부트스트랩 회로를 적용한 3-레벨 NPC 인버터의 저속 운전을 위한 PWM 스위칭 전략

정준형, 임원상, 구현근, 김장목
부산대학교

A PWM strategy for low speed operation of three-level NPC inverter based on bootstrap gate drive circuit

Jun-Hyung Jung, Won-Sang Im, Hyun-Keun Ku, Jang-Mok Kim
Department of Electrical Engineering, Pusan National University, Busan 609-735, KOREA

ABSTRACT

본 논문에서는 부트스트랩 게이트 드라이브 회로가 적용된 3-레벨 NPC 인버터의 전동기 저속 운전에 적용하기 위한 PWM 스위칭 전략을 제안한다. 3-레벨 NPC 인버터를 이용하여 전동기를 제어할 경우, 일반적으로 구현의 편리성 때문에 CBPWM이 주로 사용된다. CBPWM 중 Unipolar 방법이 주로 사용되지만 부트스트랩 회로를 적용한 3-레벨 NPC 인버터의 전동기 저속 운전 시 부트스트랩 캐패시터 방전에 의한 전압 감소 크기가 증가한다. 캐패시터 전압이 정상적인 인버터 동작을 위한 한계 전압 이하로 감소하면 정상적인 제어는 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 부트스트랩 회로가 적용된 3-레벨 NPC 인버터의 전동기 저속 운전에 적용하기 위한 PWM 스위칭 전략에 대해 제안 하였으며 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 증명하였다.

1. 서 론

부트스트랩 게이트 드라이브 회로는 구조가 비교적 간단하며 비용 대비 효율적이므로 저용량 멀티레벨 인버터에 적합한 방식 중 하나이다.[1] 하지만 인버터 스위칭 동작에서 중요한 역할을 하는 부트스트랩 캐패시터의 충, 방전 특성은 인버터의 신뢰성과 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히 인버터 저속 운전의 경우 부트스트랩 캐패시터 방전에 의한 전압 감소가 크기 때문에 게이트 드라이버가 스위치(IGBT)로 게이팅 신호를 출력 하지 못하는 문제가 발생 할 수 있다. 그 결과 정상적인 전동기 제어가 불가능하다. 따라서 본 논문에서는 인버터 저속 운전 시 발생하는 전압 감소 현상을 개선하기 위해 Dipolar, Partial-Dipolar 방법을 적용 하였으며 시뮬레이션 결과를 통해 검증하였다.

2. 부트스트랩 회로가 적용된 3-레벨 NPC인버터의 저속 운전

그림 1은 부트스트랩 회로가 적용된 3-레벨 NPC 인버터의 3가지 주요 스위칭 상태에 따른 부트스트랩 회로 동작에 대한 설명이다.

