

3-레벨 인버터의 DC 링크 전압 밸런싱과 누설전류 저감을 위한 PWM 제어방법

최남섭*, 이은철**, 안강순**
전남대학교*, (주)윌링스**

PWM Control Method for DC link Voltage Balancing and Leakage Current Reduction in 3-level Inverter

Nam Sup Choi*, Eun Chul Lee** and Kang Soon Ahn**
Chonnam National University*, Willings Co., Ltd.**

ABSTRACT

본 논문에서는 3 레벨 인버터 시스템의 DC 링크 전압 밸런싱과 동시에 공통모드 전압의 변동주파수를 최소화 하여 누설전류를 저감하는 새로운 PWM 방법을 제안한다. 제안된 PWM은 공통모드전압과 중간점 제어능력에 따라 공간벡터를 분류하고 중간점 전압을 제어하면서 공통모드 전압의 변동이 최소화되는 벡터를 선택하도록 구성한다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 PWM의 동작을 입증하였다.

1. 서론

그림 1과 같은 단일 전원의 DC 링크를 갖는 3상 3 레벨 인버터 시스템은 계통연계 태양광 시스템, AC 드라이브 시스템에서 널리 사용된다. 그림 1에서 R_{PG} 와 C_{PG} 및 R_{NG} 와 C_{NG} 는 각각 접지되지 않은 직류전원부의 P점 또는 N점에서 접지까지의 경로저항과 커패시턴스로 의도적으로 삽입한 것이 아니라 비의도적인 기생성분(parasitic element)이다.

그림 1과 같은 3상 인버터 시스템 구성과 인버터의 스위칭 동작에서 2가지 중요한 사항이 지적된다. 첫째는 두 직류측 커패시터 전압(v_{dc1} , v_{dc2})의 밸런싱 문제이고 둘째는 누설전류의 문제이다. 참고문헌 [1]과 [2]의 방법으로는 누설전류를 최소화할 수 있으나 직류측 커패시터 전압 밸런싱을 다루지 않고 있다. 참고문헌 [3]에서는 누설전류 저감과 DC 링크 전압 밸런싱을 동시에 고려한 PWM 제어방법을 제안하고 있다. 그러나 [3]에서는 공통모드전압의 변동이 커서 누설전류를 저감효과가 크지 않은 단점이 있다.

본 논문에서는 3 레벨 인버터 시스템의 DC 링크 전압 밸런싱과 동시에 공통모드 전압의 변동주파수를 최소화 하여 누설전류를 저감하는 새로운 PWM 방법을 제안한다.

2. 제안된 SVPWM의 동작원리

2.1 공간벡터의 분류

그림 1과 같은 시스템에서 R_{NG} 와 C_{NG} 를 통해서 흐르는 누설전류 $i_{leakage}$ 는 다음과 같이 표현된다. 즉,

$$i_{leakage} = \frac{3}{Z_f + 3Z_{leakage}} v_{CM} \quad (1)$$

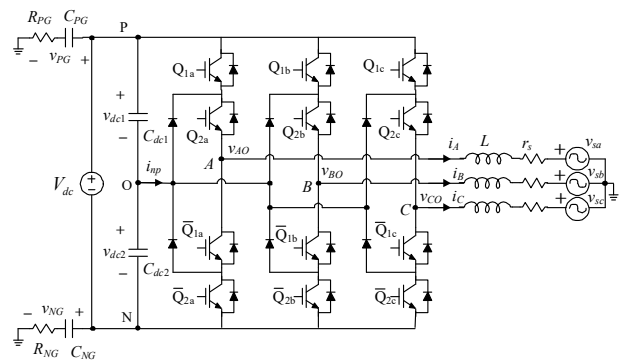


그림 1. 단일 직류전원을 갖는 3 레벨 인버터 시스템

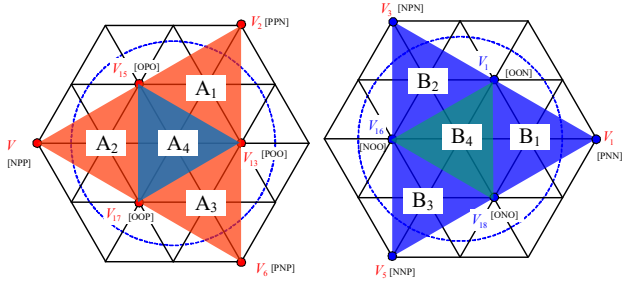
여기서 $Z_f = r_s + sL$, $Z_{leakage} = R_{NG} + 1/(sC_{NG})$ 이고 공통모드 전압 V_{CM} 은 $v_{CM} = (v_{AN} + v_{BN} + v_{CN})/3$ 과 같다[2]. 식 (1)로부터 공통모드 전압의 주파수를 낮추면 $Z_{leakage}$ 가 증가하므로 $i_{leakage}$ 의 크기가 감소한다.

