

영구자석 동기 전동기 모의를 위한 실시간 부하 모의 장치의 직류단 전압 설계

이윤로, 권용철, 설승기
서울대학교

DC-link Voltage Design of a Real-Time Emulator for the Emulation of Permanent-Magnet Synchronous Motors

Yoon-Ro Lee, Yong-Cheol Kwon and Seung-Ki Sul
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 하이브리드 / 전기 자동차의 견인용 전동기로 널리 쓰이는 영구자석 동기 전동기를 실시간으로, 실제 전력 상황에서 모의하는 실시간 부하 모의 장치(Real-Time Emulator, RTE)의 구동에 필요한 직류단 전압의 크기에 대하여 분석한다. 운전 주파수 및 스위칭 주파수 전류 모의까지 가능한 부하 모의 장치에서, 모의 전류 및 모의 운전 속도에 따라 필요한 직류단 전압을 구하는 방법을 이론적으로 전개하고, ‘도요타社’의 하이브리드 자동차 ‘프리우스’에 내장된 견인 전동기의 모의를 위해 필요한 직류단 전압의 계산에 이를 적용해본다. 실제 물리적 지표를 반영하기 위해 모의하고자 하는 전동기에 대하여 유한요소법 (Finite Element Method, FEM)을 실행하여 얻은 값들을 사용하였다.

1. 서론

전세계 자동차 시장에서 하이브리드 / 전기 자동차가 차지하는 비중이 점차 증대됨에 따라, 견인 전동기 및 전동기 구동용 인버터의 연구·개발 분야에서 매입형 영구자석 동기 전동기의 실시간 부하 모의 장치에 대한 수요가 증가하고 있다. 이와 함께, 최근 SiC(Silicon Carbide) 소자의 제조 기술이 성장함에 따라 고속 스위칭이 가능한 고전압, 대전류의 능동 소자가 개발 및 출시되고 있다. 이러한 소자들을 통해, 운전 주파수 대역의 전류만을 모의하던 기존의 부하 모의 장치는 스위칭 주파수 대역 전류까지 모의를 할 수 있는 시스템으로 발전할 계기를 마련하게 되었다. 운전 주파수 대역의 모의만 가능하였던 기존의 부하 모의 장치는, 주된 용도가 견인 전동기 구동용 인버터의 내구성 검증 정도로 제한되었던 것에 반하여, 스위칭 주파수 대역까지 모의가 가능한 고성능의 부하 모의 장치는 각종 제어 알고리즘 연구 및 인버터의 성능 실험에 사용될 수 있고 산업 전반에 걸쳐 많은 수요가 있을 것으로 예상된다. 이에 따라 새로운 형태의 부하 모의 장치에서, 모의 전류 및 모의 운전 속도에 따라 필요한 직류단 전압을 구하는 방법을 이론적으로 전개한다. 마지막으로, ‘도요타社’의 하이브리드 자동차 프리우스에 내장된 견인 전동기의 모의를 위해 필요한 직류단 전압의 계산에 이를 적용해본다. 실제 물리적 지표를 반영하기 위해 모의하고자 하는 전동기에 대하여 유한요소법을 실행하여 얻은 값들을 사용하였다.

2. 부하 모의 장치의 직류단 전압 계산

전동기의 전압, 전류의 관계를 식(1)과 같이 동기 좌표계에서 나타낼 수 있다.^[1]

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -L_{qs} i_{qs}^r \\ L_{ds} i_{ds}^r \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda_f \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{dth} & 0 \\ 0 & L_{qth} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix}. \quad (1)$$

좌변의 전압 항은 인버터의 출력단 전압이고, 우변의 앞선 세 항은 전동기의 운전 주파수 대역의 전압을, 마지막 di/dt 항은 스위칭 주파수 대역의 전압을 의미한다.

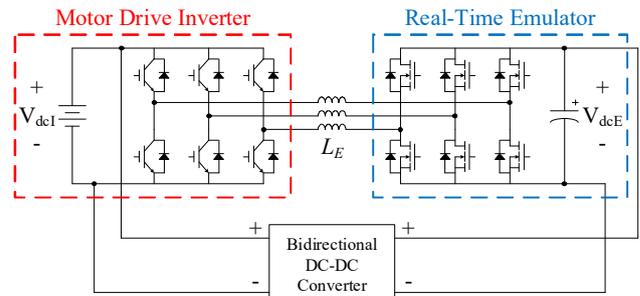


그림 2.1 부하 모의 장치의 시스템 구성^[2]

