

병렬결선방식을 이용한 인휠 전동기 특성해석

김태형, 이동희, 안진우, 하병길*, 강병주*
경성대학교, *CMI(주)

Characteristic Analysis of In-Wheel Motor with Parallel Winding

Tae-Hyoung Kim, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn, Byung-Gil Ha*, Byung-Joo Gang*
Kyungsung Univ., *CMI Co.Ltd

Abstract - This paper present in-wheel BLDC motor using parallel winding. The voltage of proposed motor is higher than Y-connection three phase BLDC motor in order to separated connection. When the stator resistance and inductance are stable, maximum phase current and maximum torque is increased by high injected voltage. The proposed motor is verified from experimental result of the 2[kW] in-wheel motor on electric vehicle drive.

1. 서 론

최근 자동차의 배기가스에 의한 환경문제를 해결하기 위해서 제도적인 환경규제를 강화하고, 친환경적인 무·저공해 자동차의 개발 및 보급에 노력을 기하고 있다. 이러한 무·저공해 자동차의 대부분은 전동기를 이용하여 차량의 구동력을 발생 시키게 된다. 따라서 전동기 구동기술은 전기자동차, 하이브리드 자동차, 연료전지자동차 등의 무·저공해 자동차의 핵심이 된다. [1]

이러한 차량 견인용 전동기로 기존에 많이 활용되고 있는 유도전동기는 내구성이 높고 기존에 축적된 제어기법 및 기반기술이 많아 안정성에서 우수하다. 그러나 타 전동기에 비해 효율이 낮고 체적이 크며, 초기 구동시토크가 작다는 단점을 가지고 있다.

최근에는 구동 토크가 낮다는 단점과 부피문제를 해결하기위해 단위면적당 출력밀도가 높은 영구자석 동기전동기의 사용이 증가하고 있다. 영구자석 동기전동기 및 BLDC 전동기의 경우 효율 및 출력밀도가 높고 보수성이 용이하나, 상대적으로 높은 제작단가와 온도에 의한 특성변화문제 그리고 대형화 제작의 어렵다는 문제점이 있다.[2]

이러한 전동기 특성측면의 문제점과 함께 차량구동에 적용되는 전동기의 경우, 저속/고토크 운전에서 따른 문제점이 발생하게 된다. 일반적으로 이 문제를 해결하기 위해 전동기를 높은 속도에서 운전하고 기어 또는 벨트 등의 변속장치를 이용하여 구동 토크를 높이는 방법이 사용되나, 시스템의 체적이 증가하고 구동 효율이 감소된다는 단점을 가지고 있다. 따라서 최근에는 변속시스템을 배제한 직접 구동형 시스템에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문에서는 직접 구동형 전동시스템 중 운송수단에 적용이 용이한 인-휠(In Wheel Type)타입의 BLDC를 제안하였다. 제안된 전동기는 각 상의 권선을 별도로 여자시키으로써 기존의 2상 여자방식을 사용하는 Y결선 전동기에 비해 상권선에 높은 전압을 인가할 수 있다. 이를 통하여 높은 상전류의 확립이 용이하므로 큰 토크의 발생이 가능하다는 장점을 가지게 된다. 특히 전기자동차와 같이 배터리의 전압이 구조적으로 제한받는 경우 저속에서 기존에 비해 높은 전류를 공급하여 높은 토크를 발생 시킬 수 있다.

제안된 병렬 결선 형태의 전동기에 대한 특성을 검증하기 위해 FEM을 통한 시뮬레이션을 수행하였으며, 실제 2[kW] 인휠 전동기를 제작하고 실험을 수행하여 가능성을 검증하였다.

