

과변조 영역에서의 전압변조 방식에 대한 리플분석

황정필, 유동호, 하성필, 이정효, 원충연
성균관대학교

Analysis of the ripple on the voltage modulation method in the overmodulation regions

Jung Pill Hwang, Dong Ho Yu, Sung Pill HA, Jung Hyo LEE, Chung Yuen Won
Sungkyunkwan University

ABSTRACT

본 논문에서는 과변조 영역에서의 전압변조방식에 따른 리플 분석에 대하여 설명한다. 일반적으로 과변조 영역에서의 제어는 제어가능한 속도영역의 확장과 동특성 향상을 위해 이용된다. 전압 지령이 출력 가능한 전압 변조 영역 이상으로 상승되는 경우, 이를 출력 가능한 전압 범위내로 지령을 수정하게 되는 데, 이 때 출력해야할 전압 지령과 출력 가능한 전압 사이의 오차는 전류제어 수행에 리플로 발생한다. 본 논문은 이러한 과변조 영역에 대한 분석에 있어 데드타임이나 최소 PWM 출력이 고려된 전압 변조 방식에 대해 고찰한다. 이에 대한 전압 및 전류 리플 분석을 통해 과변조 영역에서의 적절한 전압 변조 방식에 대해 알아본다.

1. 서론

영구자석 동기전동기는 작은 부피로도 큰 토크를 낼 수 있어 전기자동차를 비롯한 여러 산업 응용 분야에서 사용되고 있다. 이러한 전동기 제어는 기본적으로 PWM 방식이 적용된 인버터가 사용되고 있으며 PWM 변조 방식에 따라 전동기가 출력할 수 있는 출력 영역이 제한된다.

SPWM의 경우 구현은 간단하지만, 출력 가능 범위가 좁아 전동기 구동용 인버터에 잘 사용되지 않는다. DPWM의 경우 스위칭 손실이 저감되는 장점이 있지만, 구현이 복잡하고 출력 전류의 리플이 큰 단점이 있다.^[1] 따라서 전동기 구동용 인버터에서는 SVPWM이 가장 일반적으로 사용되고 있다. SVPWM의 경우 $V_{dc}/\sqrt{3}$ 가 제어가능한 최대 선형 변조 영역이지만 실제로는 데드타임과 최소 PWM 인가 시간에 의해 이보다 더 작은 영역에서 제어 영역을 설정한다. 그러나 이러한 제한 영역의 설정은 인버터의 출력을 제한시킨다.

특히 차량 구동용 전동기 인버터의 경우 제어 가능한 속도 영역의 제한을 가져오기 때문에, 배터리의 전압을 계산된 변조 영역의 전압보다 상승시켜야 하는 문제점이 발생한다. 따라서 과변조 영역에서의 안정적인 운전 방법은 필수적이다.

기존 SVPWM에서 선형 변조 영역 이상의 과변조 영역에서의 운전은 여러 가지로 분석되었지만,^[2] 최소 PWM 인가 시간과 데드타임에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 특히 최소 PWM 인가 시간의 경우 IGBT 게이트 턴 온, 턴 오프에 필요한 시간이므로 이에 대한 고려는 필수적이다. 본 논문은 이러한 최소 PWM 인가 시간에 의한 과변조 영역에서의 제어 성

능에 대한 영향을 알아본다.

2. 최소 PWM 듀티에 따른 전압지령 변화

그림 1은 일반 IGBT의 게이트 전압 파형과 그에 따른 스위칭 동작 파형을 나타낸다. 그림을 살펴보면 IGBT가 턴 온, 턴 오프 동작을 하기 위해서는 이를 위한 최소한의 턴 온, 턴 오프 시간을 필요로 한다. 이는 IGBT 게이트 단의 기생 캐패시턴스에 의한 것이며 입력 시그널의 변동에 즉각적인 반응이 불가능하며, 이로 인한 턴 온, 턴 오프 시간의 딜레이가 존재한다.