3 레벨 인버터의 27개 스위칭 상태를 커패시터 전압 밸런싱의 관점에서 중간점(NP: Neutral Point) 전압 제어능력에 따라 3종류로 그룹으로 나누어 볼 수 있으며, 동시에 공통모드 전압에 따라 7 종류로 분류된다.

2.2 제안된 PWM에서 동작모드의 선택

제어모드 A: 공통모드 전압이 $(4/6)V_{dc}$ 인 6개의 공간벡터를 도시하면 그림 2(a)와 같다. 이 가운데 V_{13} , V_{15} , V_{17} 의 3개는 NP 전압을 증가시키는 효과를 갖고, 나머지 V_2 , V_4 , V_6 는 NP 전압의 변동에 영향을 미치지 않는다. 그림 2(a)에서 6개의 공간벡터가 만드는 삼각형은 4개의 영역(A_1 , A_2 , A_3 , A_4)으로 나누어 볼 수 있다. 만일 기준벡터가 $A_1 \sim A_4$ 가운데 한 영역에 속한다면 해당하는 영역을 담당하는 3개의 벡터를 사용하여 기준벡터를 합성할 수 있다. 각 영역에는 NP 전압을 증가시키는 공간벡터가 적어도 2개 이상 포함된다. 그러므로 기준전압 벡터가 어느 구역에 속하더라도 한 스위칭 주기 동안 NP 전압이 상승하는 효과를 갖는다.

제어모드 B: 공통모드 전압이 $(2/6)V_{dc}$ 인 6개의 공간벡터를 도시하면 그림 2(b)와 같다. 그림 2(b)에서 6개의 공간벡터가 만드는 삼각형은 4개의 영역(B_1 , B_2 , B_3 , B_4)으로 나누어 볼 수 있다. 만일 기준벡터가 $B_1 \sim B_4$ 가운데 한 영역에 속한다면 해당하는 영역을 담당하는 3개의 벡터를 사용하여 기준벡터를 합성할 수 있다. 각 영역에는 NP 전압을 감소시키는 공간벡터



(a) NP 전압 증가 (b) NP 전압 감소
그림 2. NP 전압을 변동시키는 공간벡터의 선택

(V_{14} , V_{16} , V_{18})가 적어도 2개 이상 포함된다. 그러므로 기준전압 벡터가 어느 구역에 속하더라도 한 스위칭 주기 동안 NP 전압이 감소하는 효과를 갖는다.

제어모드 C: 본 논문에서는 기준벡터가 $A_1 \sim A_4$ 영역이나 $B_1 \sim B_4$ 영역에 속하지 않는 경우의 펄스폭 변조 제어방법을 “제어 모드 C”라고 정한다. 제어 모드 C 동안에는 공통모드 전압이 $(3/6)V_{dc}$ 이고 NP 전압의 변동시키지 않는 7개의 벡터 $V_0[000]$ 와 $V_7 \sim V_{12}$ 를 사용한다. 이러한 7개의 공간벡터가 만드는 삼각형은 6개의 영역($C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$)으로 나누어 볼 수 있다. 제어모드 C의 동작은 참고문헌 [2]의 MVPWM과 같다.

