기 고정자권선의 인덕턴스 성분에 의해 순시적으로 정격전류 레벨로 증가하지 못하는데, 저속에서는 인덕턴스 영향은 무시 가능하므로 심각한 문제는 유발하지 않으나 고속구동시에는 토크 및 속도응답 특성에 악영향을 주므로, 광범위한 속도 제어 영역을 요구하는 산업응용에 적용하기 위해서는 상전류의 개선이 필요하다. 그러므로, 본 연구의 독립여자권선 영구자석 전동기를 전기자전거 시스템에 적용하기 위해서는 출력토크 및 속도응답 특성을 개선하는 것이 중요하므로 상전류의 성능을 개선하기 위해 역기전력에 대한 상전류의 위상각을 약 30° 앞서도록 조정된 진상각 제어법을 적용하였다. 따라서, 본 논문에서는 Spoke타입 독립여자권선 영구자석 전동기와 진상각 제어법, 하이브리드 구동시스템을 적용한 전기자전거 구동제어 시스템을 구현하여 시뮬레이션 및 실험을 통해 본 시스템의 출력 및 효율개선 특성을 확인하여 상품화 가능성을 확인하였다.

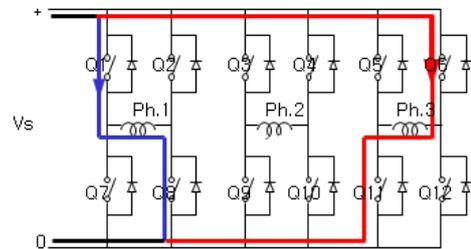
2. 전기자전거 구동제어 시스템

2.1 독립여자권선 영구자석 전동기 및 응답 특성

본 연구에서는 최근 전기자동차와 전기자전거(전기 스쿠터 포함) 시스템에 활발히 적용되고 있는 기존의 Y결선 BLDC 전동기나 SRM을 대신할 수 있는 새로운 형태의 전동기 즉, SRM의 독립여자권선과 BLDC 전동기의 회로류 영구자석(IPM)을 모두 가지고 있는 Spoke 타입 독립 여자권선 영구자석(IEWPM: Independently Excited Winding Permanent Magnet) 전동기를 전기자전거 시스템에 적용하기 위한 구동제어기 설계를 수행하였으며, 그림 1에 Spoke 타입 IEWPM 전동기의 기본 구조와 구동제어를 위한 인버터를 나타내었다. 그림 1(b)에서 알 수 있듯이, 구동 인버터는 총 12개의 파워 스위치로 구성되며 구간별 두 개의 상만 도통하는 2상 여자방식과 상하의 스위치 모두 PWM 파형으로 구동되는 바이폴라 PWM 방식을 사용하였다.



(a) Spoke타입 IEWPM 전동기의 기본구조



(b) 구동 인버터

〈그림 1〉 Spoke 타입 IEWPM 전동기의 구조와 구동 인버터

본 전동기의 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 차이를 고려할 때, 순시전류의 연산을 위한 전압방정식과 토크 방정식은 다음 식과 같다.

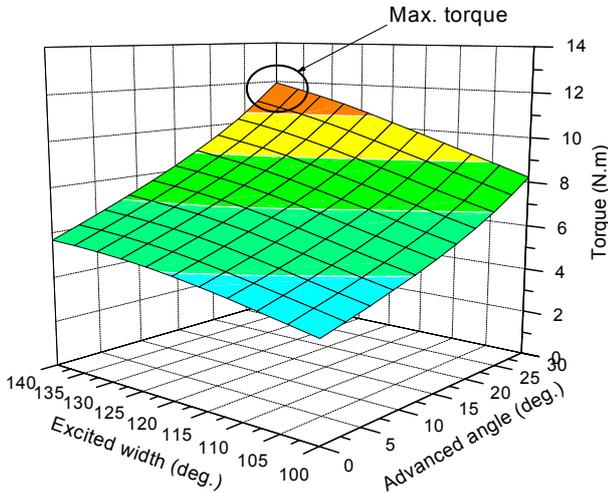
$$V_a = Ri_a + \frac{d}{dt}[L_a(\theta) + M(\theta)]i_a + e_a \quad (1)$$