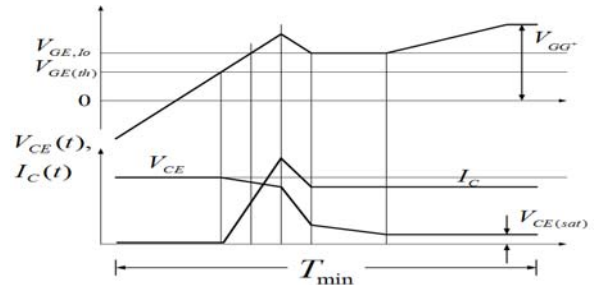


그림 1. IGBT가 턴 온 될 때까지 걸리는 시간(= T_{min})

따라서 이러한 딜레이 시간에 대해 IGBT의 동작은 인가되는 전압 지령과 관계없이 최소 PWM 듀티에 의한 과변조 영역이 발생한다. 이러한 과변조 영역은 게이트 드라이브의 직렬저항값에 따라 변화하며 이에 대한 선형 변조 영역의 축소는 기존의 과변조 영역에 대한 분석결과^[2]와는 다른 결과를 가져온다. 다음은 게이트 단의 회로를 간단한 RC회로로 모델링 하였을 때, 턴 온 시 최소 PWM 인가 시간을 나타낸 수식이다.

$$V_{gate} = V_{on} + (V_{off} - V_{on})e^{-t/R_{on}C_n} \quad (1)$$
$$T_{min} = 4\tau \quad (\tau = R_{on}C_n)$$

여기서 V_{gate} 는 게이트 전압, V_{on} , V_{off} 는 게이트 드라이브 턴 온, 턴 오프 출력전압, R_{on} 는 턴 온 직렬저항, C_n 은 IGBT 게이트단 기생 캐패시턴스 이다.

최소 PWM 인가시간에 대한 선형 변조 영역의 감소 영역을 얻기 위하여 T_{min} 에 대한 전압 크기는 다음과

같은 수식을 통해 얻어진다.

$$V_{\min} = \frac{V_{dc}}{2T_s} T_{\min} \quad (2)$$

이에 따른 SVPWM의 선형변조영역의 감소는 다음과 같이 표현된다.

$$V_{Max\ Linear} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} - V_{\min} \quad (3)$$

최소 PWM 듀티에 의해 감소된 선형변조영역을 그림으로 표현하면 다음과 같다. 기존의 SVPWM 선형변조영역은 인버터 최대 출력 전압, 즉 육각형의 내접원으로 표현할 수 있다. 그러나 이러한 최소 PWM 듀티를 반영하면 선형변조영역은 V_{\min} 에 의해 감소된 선형변조영역을 갖는다.

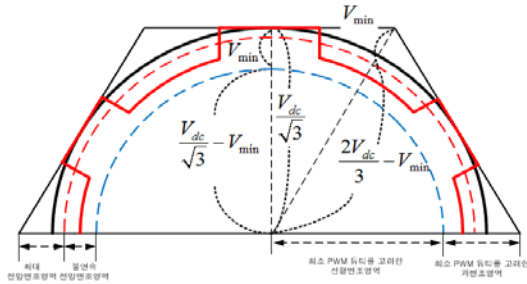


그림 2. 최소 PWM 듀티에 따른 전압변조영역

한편, 선형변조영역을 벗어나는 영역에서 전압지령은 불연속 전압변조영역과 육각형 전압지령에 대한 과변조영역으로 나누어진다. 불연속 전압변조영역은 전압지령의 듀티가 T_{\min} 보다 작은 영역에서는 과변조 동작을 하고, T_{\min} 보다 큰 영역에서는 선형변조를 한다. 이에 따른 불연속 전압변조 영역에 대한 PWM 출력은 그림 3과 같다.