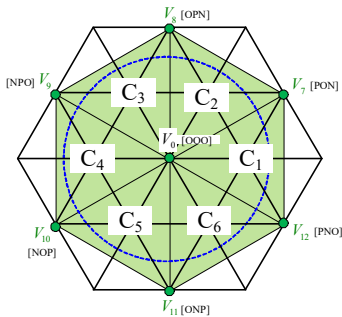


그림 4. NP 전압을 유지하는 동안의 공간벡터의 선택

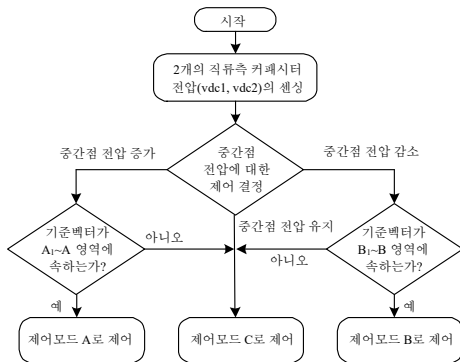


그림 5. 제안된 PWM의 동작모드

그림 5는 제안된 PWM의 제어 흐름도를 나타낸다. 매 스위칭 주기마다 2개의 직류측 커패시터 전압(V_{dc1} , V_{dc2})를 센싱하여 중간점 전압에 대한 제어를 결정한다. 즉, 정해진 허용범위를 벗어나 $V_{dc1} > V_{dc2}$ 이면 중간점 전압을 증가시키는 동작을, $V_{dc1} < V_{dc2}$ 이면 중간점 전압을 감소시키는 동작을 하며, 허용범위 내인 경우는 중간점 전압을 유지하는 동작을 한다. 중간점 전압을 증가시키는 동작을 할 때 기준벡터가 $A_1 \sim A_4$ 영역에 속하면 제어모드 A로 제어하며, 기준벡터가 $A_1 \sim A_4$ 영역 밖에 속

하면 제어모드 C로 제어한다. 또한 중간점 전압을 감소시키는 동작을 할 때 기준벡터가 $B_1 \sim B_4$ 영역에 속하면 제어모드 B로 제어하며, 기준벡터가 $B_1 \sim B_4$ 영역 밖에 속하면 제어모드 C로 제어한다.

3. 시뮬레이션

그림 6은 제안된 PWM의 동작을 확인하기 위하여 초기 언밸런싱 $V_{dc1}=350$ V, $V_{dc2}=150$ V인 상태에서 PSIM으로 시뮬레이션한 결과이다. 여기서 $V_{dc}=500$ V, $C_{NG}=10$ nF, $R_{NG}=1.3$ Ω , $L=1.5$ mH, $r_s=10$ Ω 이고 스위칭 주파수 10 kHz, 데드타임 2.5 μ sec, 변조비 1.0이다. 그림 6에서 NP제어 신호는 동작모드를 나타내며 0.05초가 되기전에는 NP전압을 증가시키는 동작을 하다가 0.05초 이후는 NP전압을 유지하는 MVPWM동작을 함을 볼 수 있다.

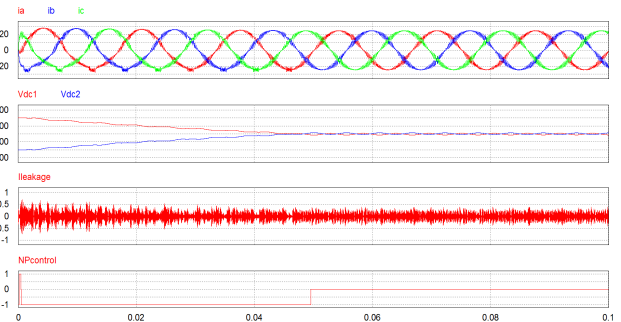


그림 6. PSIM 시뮬레이션 결과

4. 결론

본 논문에서는 3 레벨 인버터 시스템의 DC 링크 전압 밸런싱과 동시에 누설전류를 저감하는 새로운 PWM 방법을 제안하였다. 본 논문에서는 시뮬레이션을 통하여 제안된 PWM의 동작 특성을 보이고 제안된 PWM 동작의 유효성을 입증하였다.

이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 결과물의 일부임(No. NRF 2013R1A1A4A01012606)

참고 문헌

- [1] M. C. Cavalcanti, A. M. Farias, K. C. Oliveira, F. A. S. Neves and J. L. Afonso, "Eliminating Leakage Currents in Neutral Point Clamped Inverters for Photovoltaic Systems", IEEE trans. on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 1, pp. 435-442, Jan. 2012.
- [2] N. S. Choi, E. C. Lee and K. S. Ahn, "A Carrier Based Medium Vector PWM Strategy for Three Level Inverters in Transformerless Photovoltaic Systems", Conf. Record on ICPE 2015, Jun 1-6, Seoul, Korea
- [3] June Seok Lee and Kyo Beum Lee, "New Modulation Techniques for a Leakage Current Reduction and a Neutral Point Voltage Balance in Transformerless Photovoltaic Systems Using a Three level Inverter", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 29, No. 14, April 2014.