

# 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시 구동 장치에 따른 출력 성능 비교 분석

정혜인, 김상훈

강원대학교 BIT 의료융합학, 강원대학교 전기전자공학과

## Comparative Analysis of Output Performance According to Driving Circuits for Two-phase Hybrid Stepping Motors

Hye-In Jeong, Sang-Hoon Kim

Kangwon National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 2상 하이브리드 스텝핑 모터 구동을 위해 H-bridge 회로 또는 3상 인버터를 이용하는 경우의 출력 성능을 비교 검토하였다. 벡터 제어로 구동하는 경우 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 상전압, 상전류의 THD(Total Harmonic Distortion)과 출력 토크 리플을 분석하였으며, 이를 위해 Matlab/Simulink를 이용한 150W급 스텝핑 모터의 시뮬레이션을 수행하였다.

### 1. 서 론

하이브리드 스텝핑 모터는 개루프(Open-loop) 제어에 의한 속도 및 위치 제어가 가능하며, 위치 오차가 누적되지 않아 공장 자동화 기기, 로봇 제어 등 정밀한 위치 제어가 필요한 응용 분야에 널리 사용되고 있다. 이러한 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동을 위한 전력 변환 장치로는 H-bridge 회로나 3상 인버터가 사용될 수 있으며, 이 경우 사용된 전력 변환 장치 및 PWM 방법에 따라 전압, 전류의 고조파, 출력 토크 리플 등의 특성이 달라질 수 있다. 따라서 본 논문에서는 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 구동 시 3상 인버터는 SVPWM (Space Vector PWM)을, H-bridge 회로는 바이폴라(Bipolar) 또는 유니폴라(Unipolar) 방식으로 SPWM하는 경우에 대해 비교 분석하였다.

### 2. 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동 장치

그림 1과 3 (a)는 각각 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동을 위해 주로 사용되는 H-bridge 회로와 이러한 구동 장치를 이용한 경우의 출력 가능한 전압 영역을 나타낸다. 바이폴라 또는 유니폴라 방식으로 SPWM하는 경우 선형 변조 영역에서 얻을 수 있는 최대 기본파 상전압의 크기는  $V_{dc}$ 가 된다. 바이폴라 방식의 경우 순시 출력 전압이 양극성으로 변동하기 때문에 유니폴라 방식에 비해 전류를 빠르게 변동시킬 수 있으나, 토크 리플이 더 크다는 단점이 있다 [1].

한편, 3상 교류 전동기 구동을 위해 주로 사용되는 3상 인버터는 2상 스텝핑 모터의 구동을 위해 사용될 수 있으며, H-bridge 회로보다 스위치 소자의 수를 줄일 수 있으므로 비용 절감이 가능하다는 장점이 있다. 그림 2와 3 (b)에 2상 스