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a(\theta) + M(\theta)}[V_a - e_a] \quad (2)$$

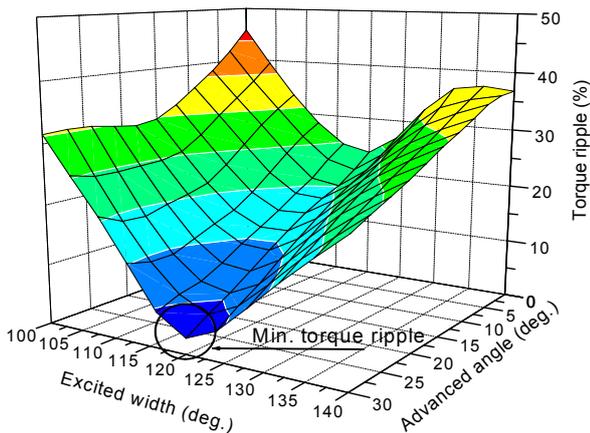
$$T_a = \frac{e_a i_a}{\omega_m} + \frac{1}{2} i_a^2 \frac{L_a(\theta)}{\theta} \quad (3)$$

Spoke 타입 IEWPM 전동기는 식 (3)의 두 번째 항과 같이 회전자 위치에 따라 토크 인덕턴스 토크를 발생하는 인덕턴스 변동을 가지고 있으며, 이로 인해 과도한 상전류 리플과 토크 리플 및 진동을 발생시킬 수 있다. 토크 리플을 저감하기 위해서는 전류 진상각 제어와 여자폭 제어에 의한 상전류 파형개선이 필요하다. 즉, IEWPM 전동기의 전류파형 개선을 위한 변수로서 전류 진상각과 여자폭을 들 수 있는데, 전동기의 최적 구동을 위해서는 FEM과 상전압 방정식을 결합한 전류 다이내믹 해석에 의한 정확한 전동기 해석이 필요하다. 즉, 해석결과에 의하면 토크리플을 최소화하기 위해 전류 진상각과 여자폭 제어에 의한 전류파형 개선이

필요하며, 0~30°의 진상각과 100°~130°의 여자폭 변화를 주었을 때 30°의 진상각에서 가장 낮은 전류 및 토크리플, 역토크가 발생하지 않는 한도 내에서 120°의 여자폭일 경우 가장 큰 전류크기를 나타내었다. 그림 2와 그림 3은 전류 다이내믹 해석에 따른 전류 진상각과 여자폭에 대한 전동기 발생토크 및 토크리플의 응답곡선을 나타낸다. 그림 2에서 알 수 있듯이, 30°의 전류 진상각인 경우 여자폭이 넓어질 수록 발생토크가 증가함을 알 수 있는데, 역토크가 발생하지 않는 한도를 감안한다면 120°의 여자폭이 가장 적합함을 알 수 있다. 그림 3은 토크리플에 대한 해석 결과를 나타내며, 120°의 여자폭과 30°의 진상각에서 가장 낮은 토크리플을 보인다.