그림 2.1에 실시간 부하 모의 장치의 전체 구성이 도시 되어있다. 왼쪽에는 전동기 구동용 인버터가, 오른쪽에는 부하 모의 장치가 위치해 있으며, 부하 모의 장치는 고속 스위칭을 위한 SiC MOSFET으로 구성되어 있다. 그 사이에는 상 별로 단상 인덕터가 결선 되어 있으며, 각 인덕터의 인덕턴스를 L_E 로 표시한다. 부하 모의 장치의 직류단 전압은 전동기 구동용 인버터의 직류단으로부터 양방향 DC-DC 컨버터를 통해 공급 받는다. 인버터와 부하 모의 장치의 직류단 전압을 각각 V_{dcl} 와 V_{dcE} 라고 한다. 위 구조에서의 전압, 전류 방정식을 구하면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = R_E \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -L_E i_{qs}^r \\ L_E i_{ds}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_E & 0 \\ 0 & L_E \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{dE} \\ v_{qE} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

좌변의 전압 항은 인버터의 출력단 전압이고, 우변의 앞선 두 항은 선로의 ESR(Equivalent Series Resistance)과 인덕턴스로 인한 전압 강하 성분을, 세번째 di/dt 항은 인버터의 스위칭 대역에 해당하는 전압 성분이다. 부하 모의 장치의 스위칭 주파수는 인버터에 비해 매우 높기 때문에, 부하 모의 장치의 스위칭 주파수 대역 성분은 생략한다. 마지막 항은 부하 모의 장치가 합성하는 전압이다.

식 (1)과 식 (2)에서의 운전 주파수 대역의 전류 모의를 위해 부하 모의 장치가 합성해주어야 하는 전압은 식 (3)과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} v_{dEf}^r \\ v_{qEf}^r \end{bmatrix} = (R_s - R_E) \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \omega_r \begin{bmatrix} -(L_{qs} - L_E)i_{qs}^r \\ (L_{ds} - L_E)i_{ds}^r + \lambda_f \end{bmatrix}. \quad (3)$$

다음으로, 식 (1)과 식 (2)에서의 스위칭 주파수 대역 성분만을 추출하면 식 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{dsh} & 0 \\ 0 & L_{qsh} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_E & 0 \\ 0 & L_E \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{dEh}^r \\ v_{qEh}^r \end{bmatrix}. \quad (4)$$

위의 식을 다시 정리하여 부하 모의 장치에서 인버터의 스위칭 주파수 대역 전류를 모의하기 위해 합성 해주어야 하는 전압은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{dEh}^r \\ v_{qEh}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} - \frac{L_E}{L_{dsh}L_{qsh}} \begin{bmatrix} L_{qsh} & 0 \\ 0 & L_{dsh} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{dsh}^r \\ v_{qsh}^r \end{bmatrix}. \quad (5)$$

최종적으로 부하 모의 장치가 합성해주어야 하는 전압은 식 (3)과 식 (5)의 합으로 주어진다. 이때, 전동기에 흐르는 d, q축 전류 및 회전자의 위치에 따라 쇄교자속 및 동적 인덕턴스가 변동하므로, 유한요소법을 통한 모의 대상 전동기 제정수의 참조표(look-up table)가 필요하다.

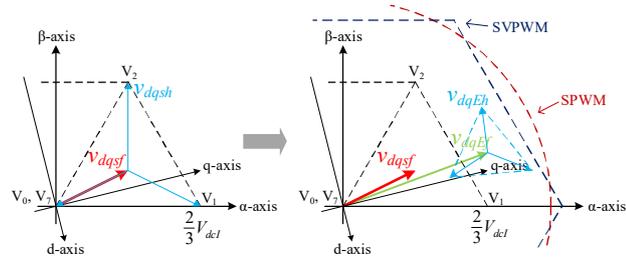


그림 2.2 인버터 및 부하 모의 장치의 전압 벡터도

위의 그림에서 v_{dqsf} 는 인버터의 출력 전압 중 운전 주파수 대역 성분만을 지칭한 전압 벡터이며, 식 (1)에서 식 (4)를 뺀 것에 해당된다. 다음으로, v_{dqsh} 는 스위칭 주파수 대역의 전류를 유도하는 전압 벡터에 해당하며, v_{dqsf} 가 인버터의 전압 합성 가능 영역 중 섹터1에 포함되는 상황을 예시로 그린 것이다. 결과적으로 부하 모의 장치가 합성 해주어야 하는 전압은 v_{dqEf} 와 v_{dqEh} 의 합 벡터로 표현되고, 이는 부하 모의 장치의 전압 합성 가능 영역에 포함되어야 한다.

부하 모의 장치가 SPWM으로 전압을 합성할 때, 전압 합성 가능 영역은 반지름이 $\frac{1}{2} V_{dcE}$ 인 원의 형태로 그려지고, 부하 모의 장치가 SVPWM을 사용할 때는 전압 합성 가능 영역이 한 변의 길이가 $\frac{2}{3} V_{dcE}$ 인 정육각형으로 그려진다.^[3] 모의 대상 전동기의 제정수 look-up table을 활용하여 모든 운전점들에 대한 전압 벡터를 계산한 뒤, 전압 합성 가능 영역이 모든 전압 벡터들을 포함할 수 있도록 V_{dcE} 를 정해야 한다.

