

전기 자동차에서 구동 모터용 인버터의 메인 Micro Controller Unit (MCU) 고장 시 운전 방법에 관한 연구

이 희광, 홍 승민, 남 광희
포항공과대학

A study of Traction Motor Control Method on Failure of the Main MCU

Heekwang Lee, Seungmin Hong, Kwanghee Nam
POSTECH

ABSTRACT

전기자동차 (EV)에서 구동용 모터의 토크 제어를 위한 인버터에는 제어 연산 및 고장 진단 기능을 수행하기 위한 MCU가 있으며, MCU는 상위 제어기 차량 제어 유닛 (VCU)에게 현재 모터 및 인버터의 상태를 주기적으로 전달하고, 현재 차량 주행에 적합한 토크 지령을 받아 토크 제어를 수행하게 된다. 이를 위해 MCU는 전류, 전압 및 위치 센서의 값을 읽어 제어를 수행하게 되며, 제어의 결과 값으로 pulse width modulation (PWM)을 생성하여 이를 통해 모터에 전압을 공급하게 된다. 즉 차량의 구동에 있어 PWM 신호는 가장 중요한 부분이다. 하지만 생산 불량 또는 진동에 의한 납땜 불량 또는 MCU 전원 고장 등으로 MCU에 고장이 발생하게 되면 이상 PWM을 생성하게 되고 정상적인 토크 제어가 불가능해진다. 이때 안전하게 EV를 정지 시키는 알고리즘이 필요하게 되며, 이를 수행 할 supervisor control unit (SCU)가 인버터 컨트롤 보드에 추가되어야 한다. 본 논문에서는 고속으로 주행하던 차량에서 메인 MCU가 고장 날 경우에 안전하게 EV를 정차시키는 방법에 대해 다루었다.

1. 서론

매입형 영구자석 모터 (IPMSM)는 고토크 및 고효율 밀도와 고효율의 특성을 가지고 있어 다른 종류의 모터에 비해 EV 구동용 모터로 많이 사용되고 있다. EV용 모터는 고토크 및 고효율 밀도 모터 설계를 위해 다른 산업용 모터 보다 에서 높은 자속 밀도를 가지게 된다.^[1] IPMSM의 경우 유도 모터 (IM) 또는 계자 권선형 동기모터 (WRSM)와 달리 영구자석에 의해 계자가 항상 존재하며, 이는 높은 역기전력 상수를 의미한다. 높은 역기전력 상수를 가지는 모터의 경우 약계자 제어를 통해 속도 운전 범위를 확장하게 된다. 약계자 영역에서는 토크를 영으로 제어 한다하더라도 음의 D상 전류를 항상 인가하여야 하며 제어기에서는 필요한 D상 전류의 크기를 수식 또는 look up table을 통해 얻게 된다.^[2]

고속 운전 중이던 EV에서 인버터의 메인 MCU의 고장으로 인해 정상적인 전류 제어가 되지 않을 경우 모터 터미널 전압이 역기전력에 의해 인버터 최대 출력 전압을 벗어나게 되며 이는 구동용 인버터의 스위칭 소자 고장의 원인이 된다. 본 논문은 MCU의 고장으로 인해 전류 제어가 불가능한 상황에서 차량을 안전하게 정지 시키는 방법에 관한 연구로 3상 다이오

드 정류와 모터 삼상 단락을 모두 이용하는 안전제동 알고리즘을 제안 하였다.

2. 고속에서의 IPMSM 제동

2.1 3상 다이오드 정류를 이용한 제동

메인 MCU 고장이 발생하여도 VCU와 배터리 관리 시스템 (BMS)에서 구동용 인버터와 고전압 배터리를 연결 상태를 유지 하고 있다면 인버터 스위칭 소자의 역방향 다이오드에 의해 3상 다이오드 정류가 되게 되며 모터의 운동 에너지가 배터리의 전기에너지로 회생되게 되어 구동용 인버터의 고장을 막을 수 있다. 하지만 이때 다이오드 정류에 의한 회생은 모터에서의 브레이크 토크를 발생하게 되며 속도에 비례한 값으로 나타 나게 된다.

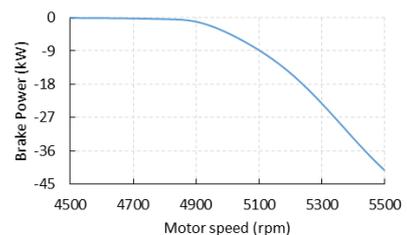


그림 1 DC-link 전압이 330V 일 때 3상 다이오드 정류에 의한 모터 속도에 따른 제동.

Fig.1 The motor speed versus brake power plot with 3-phase diode rectifier at dc-link voltage is equal to 330V.

그림 1은 표 1의 모터를 사용하여 실험을 통해 얻은 3상 다이오드 정류에 의해 발생하는 제동 출력이다. 기저속도에 이상에서 속도에 비례하여 크기가 상승하게 되며, 이는 고속운전 차량에서의 급브레이크와 같은 형상으로 차량 운전에 있어 매우 위험한 동작이다. 하지만 저속에서는 역기전력 전압이 dc-link 전압 보다 낮아 다이오드 정류가 발생하지 않아 모터에 의한 제동 출력이 0이 되게 된다.

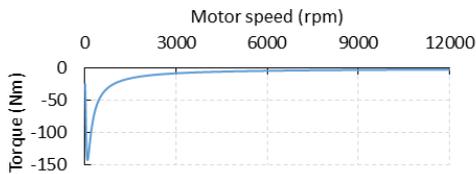
2.2 모터 삼상 단락에 의한 제동

IPMSM의 삼상을 단락하게 되면 모터 내부 고정자 코일이 폐회로가 되게된다. 이때 모터를 강제로 회전시키게 되면 회전자의 영구자석과 고정자 코일에 발생한 역기전력 전압에 의해 폐회로에 전류가 아래 수식과 같이 나타나며, 이는 역 토크를 발생시키게 된다.