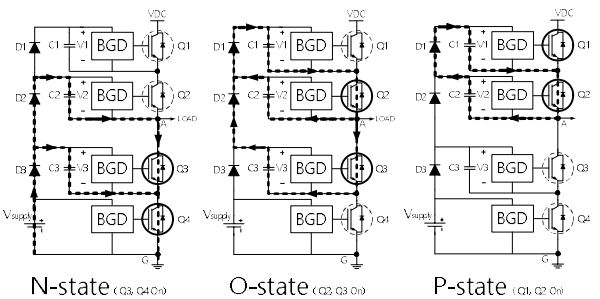

그림 1 스위칭 상태에 따른 부트스트랩 회로 동작

3-레벨 NPC 인버터에 사용되는 PWM 방법 중 일반적으로 사용되는 Unipolar 방법은 지령 전압의 반 주기 동안 P-state와 O-state의 스위칭을 하며 나머지 반 주기 동안 O-state와 N-state의 스위칭을 한다. 3가지의 스위칭 동작 중 V_{supply}를 통한 캐패시터 충전은 N-state에서만 이뤄진다. 따라서 N-state 스위칭이 없는 반 주기 동안에는 각 캐패시터에 충전된 전원으로 스위칭 동작을 해야만 한다. 저속 영역 운전의 경우 N-state를 제외한 스위칭의 시간이 길어지므로 전체 주기 동안 부트스트랩 캐패시터의 전압 감소량이 커진다. 만약 캐패시터 전압이 일정 전압 이하로 감소하면 게이트 드라이버 출력이 중단되면서 정상적인 인버터 스위칭 동작이 불가능하다. 즉 정상적인 제어가 불가능하다. 따라서 정상적인 제어를 위해 반드시 캐패시터 전압을 항상 한계 전압 이상으로 유지해야만 한다. 이와 같이 Unipolar 방법은 저속 운전에 한계점을 가지고 있다.

3. 저속 영역 운전을 위한 PWM 방법

Unipolar 방법 보다 더 낮은 속도에서 운전 가능한 PWM 방법으로 Dipolar 방법과 Partial-Dipolar 방법이 있다. 한 주기의 PWM 스위칭 동안 3가지의 스위칭 상태를 모두 가지는 Dipolar 방법은 스위칭 주기마다 캐패시터 충전에 필요한 N-state 스위칭을 하므로 전압 감소가 매우 작아 영속 영역을 포함한 모든 속도 영역에서 운전이 가능하다. 하지만 Unipolar 방법 보다 스위칭 손실이 크며 고조파 특성이 나쁜 단점이 있다.

Partial-Dipolar 방법은 Unipolar 방법과 Dipolar 방법의 혼합형이다. 3가지의 스위칭 상태를 가지는

Dipolar 스위칭의 영역이 넓어 질수록 Unipolar 스위칭 영역이 줄어들어 부트스트랩 캐패시터 전압 감소량이 작아진다. 따라서 더 낮은 속도의 운전이 가능 하다. 하지만 Partial-Dipolar 방법은 전체 스위칭 주기 중 Dipolar 스위칭 비율에 따라 스위칭 손실과 고조파 특성이 나빠지는 특징이 있다. 또한 부분적인 Dipolar 스위칭을 하기 때문에 영 속도 운전은 불가능하다.

4. 시뮬레이션 결과

표 1 대상 전동기 상수(유도 전동기)

정격 출력	5.5 [kW]	정격 속도	1165 [rpm]
R_S	0.66726 [Ω]	극수	6
R_R	1.1171 [Ω]	C1	5 [uF]
L_S L_R	77.29 [mH]	C2	10 [uF]
L_{lr} L_{ls}	6.817 [mH]	C3	10 [uF]

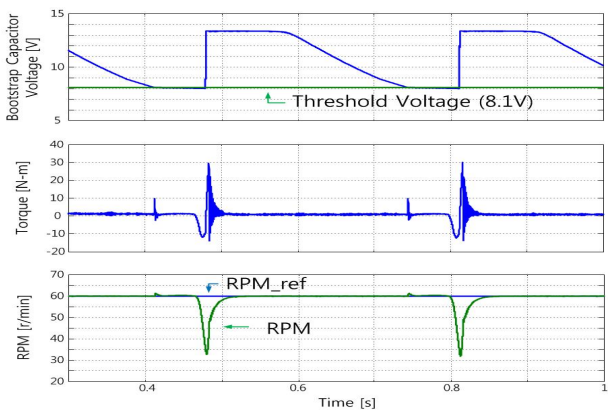

그림 2 Unipolar modulation 시뮬레이션 결과

그림 2는 Unipolar 방법을 사용한 전동기 저속 운전 시뮬레이션 결과이다. 저속 운전 시 전체 스위칭 주기가 길어지므로 전압 감소 영역 또한 길어진다. 이 때 한계 전압까지 부트스트랩 캐패시터 전압이 감소하게 되면 정상적인 인버터 동작이 불가능 하기 때문에 정상적인 속도 제어가 되지 않는다.