2. 병렬결선을 통한 인휠 전동기의 특성

그림 1은 본 논문에서 설명하고자 하는 병렬 결선을 이용한 In-Wheel형 영구자석 동기 전동기의 구조를 나타내고 있다. 이 전동기는 차량의 차륜에 직접되는 형태로 구성되며 외전형 전동기의 형태를 가지고 있다. 또한 상권선의 구성 및 여자방식이 기존 일반적인 영구자석을 사용한 In-Wheel형 전동기에서 Y결선을 통한 2상 여자와 달리 각 상을 독립적으로 여자하는 방식을 사용한다. 따라서 일반적인 Y결선 방식의 In-Wheel형 영구자석 동기 전동기와 다른 토크특성을 보이게 된다.

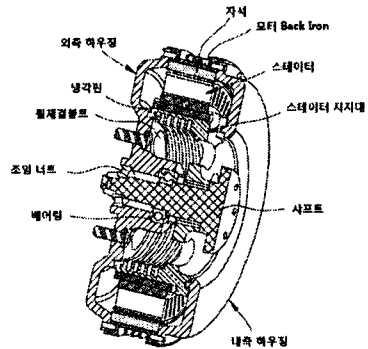


그림 1. 인휠형 영구자석 동기전동기의 구조
Fig. 1 Structure of In-Wheel type Permanent Magnet Sync. Motor

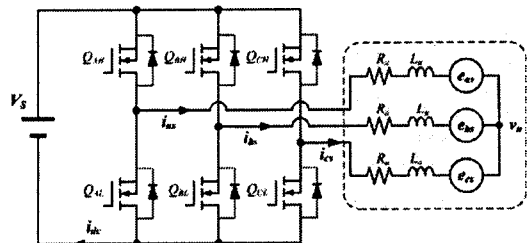


그림 2. 일반적인 3상 BLDC전동기 등가회로
Fig. 2 Equivalent circuit of 3-phase BLDC motor

그림 2는 일반적인 3상 영구자석 동기 전동기를 구동시키기 위한 전력변환기와 전동기의 등가회로를 나타내

고 있다. 일반적인 영구자석 동기 전동기는 그림과 같이 2상 여자 방식에 의해 동작되므로 한 시점에서 두 상에 전류가 흐르게 되고 한 상에는 전류가 흐르지 않는다. 이때 각 상 전압 V_a, V_b, V_c 와 상간전압 V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} 의 관계는 식 (1)과 같고, 고정자의 선간저항 R 과 선간동기인덕턴스 L 는 식 2와 같이 표현된다.[2-5]

$$V_{ab} = V_a - V_b, V_{bc} = V_b - V_c, V_{ca} = V_c - V_a \quad (1)$$

$$R_1 = 2R, L_1 = 2L \quad (2)$$

$$e_{ab} = E_a - E_b, e_{bc} = E_b - E_c, e_{ca} = E_c - E_a \quad (3)$$

$$V_{ab} = R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_{ab} \quad (4)$$

$$V_{bc} = R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_{bc}$$

$$V_{ca} = R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + e_{ca}$$

$$T = \frac{E_a i_1 + E_b i_2 + E_c i_3}{\omega_m} \quad (5)$$

등가회로에서 이상적으로 인덕턴스의 값이 일정하다면 전압방정식은 식 (4)와 같이 표현되고, 여기서 권선에서 발생하는 전압 강하량을 무시한다면 각 권선의 전압과 전류에 따른 발생토크는 식(5)와 같다.

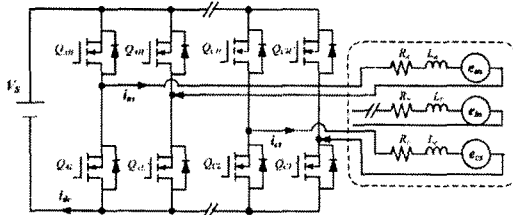


그림 3. 제안된 BLDC전동기 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit of proposed BLDC motor

