

3레벨 NPC 인버터의 전원전압변조 방식을 이용한 넓은 변조 지수에서 제어 가능한 간단한 중성점 제어 기법

문석환, 박병건, 김지원, 김종무, 이기창, 하현욱, 이정욱, 박병우
한국전기연구원

Simple Neutral Point Potential Control with Wide Modulation Indices Using Unified Voltage Modulation for Three-Level Diode-Clamped Inverter

Seok Hwan Moon, Byoung Gun Park, Ji won Kim, Jong Mu Kim, Ki chang Lee,
Hyung Uk Ha, Jung Uk Lee, Byeong Woo Park
Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

본 논문에서는 3레벨 NPC 인버터의 전원전압변조 방식을 이용하여 넓은 변조 지수에서 제어 가능한 간단한 중성점 제어 방법을 제안하였다. 제안한 제어 방법은 전원 전압 변조방법을 이용한 중성점 균형 계수와 정확한 오프셋 전압의 제한치를 이용하여 계산된다. 중성점 균형 계수는 전류의 극성과 상하 커패시터의 전압에 의해서 정의되어진다. 제안된 제어 방법은 중성점 제어를 위해 공간전압 PWM과 불연속 PWM까지 동작범위를 확장하여 동작되어진다. 제안된 방법은 넓은 변조지수에서 전원전압변조를 이용하여 공간전압 PWM방법을 쉽게 구현할 수 있다. 제안된 중성점 제어 방법의 타당성은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

1. 서론

3 레벨 NPC 인버터는 출력 전류 및 전압의 낮은 고조파 왜곡을 포함하고 있어 최근 낮은 전력반도체 소자의 가격에 힘입어 다양한 산업분야에서 적용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 3 레벨 NPC 인버터는 일반적인 2 레벨 인버터의 출력 파형과 비교하여 동일한 스위칭 주파수에서 낮은 고조파 왜곡을 발생한다는 장점이 있지만, 3 레벨 NPC 인버터는 구조적으로 DC link단의 2개의 커패시터가 직렬로 연결되어 있기 때문에 두 커패시터간의 전압 불균형으로 인한 중성점 전압 변동 문제를 구조적으로 가지고 있다. 따라서, 이러한 중성점 전압 변동을 제어하기 위해 많은 연구가 되고 있다.^[1]

본 논문에서는 3 레벨 인버터의 중성점 전압 변동을 제어하기 위해 전원전압변조방식을 이용하여 간단하게 중성점 전압을 제어하는 방법을 제안하였다. 전원전압변조는 기준 전압에 대한 공간상의 위치를 검출하지 않고 전압벡터에 인가되는 스위칭 시간을 간단하게 계산할 수 있다^[2]. 기존의 중성점 전압변동 제안 방법은 전원전압변조를 이용하여 간단하게 제어를 할 수 있지만, 정확한 오프셋 전압의 제한을 가지고 있지 않기 때문에 높은 변조 지수에서 성능이 저하되는 단점이 있다. 본 논문에서 제안된 방법은 정확한 오프셋 전압 제한치와 중성점 균형 계수를 이용하여 중성점 전압의 평형을 위한 오프셋 전압을 계산한다. 계산된 오프셋 전압을 각 전압에 더하여 중성점 전압을 제어한다. 제안한 방법은 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 3-레벨 NPC 인버터의 전원전압변조 방식

전원전압변조 방식은 전압벡터를 검출하지 않고 전압벡터에 인가되는 스위칭시간을 간단하게 계산할 수 있어서 3 레벨 NPC 인버터에 적용하는 것이 유용하다. 각 상의 전압벡터에 인가되는 시간은 식 (1)과 같이 정의된다.^[2]

$$\begin{aligned} V_{as}^* : V_{dc} = T_{as} : T_s &\Rightarrow T_{as} = \frac{T_s}{V_{dc}} V_{as}^* \\ V_{bs}^* : V_{dc} = T_{bs} : T_s &\Rightarrow T_{bs} = \frac{T_s}{V_{dc}} V_{bs}^* \\ V_{cs}^* : V_{dc} = T_{cs} : T_s &\Rightarrow T_{cs} = \frac{T_s}{V_{dc}} V_{cs}^* \end{aligned} \quad (1)$$

샘플링 한주기 동안 각 상의 대한 스위칭 유효시간은 아래와 같이 정의되어진다.

$$T_{eff} = T_{max} + T_{min} \quad (2)$$

$$\text{여기서, } T_{max} = MAX(T_{as}, T_{bs}, T_{cs}), T_{min} = MIN(T_{as}, T_{bs}, T_{cs})$$

실제 게이팅 인가 시간은 오프셋 시간을 추가하여 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} T_{ga} &= T_{as} + T_{offset} \\ T_{gb} &= T_{bs} + T_{offset} \\ T_{gc} &= T_{cs} + T_{offset} \end{aligned} \quad (3)$$

공간 벡터 PWM(SVPWM)은 유효시간 개념을 적용하여 복잡한 계산 없이 실제 게이팅 인가 시간을 구할 수 있다. 또한 영전압 인가시간이 샘플링 한주기 동안 대칭적이라면 전압벡터에 인가되는 유효시간은 샘플링 시간의 중심에 위치한다. T_{offset} 은 식(4)와 같이 정의된다.