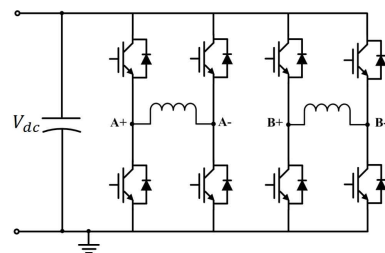


그림 1 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동을 위한 H-bridge 회로

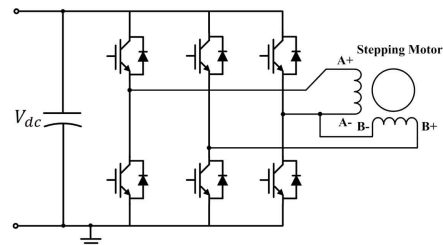


그림 2 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동을 위한 3상 인버터

테핑 모터 구동을 위한 3상 인버터와 이러한 구동 장치를 이용한 경우의 출력 가능한 전압 영역을 나타낸다. SVPWM을 적용한 경우 선형 변조 영역에서 얻을 수 있는 최대 기본파 상전압의 크기는  $V_{dc}/\sqrt{2}$ 가 되며 [2], H-bridge 회로와 3상 인버터에 대한 선형 변조 영역에서의 최대 기본파 상전압의 크기가 다르므로 본 논문에서는 동일한 전압 변조 지수 조건에서의 출력 성능을 비교하기 위해 그림 3 (b)의 3상 인버터의 출력 전압 영역을  $\sqrt{2}$ 배하여 나타내었다. 여기서 식 (1)의 전압 변조 지수  $M$ 은  $V_{dc}$ 에 대한 출력 상전압의 기본파 크기  $V_1$ 의 비를 나타내며,  $V_{dc}$ 는 H-bridge 회로를 이용한 경우의 직류 입력 전압을 의미한다.

$$M = \frac{V_1}{V_{dc}} \tag{1}$$

2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시, 사용된 구동 장치 및 PWM 기법에 따라 상전압, 상전류의 THD, 출력 토크 리플 등의 성능이 달라질 수 있으므로 본 논문에서는 그 차이점을 비교, 분석하였다.

### 3. 출력 성능 비교 분석

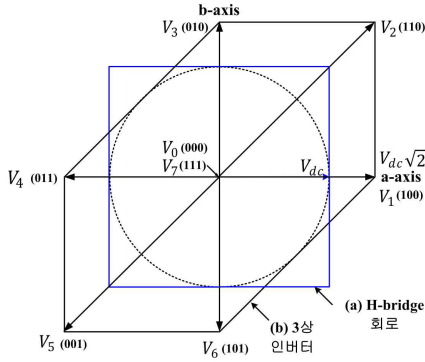


그림 3 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 구동 장치에 따른 출력 가능한 전압 영역

출력 성능 비교를 위하여 150W급 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시 속도 제어를 수행하였으며, 스텝핑 모터의 홀딩 토크는 0.5 N·m, 정격 전류는 1.2 A, 스위칭 주파수는 20kHz이며, 50% 부하 조건에서 시뮬레이션하였다. 또한 동일한 전압 변조 지수 조건에서의 특성 비교를 위하여  $V_{dc}$ 는 H-bridge 회로의 경우 40V로, 3상 인버터의 경우 H-bridge의  $\sqrt{2}$  배로 설정하였다.

그림 4는 스텝핑 모터 구동에 SPWM을 적용한 H-bridge 회로, SVPWM을 적용한 3상 인버터를 이용한 경우의 d,q 축 전류, 출력 토크, 속도를 비교하여 나타낸다. 영구 자석을 사용하는 하이브리드 스텝핑 모터에는 디텐트 토크에 의한 기본과 주파수의 4배에 해당하는 리플 성분이 존재한다. 출력 토크 리플은 디텐트 토크와 스위칭 리플이 혼합되어 나타나는데, 디텐트 토크의 영향이 큼을 알 수 있다. 스위칭에 의한 토크 리플의 경우 H-bridge의 유니폴라 구동에 비해 3상 인버터 구동의 경우는 1.1배, H-bridge의 바이폴라 구동의 경우는 1.5배 크다. 그러나, 이러한 토크 리플에 의한 속도 리플은 세가지 구동의 경우 거의 비슷함을 알 수 있다.

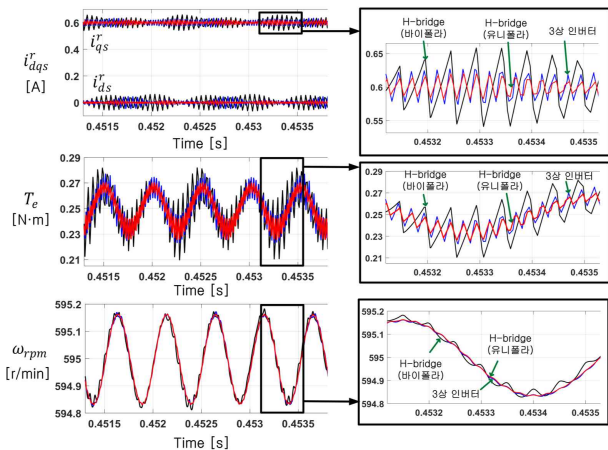


그림 4 2상 하이브리드 스텝핑 모터의 벡터 제어 시 시뮬레이션 결과 (전압 변조 지수  $M = 0.6$ )