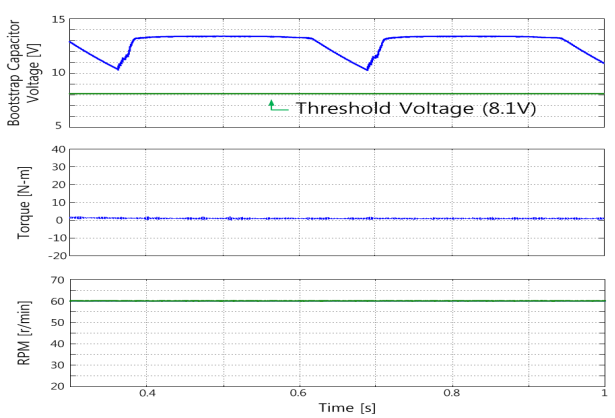

그림 3 Partial-Dipolar modulation 시뮬레이션 결과

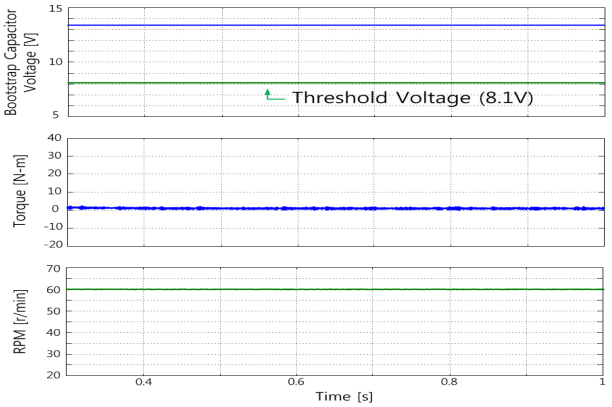

그림 4 Dipolar modulation 시뮬레이션 결과

그림 3과 4는 Partial-Dipolar, Dipolar 방법을 사용한 시뮬레이션 결과이다. Partial-Dipolar 방법은 부분적인 Dipolar 스위칭을 통해 캐패시터의 전압 감소 현상을 개선하였다. 정상적인 운전이 가능 하지만 더 낮은 저속 영역에서는 안정성을 보장 할 수 없다.

Dipolar 방법을 사용한 경우 부트스트랩 캐패시터 전압은 안정적으로 최대 값을 유지한다. 이는 PWM 스위칭 주기마다 포함된 N-state에서 V_{supply}를 통해 캐패시터를 충전하기 때문이다. 그러므로 Dipolar 방법은 영속도 영역에서도 정상적인 운전이 가능하다.

Partial-Dipolar, Dipolar 방법은 Unipolar 방법과 비교해 저속 운전을 가능하게 하지만 상대적으로 스위칭 손실이 많고 고조파 특성이 좋지 않다. 따라서 Dipolar 스위칭 영역을 속도에 따라 증가시키는 Partial-Dipolar 방법을 통해 Unipolar에서 Dipolar 방법으로 최적화된 변환을 고려해야 한다.

3. 결 론

본 논문에서는 부트스트랩 회로가 적용된 3-레벨 NPC 인버터의 전동기 저속 운전에 적용하기 위한 PWM 스위칭 전략을 제안하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 Partial-Dipolar와 Dipolar 방법이 저속에서 운전 가능 한 것을 확인하였다.

이 논문은 2012년도 정부재원(지역혁신 인력 양성 사업) 한국 연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제 입니다. (No. 2012026153)

참 고 문 헌

[1] B. A. Welchko, Mauricio Beltrao de Rossiter Correa, and Thomas A.Lipo, “A three-level MOSFET inverter for low-power drives” in IEEE Trans. on Ind. Electron., vol. 51, no. 3, June 2004.

[2] R. M. Tallam, R. Naik, and T. A. Nondahl, “A carrier-based PWM scheme for neutral-point voltage balancing in three-level inverters,” IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 6, pp. 1734–1743, Nov/Dec.2005