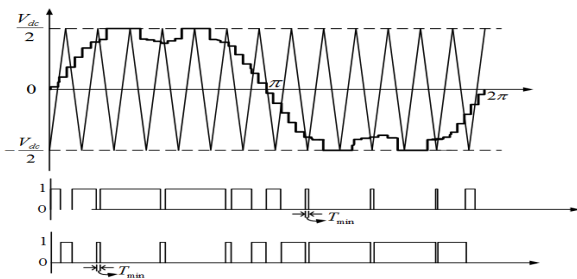


그림 3. 불연속 전압변조 영역에서의 PWM 출력과 상전압 지령

3. 시뮬레이션

다음은 최소 PWM 듀티를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우의 전류 리플에 대한 시뮬레이션 결과이다. 최소 PWM 인가시간은 8[us]로 설정하였다. 그림 4는 dq축 전압도메인으로 표현된 지령전압 결과이다. 기존 SVPWM 방식의 경우, 3고조파 성분이 제거되어 원으로

표현되지만 최소 PWM 인가시간을 고려할 경우 이에 대한 불연속 영역이 존재한다. 그림 5와 6은 최소 PWM 인가시간을 고려하지 않았을 때와 고려하였을 때의 전압 지령에 대한 전류파형이다. 최소 PWM 인가시간을 고려하지 않았을 때의 THD는 0.15인 반면, 최소 PWM 인가시간을 고려하였을 때의 THD는 0.37이다.

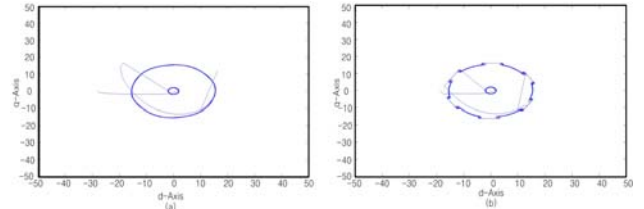


그림 4. dq축 전압도메인으로 표현된 지령전압 (a) 최소 PWM 듀티를 고려하지 않을 경우 (b) 최소 PWM 듀티를 고려할 경우

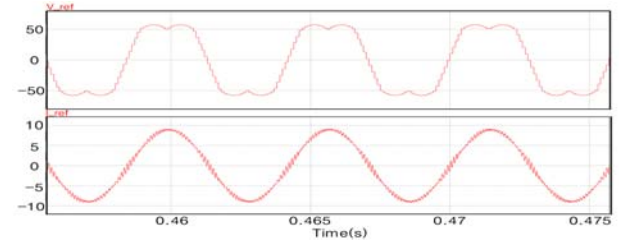


그림 5. 최소 PWM 듀티를 고려하지 않을 때의 상전압지령과 상전류 파형

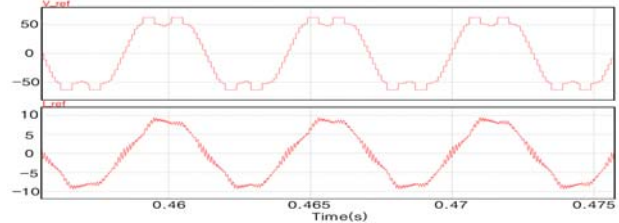


그림 6. 최소 PWM 듀티를 고려할 때의 상전압지령과 상전류 파형

4. 결 론

본 논문은 최소 PWM 듀티에 따른 과변조 영역에서의 전압 변조방식에 대한 전류 리플을 분석하였다. 먼저 최소 PWM 듀티에 대한 정의와 이에 따른 선형변조영역과 과변조영역을 구분하였고, 이를 시뮬레이션하여 전류 리플의 THD를 획득하였다. 이를 통해 기존의 이상적인 스위치를 적용한 분석과는 달리 IGBT에 내재하는 최소 PWM 듀티에 따라 수정된 변조 영역에 대한 분석결과를 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

[1] M. Hava, J. Kerkman, and A. Lipo, "A High Performance Generalized Discontinuous PWM Algorithm," *IEEE TRANS. on Power Electron.*, vol. 34, pp 1059 1071, SEP, 1998.

[2] Jin Sik Park, Shin Myoung Jung, Hag Wone Kim, and Myoung Joong Youn "A Study on Stable Torque Control in Overmodulation Region for High Speed PMSM Systems." *IEEE. PESC Conference*, 2008 pp.2373 2377, 2008