3. 이론 적용 결과

모의 대상인 ‘프리우스’의 견인 전동기의 형태와 그의 제정수가 그림 3.1에 제시되어 있다. 이 전동기에 대해, d, q축 전류 및 회전자의 위치에 따른 d, q축 쇄교자속의 look-up table을 유한요소법을 통해 구하고, 전류 변화량에 따른 쇄교자속의 변화량으로부터 인덕턴스 look-up table을 구할 수 있다.

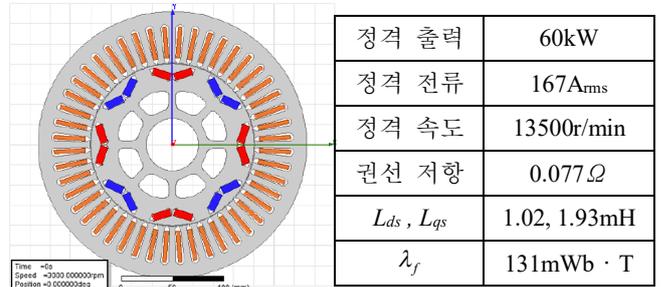


그림 3.1 모의 대상 전동기의 형태 및 제정수

이 인덕턴스 값들을 활용하여, 여러가지 운전 속도에서 d, q축 전류 운전점 별 필요한 직류단 전압을 그래프로 나타내면 그림 3.2와 같다. 인버터의 직류단 전압과 전동기의 전류 제한으로 인해 운전할 수 없는 운전점에 대해서는 전압을 계산하지 않았다. L_E 는 전동기 인덕턴스 L_{ds}, L_{qs} 의 평균값의 30%에 해당하는 0.44mH로, R_E 는 0.2Ω으로, 인버터의 직류단 전압은 650V로 선정하였다. 그림 3.2에서 빨간 점으로 표시된 부분은, 각 속도 별 최고의 직류단 전압을 필요로 하는 운전점이고, 그 지점에서의 값들을 표 3.1에 정리하였다.

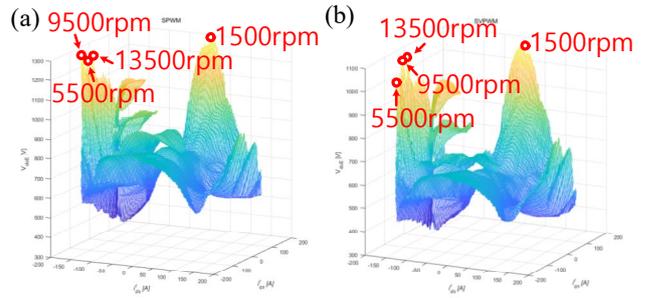


그림 3.2 부하 모의장치가 (a) SPWM (b) SVPWM 할 때, 속도 및 d, q축 전류에 따른 직류단 전압

	1500r/min	5500r/min	9500r/min	13500r/min
SPWM	1280V	1281V	1230V	1239V
SVPWM	1051V	994V	1063V	1069V

표 3.1 운전 속도 별 필요한 직류단 전압

최대 값에 10%정도의 마진을 주어, SPWM은 1400V, SVPWM은 1250V정도의 직류단 전압이 필요하다.

4. 결론

본 논문에서는 운전 주파수 대역 뿐만 아니라, 스위칭 주파수 대역의 전류까지 모의할 수 있는 실시간 부하 모의 장치가 합성해주어야 하는 전압을 수식화하고, 부하 모의 장치의 전압 합성 방식에 따라 필요한 직류단 전압을 구하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법을, ‘프리우스’에 내장된 견인 전동기 모의에 필요한 직류단 전압 계산에 적용하였다. 이를 통해 얻은 직류단 전압이 1250V~1400V이기 때문에, 그림 2.1에 나온 2-level 토폴로지를 사용하기 위해서는 적어도 전압 정격이 1700V 이상 되는 소자가 필요하다.

참고 문헌

- [1] P.Pillay, R.Krishnan, “Modeling, simulation, and analysis of permanent-magnet motor drives. I. The permanent-magnet synchronous motor drive”, IEEE Trans, on Ind. Appl., Mar/Apr, 1989
- [2] Amitkumar. K.S, R.Sudharshan K, Pragasen P, “A Versatile Power Hardware-in-the-loop Based Emulator for Rapid Testing of Electric Drives”, Energy Conversion Congress & Expo., Cincinnati, Oct, 2017
- [3] 정대웅, “오프셋 전압에 의한 3상 전압형 인버터 PWM 방법의 일반적 해석”, 박사학위논문, 서울대학교 대학원, 2000년 2월