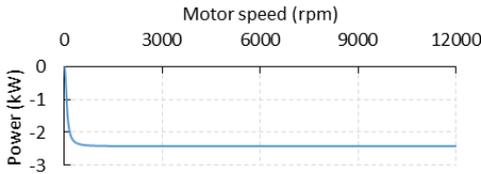
$$i_d = \frac{-L_q \omega_e i_q}{r_s} \quad (1)$$

$$i_q = \frac{-\psi_m \omega_e}{r_s - L_d L_q \omega_e^2 / r_s} \quad (2)$$

여기서 i_q , i_d 는 d-q 상 전류이며, L_q , L_d 는 dq상 인덕턴스, r_s 는 상저항, ω_e 는 전기 각속도, ψ_m 은 역기전력 상수이다. d-q 전류에서 모터 운전 속도가 상승 할수록 $i_d \approx -L_d/\psi_m$, $i_q \approx 0$ 으로 근접하게 되며 이에 따른 표 1 모터의 토크와 출력은 그림 2와 같다.



(a)



(b)

그림 2 모터 3상 단락 회로에서의 토크 및 출력 (a) 토크, (b) 출력.

Fig.2 The torque and power of short circuit motor (a) torque, and (b) power.

그림 2에서 볼 수 있듯이 삼상 단락에 의해 발생하는 토크의 경우 저속에서는 매우 큰값을 가지지만 고속으로 갈수록 매우 작은 값을 가지는 것을 알 수 있으며, 제동 출력 또한 고속에서 포화되는 것을 확인 할 수 있다.

표 1 시뮬레이션 및 실험에 사용된 모터의 주요 파라미터.

Table 1 The motor parameter using simulation and test.

r_s	0.012 Ω	ψ_m	0.108
L_d	249 μH	L_p	744 μH
최대 출력	100 kW	최대 토크	320 Nm

2.3 삼상 단락과 다이오드 정류를 모두 고려한 안전 제동 알고리즘

위에서 살펴보았듯이 모터 전류제어가 불가능할 경우 구동용 인버터의 스위칭 소자에 고장 발생 없이 차량을 정지시키는 방법은 삼상 다이오드 정류와 삼상 단락 두 가지 방법이 있다. 하지만 다이오드 정류의 경우 고속에서 큰 역 토크를 발생 시키며, 삼상 단락의 경우 저속에서 큰 역 토크를 발생시켜, 사고 발생 차량과 주변 주행 차량에 모두 큰 위협을 줄 수 있는 단점을 가지고 있다. 하지만 삼상 단락 회로의 고속 영역과 다이오드 정류의 저속 영역을 같이 사용하면 고속 운행 중이던 차량을 안전하게 정지 시키는 것이 가능하다. 이를 위해 인버터 컨트롤 보드에는 메인 MCU 뿐만 아닌 SCU를 추가로 설계하여 메인 MCU의 고장 여부를 진단하고 고장 발생 시 안전

제동 알고리즘을 진행 하여야 한다.

안전 제동 알고리즘은 메인 MCU 고장이 발생하게 되면 SCU에서 메인 MCU에 의한 PWM 신호를 차단하게 되며 SCU는 단순히 모터 삼상 단락을 각 암 (arm)의 아래쪽 스위치의 턴 온/오프만 수행하게 된다. 턴 온을 수행 할 경우 삼상 단락이 되며, 턴 오프를 수행할 경우 다이오드 정류 모드가 된다. 이때 두 모드의 전환 시점은 전체 제동 기간 동안 모터의 전기적 제동에 의한 충격이 없도록 하기 위하여 다이오드 정류와 삼상 단락에 의한 제동 출력이 같은 순간에 두 모드를 전환 해야 한다.



그림 3 삼상 단락과 다이오드 정류를 모두 고려한 안전제동 알고리즘 시뮬레이션 결과.

Fig.3 The simulation result of safety braking algorithm.

그림 3은 표 1의 모터 파라미터를 이용한 안전제동 알고리즘의 시뮬레이션 결과이다. 4950rpm에서 다이오드 정류와 모터 삼상 단락에 의한 제동 출력이 같은 값을 가지는 것을 실험과 시뮬레이션을 통하여 구하였고, 해당 속도에서 전환 되도록 시뮬레이션을 진행하였다.

3. 결론

본 연구는 고속 운행 중인 EV에서 메인 MCU 고장이 발생할 경우 안전하게 제동하는 방법에 대해 수행하였다. 삼상 단락과 다이오드 정류를 분석하여 두 모드를 전환 하는 알고리즘을 소개하였으며 시뮬레이션을 통해 알고리즘을 입증 하였다. 하지만 EV의 고전압 배터리와 구동용 인버터상어의 릴레이가 턴 온되어 있는 경우에만 가능한 방법으로 모든 상황에서 가능한 안전제동 알고리즘 구현이 다음 연구 과제이다.

이 논문은 포항공과대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] J. Nerg, M. Rilla, V. Ruuskanen, J. Pyrhönen and S. Ruotsalainen "Direct-driven interior magnet permanent magnet synchronous motors for a full electric sports car." IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, no. 8, pp.4286-4294 2014.
- [2] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasaka, and K. Taniguchi, Expansion of operating limits for permanent magnet motor by current vector control considering inverter capacity, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 26, no. 5, pp. 866,871, Sep./Oct. 1990.