그림 5 (a), (b)는 스텝핑 모터의 벡터 제어 시 H-bridge 회로와 3상 인버터를 사용했을 때의 전압 변조 지수에 따른 상전압, 상전류의 THD를 비교한 결과를 나타낸다. 상전압의 THD는 전압 변조 지수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이며, 상전압, 상전류 모두 H-bridge (바이폴라), 3상 인버터,

H-bridge (유니폴라) 순으로 THD 값이 큰 것을 확인할 수 있다. 그림 6 (a), (b)는 각각 출력 토크와 속도의 리플 비교 결과를 나타낸다. (a)의 출력 토크 리플 비교 결과 H-bridge (유니폴라)에 비해 3상 인버터는 최대 1.4배 ( $M = 1$ ), H-bridge (바이폴라)는 최대 2배 ( $M = 0.2$ )의 차이를 보이며, H-bridge (바이폴라)의 경우 가장 큰 토크 리플을 갖는 것을 확인할 수 있다. (b)의 속도 리플은 전압 변조 지수가 높아질수록 디텐트 토크에 의한 영향이 작아져 감소하는 경향을 보이며, H-bridge(바이폴라, 유니폴라), 3상 인버터를 적용한 경우에 대한 속도 리플 차이가 최대 0.1 r/min으로 매우 작음을 확인할 수 있다.

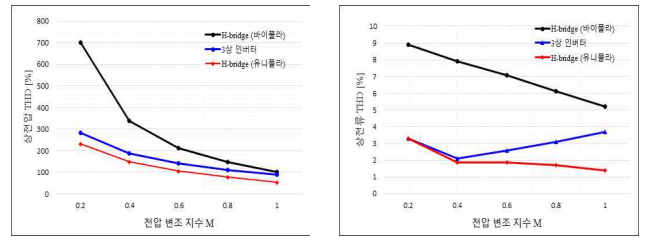


그림 5 상전압과 상전류의 THD 비교

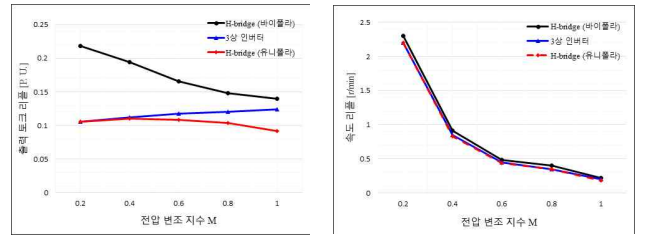


그림 6 출력 토크 리플 및 속도 리플 비교

#### 4. 결 론

본 논문에서는 2상 하이브리드 스텝핑 모터 구동 시, H-bridge 회로는 바이폴라 또는 유니폴라 방식으로 SPWM을, 3상 인버터는 SVPWM을 적용하여 벡터 제어하는 경우의 출력 성능을 비교 분석하였다. 분석 결과 H-bridge (바이폴라), 3상 인버터, H-bridge (유니폴라) 순으로 상전압, 상전류의 THD와 토크 리플이 컸으나, 토크 리플 차이에 의한 속도 리플의 차이는 약 0.1 r/min 미만으로 매우 작았다. H-bridge의 유니폴라 구동 시와 유사한 특성을 가진 3상 인버터의 경우 H-bridge 회로에 비해 스위칭 소자의 수를 줄일 수 있으므로 저가 구동 시스템에서 사용하면 비용 절감이 가능할 것이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] S. H. Kim, *Electric Motor Control, DC, AC, and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch. 2, 2017.
- [2] D. K. Kim, D. H. Jang, and D. Y. Yoon, "Comparative analysis of CBPWM methods for two-phase three-leg inverters using zero sequence concept," *Journal of Power Elec.*, pp. 948-957, 2020, April.