그림 3은 제안된 인휠형 영구자석 동기 전동기에서 각 상의 권선이 독립된 컨버터에 의해 제어되는 병렬결선 방식의 등가회로를 나타내고 있다. 각 상의 권선은 개별적으로 4상한 컨버터에 의해 동작되기 때문에 중성축을 공유하는 일반 Y결선형태의 영구자석 동기전동기와 다른 전압특성을 가지게 된다. 따라서 Y결선 형태의 전동기에서 나타나는 전압방정식과 달리 식(6)과 같은 방정식을 가지게 된다.

$$V_A = RI_A + L \frac{dI_A}{dt} + e_A \quad (6)$$

$$V_B = RI_B + L \frac{dI_B}{dt} + e_B$$

$$V_C = RI_C + L \frac{dI_C}{dt} + e_C$$

$$T \propto I_a, I_b, I_c \quad (7)$$

일반적인 Y결선 구조와 병렬 결선 구조의 가장 큰 차이점은 상권선에 인가되는 전압의 크기가 다르다는 것이다. 병렬 권선으로 구성된 것은 전원 전압이 한상에 인가되고 Y결선의 구조는 전원 전압의 1/2만큼이 한상에 인가된다. 따라서 이에 따른 상전류의 차이가 발생하게 되고, 전동기의 상당 저항 및 동기인덕턴스가 동일한 경

우에는 식(7)과 같이 병렬 결선구조가 높은 토크를 발생 시키게 된다.

3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 5는 제안된 구조의 인휠 전동기에서 병렬 결선에 의한 여자에 의해 발생하는 자기 문제점을 파악하기 위해 FEM 시뮬레이션을 수행한 결과를 나타내고 있다. 시뮬레이션은 일정전류에 따른 자속분포와 동일한 전원단 전압을 인가한 경우 회전자 위치에서 따른 자속의 양에 대하여 수행되었다. 시뮬레이션 결과를 통하여 각 상을 병렬로 구동한 경우에도 Y결선형태와 같이 자속의 생성에 문제가 없는 것을 확인할 수 있었다.

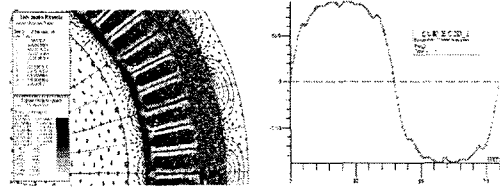


그림 4. 제안된 전동기의 자속특성
Fig. 4 Flux characteristic of proposed motor

그림 5는 본 논문에서 실험을 위해서 제작된 2[kW] 인휠 전동기의 외형과 전동기의 구동 성능실험을 위해 실제 차량에 장착한 모습을 나타내고 있다. 제어기는 TI사의 DSP를 사용하여 구성하였으며, 각 상은 200[A]급 IGBT를 사용하여 전력변환기를 구성하였다. 각 상의 전류와 전압은 별도의 NI사의 DAQ장치를 이용하여 측정하였다.

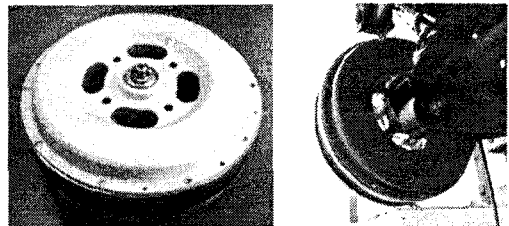


그림 5. 제작된 인휠 전동기
Fig. 5 manufactured In-Wheel motor

그림 6은 상여자 위치에서 일정전압 인가시 발생하는 유기전압과 전류의 관계를 나타낸 것이다. 그림과 같이 유기전압의 크기가 작은 구간에서 유기전압이 일정해지는 구간에서와 같은 동일한 크기의 전압이 공급될 경우 상 권선에 큰 전류가 흐르는 부분이 발생한다. 이러한 경우 스위치에 소손이 발생할 경우가 생길 수 있다.