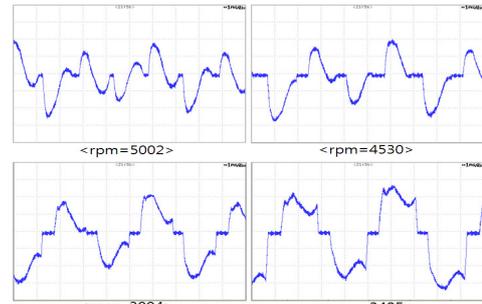
〈그림 2〉 토크 응답 특성



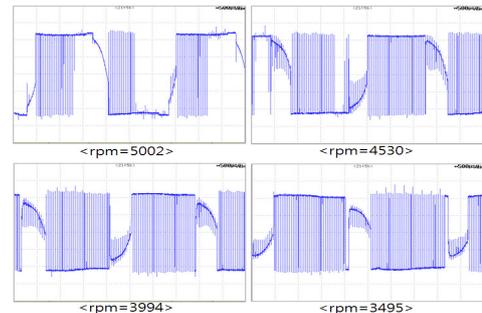
〈그림 3〉 토크 리플 특성

2.2 구동제어 시스템 설계 및 실험결과

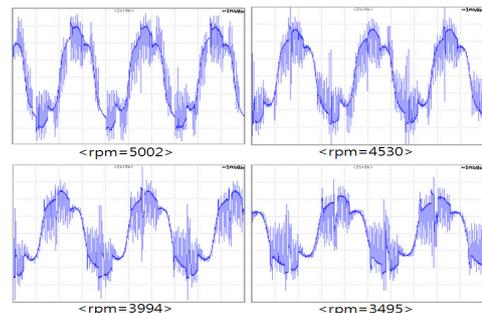
독립여자권선 3상 영구자석 전동기는 각 상의 권선이 독립적으로 구성되어 전원단에 병렬로 연결되어 있으며, 기존의 3상 BLDC 전동기의 구동방식과는 달리 각 상을 독립적으로 구동할 수 있고 구형파나 정현파 구동시 통전각을 0°~180°까지 구동 가능하므로 3상 중 특정 한 상의 권선이나 스위칭 소자에 이상이 발생했을 경우에도 2상만으로 안정적인 운전이 가능하다. 그러므로, 이 전동기를 전기자전거 구동시스템에 적용할 경우, 한 상의 사고시에도 안전한 곳으로 나머지 상의 운전만으로 이동할 수 있는 장점이 있다. 또한, 직류 입력전압이 각 상에 분배되지 않고 전부 인가되므로 동일한 전압에서도 Y결선 방식에 비해 상당한 역기전력을 증가시킬 수 있어 고효율화와 소형·경량화가 가능하다. 특히, 전류위상각(진상각) 제어뿐만 아니라 통전각(여자폭) 제어가 가능하므로 고효율 및 토크리플 저감을 위한 제어변수가 증가하는 장점을 갖고 있다. 설계 및 제작된 IEWPM 전동기는 3상 500[W]의 출력을 가지며, 입력전압 48[V], 상저항 0.6[Ω], 전동기 외경 117[mm], 전동기 축방향 길이 138[mm]를 가진다. 그림 4~그림 6은 진상각 30°, 여자폭 120°를 적용했을 경우, 바이폴러 PWM 구동시의 IEWPM 전동기의 부하시험 파형을 나타낸다. 각 실험조건은 8.32, 13.32, 21.42, 25.32[kgf·cm]의 부하토크 인가시 각 전동기 속도[rpm]값과 해당 상전류 파형 및 상전압 파형, 그리고 1상을 오픈 시킨 상태에서 측정할 수 있는 역기전력 파형을 나타낸다.



〈그림 4〉 상전류 파형



〈그림 5〉 상전압 파형



〈그림 6〉 역기전력 파형

3. 결 론

본 논문에서는 BLDC 전동기와 SRM의 장점들을 갖고 있는 독립여자권선 영구자석 전동기를 적용한 전기자전거 구동제어 시스템을 설계하고 FEM에 의한 전류파형 특성과 토크특성을 해석하여 최대 토크와 최저 토크 리플을 얻을 수 있는 최적 진상각과 여자폭을 도출하였다. 또한, 3상 바이폴러 PWM법과 전류 위상각 제어법을 적용한 실험을 통해 본 전기자전거 구동제어 시스템의 타당성을 확인하였다. 따라서, 제안한 IEWPM 전동기와 구동제어 시스템은 전기자전거나 전기스쿠터 뿐만 아니라 다양한 분야의 개인 수송시스템에 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 21세기의 화두인 에너지 및 환경문제 해결에 적극 부응할 수 있을 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] S.K. Safi, P.P. Acarnley and A.G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, Vol.142, No.3, May 1995.
- [2] B.-K. Lee and Mehrdad Ehsani, "Advanced Simulation Model for Brushless DC Motor Drives," *Electric Power Components and Systems*, Vol.31, pp.841~868, 2003.
- [3] Neil Garcia-Sinclair, "Brushless DC Motor Provides High Power Density and High Efficiency at Low Cost for Electric Transportation," *PCIM*, Jan. 1996.
- [4] Kwan-Jun Jo and Jin-Seok Oh, "Characteristic Analysis of Independent 3 phase BLDC Motor," *The Trans. of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol.12, No.4, pp.277~284, Aug. 2007.