$$T_{offset} = \frac{1}{2}(T_s - T_{eff}) - T_{min} \quad (4)$$

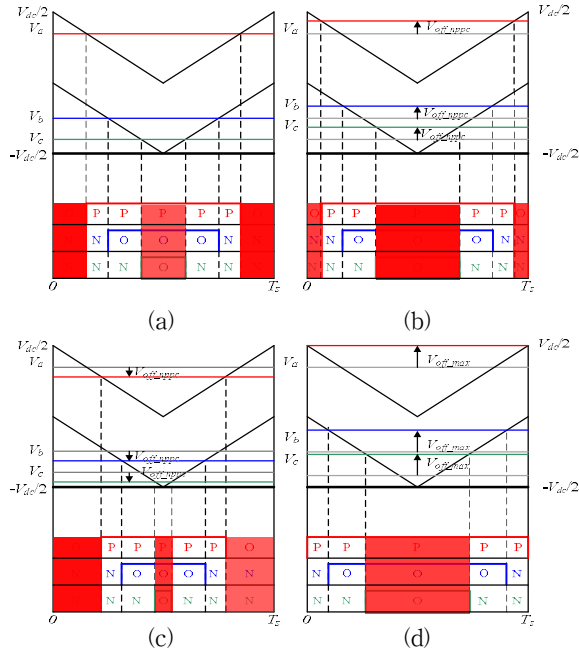


그림 1 V_{offset} 에 따른 인가 시간 변화
Fig 1 The duration time variation by adding V_{offset}

3. 제안된 중성점 전압 제어

3 레벨 인버터의 중성점 전압을 제어하기 위해 중성점을 통해 흐르는 평균 전류는 0이 되어야 한다. 즉, 중성점전압은 중성점 통해 흐르는 전류의 크기와 전류의 극성에 의해 제어된다. 식 (5)는 제안된 중성점 전압 제어의 보상 전압을 나타낸다.

$$V_{comp} = K_{NPF}(V_{upper} - V_{lower})sgn(i_{max}) \quad (5)$$

여기서, i_{max} 는 최대 전압의 상 전류, K_{NPF} 는 중성점 균형 계수이다. 옵셋 보상시간 T_{comp} 는 DC_link와 샘플링 시간에 의해 구해진다.

$$T_{offset} = \frac{1}{2}(T_s - T_{eff}) - T_{min} + T_{comp} \quad (6)$$

DC_link전압을 최대로 사용하기 위해서는 실제 게이팅 시간은 $0 \sim T_s$ 로 다음과 같이 제한되어야 한다.

$$0 \leq T_{min} + T_{offset}, T_{max} + T_{offset} \leq T_s \quad (7)$$

식 (7)으로부터 이용 가능한 옵셋 시간은 식(8)과 같이 계산된다. 인버터의 변조지수에 따른 옵셋시간의 최대, 최소값의 변화는 그림 2를 통하여 확인할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{offset.min} &\leq T_{offset} \leq T_{offset.max} \\ T_{offset.min} &= -T_{min} \\ T_{offset.max} &= T_s - T_{max} \end{aligned} \quad (8)$$

4. 시뮬레이션

그림 3은 전압전원변조 방식을 이용한 중성점 평형 제어의 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

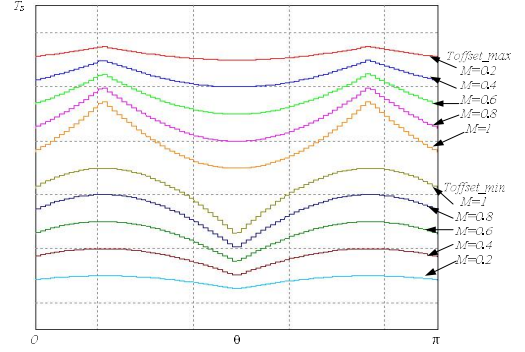


그림 2 변조지수에 따른 옵셋시간의 최대값, 최소값
Fig 2 Maximum and minimum values of offset time with a variation of modulation index

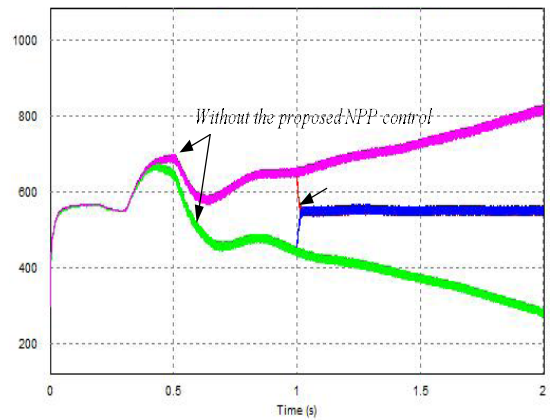


그림 3 중성점 전압제어의 시뮬레이션 결과
Fig 3 Simulation results of neutral point voltage control

1초에 중성점 제어 방법을 투입하였으며, 두 상하 커패시터 전압의 차이가 크고, 높은 변조지수를 가지고 있는 상황임에도 불구하고, 제어 투입 후 빠르게 두 전압이 평형을 이루는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

3 레벨 NPC 인버터의 중성점 전압을 제어하기 위해 전원전압변조 방식에 기초하여 복잡한 계산 과정을 거치지 않고 중성점 균형 계수와 정확한 옵셋 전압의 제한치를 이용하여, 계산된 옵셋 전압을 이용하여 중성점 전압 제어를 제안하였으며 시뮬레이션을 통해 성능을 확인하였다.

이 논문은 국토해양부 소관 연구개발사업인 능동제어형 조류발전 기술개발(20110171)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

[1] J. Rodriguez, S. Bernet, B. Wu, J. O. Pontt, and S. Kouro, "Multilevel voltage source converter topologies for industrial medium voltage drives," *IEEE Trans. on Ind. Electron.*, vol. 54, no. 6, pp. 2830-2945, Dec. 2007.
[2] Dae Woong Chung, Joohn Sheok Kim, Seung Ki Sul, "Unified voltage modulation technique for real time three phase power conversion," *IEEE Tran. on Ind. Applicat.*, vol. 34, no.2, pp.374-380, Mar. 1998.