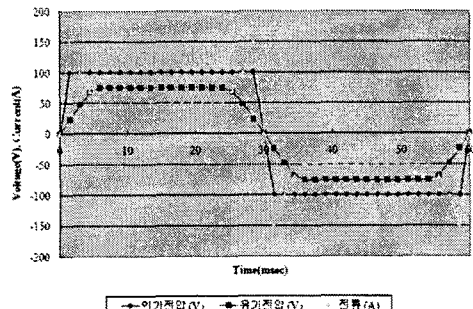


그림 6. 피크전류제어가 되지 않은 전압 및 전류파형
Fig. 6 Waveform without peak current control

본 논문에서 소자의 파괴를 막고 전류의 리플을 감소하기 위하여 그림 7과 같은 스위칭 패턴을 사용하여 유기전압이 작은 구간에서 발생하는 전류의 급격한 상승을 억제하고 전류의 리플을 최소화 하였다. 그림 7의 스위칭 패턴을 적용하여 상권선에 전압을 공급한 결과 그림 8과 같이 안정적인 동작을 발생 시킬 수 있었다.

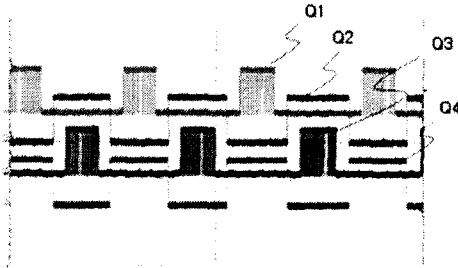


그림 7. 피크전류저감을 위해 제안된 스위칭 패턴
Fig. 7 Proposed switching pattern for peak current reducing

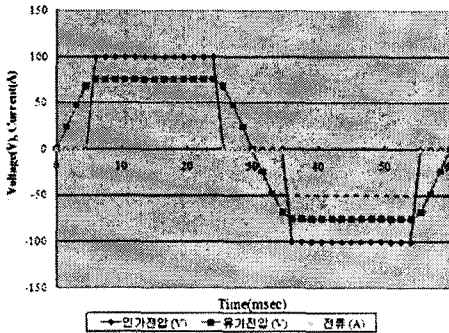


그림 8. 피크전류제어가 된 전압 및 전류파형
Fig. 8 Waveform with peak current control

4. 결 론

본 논문에서는 차륜에 직접되어 단위 면적당 높은 토크를 발생시키기 위해 병렬결선구조를 가지는 새로운 형태의 인휠형 영구자석 동기전동기를 제안하였다. 제안된 전동기는 기존의 Y결선을 사용한 전동기에 비해 상전압이 2배 증가되어 전류의 확립이 용이하므로 높은 토크를 발생시키기 용이한 구조를 가지고 있다. 제안된 구조의 전동기에 대한 성능 검증을 위하여 실제 2[kW]급 인휠 전동기를 제작하여 실차에 장착 실험을 수행하였다. 또한 안정적인 구동을 위한 스위칭 패턴을 적용하여 시험을 수행하였다. 차후 전동기의 성능개선을 위한 제어기법의 개발과 함께 전기동력계를 통한 고효율 구동 및 실차 주행시험을 추가적으로 수행할 계획이다.

본 논문은 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원 인력양성사업의 연구결과입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] 조철, "차세대 자동차의 2020 비전과 전략", 산업연구원, 2007.04
- [2] P.Pillay and R.Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", IEEE IAS Annual Meeting, pp.380~390, 1987
- [3] 조관준, 오진석, "독립 3상 BLDC 전동기의 특성해석에 관

- 한 연구", 전력전자학회 논문집, 12권, 제4권, 2007.08
- [4] Marcelo Godoy Simoes, Petronio Vieira, Jr. "A High-Torque Low-Speed Multiphase Brushless Machine a Perspective Application for Electric Vehicles", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.49, No.5, 2002.
- [5] Byoung-Kuk Lee, Mehrdad Ehsani, "Advanced Simulation Model for Brushless DC motor drives", Journal of Power Electronics, Vol 3, No 2, 2003