

소프트 스위칭되는 3레벨 전압원 인버터의 제어

송 인석*, 이 동호**, 이 성룡*
 * 군산대학교 제어계측공학과, ** Virginia TECH.

A Control Method of the Soft-switching Three-Level VSI

In-Seog Song, Dong-Ho Lee, Seong-Ryong Lee

* Dept. of Control & Instrumentation Eng. Kunsan National Univ. . ** Virginia TECH

Abstract - The three-level voltage source inverter (VSI) is good topology for high voltage and high power applications where no semiconductor devices are available. However, it has an inherent problem of switching loss and midpoint charge balance. Therefore, this paper presents two ways. The one is to adopt ZCT soft-switching method to the conventional three-level VSI. The another is to be proposed the method of the midpoint charge balance in three-level VSI. To prove the proposed topology, the paper presents a comprehensive evaluation with theoretical analysis, simulation and experimental results.

1. 서 론

최근 IGBTs, MCTs 등의 전력용 반도체의 개발로 인하여 PWM 인버터의 고주파수 운전에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 하지만 이러한 고주파수 운전기법은 하드스위칭 PWM 제어시 스위칭 손실과 노이즈를 피할 수 없어 인버터의 효율을 감소시키게 되는 문제점이 발생한다. 게다가 인버터의 고전압·대전력화에 대한 요구가 점차 증가하고 있어 스위칭 손실의 감소는 더욱 중요한 문제로 대두되었다. 고전압·대전력용 인버터로 3레벨 인버터는 메인 스위치 양단에 걸리는 전압이 DC 입력전압의 1/2이므로 가장 널리 사용되는 인버터이다. 하지만 이러한 3레벨 인버터는 캐패시터에 의하여 입력 전압을 둘로 나누는 구조이기 때문에 근본적으로 중성점 전압의 밸런스 문제를 갖고 있다. (2-3) 또한 대용량으로 사용되기 때문에 스위칭 손실의 비중이 커져서, 효율 개선을 위해서는 스위칭 손실의 저감 방법을 강구해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 인버터의 고효율화와 고전압, 대전력화, 두 가지문제를 모두 해결하기 위하여 기존의 3레벨 IGBT 인버터에 최근에 발표된 ZCT 부스트 컨버터(Zero Current Transition Boost Converter)를 적용한 그림1.의 토폴로지(Topology)를 제안하며[1], 기존의 3레벨 인버터 중성점 전압의 문제를 해결하기 위하여 부하전류의 위상차 및 고조파 함유율과 중성점 전압의 관계, 그리고 이들이 스위칭 벡터에 의해 제어될 수 있는 제어량을 해석하여 새로운 제어 방법을 제시하고, 이들 제안된 토폴로지와 제어 알고리즘을 시뮬레이션을 통하여 분석 검토하였으며, 150KW 용량의 3레벨 인버터를 제작, 실험을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

2. 3레벨 ZCT 전압원 인버터

2.1 ZCT 소프트-스위칭

인버터가 대용량화할수록 스위칭 손실은 그에 비례하여 증가하므로 소프트-스위칭과 같은 효율 향상 기법은 매우 중요하다. 이러한 고전압·대전력용의

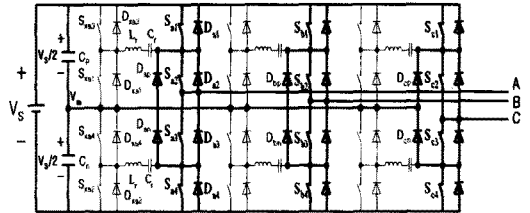


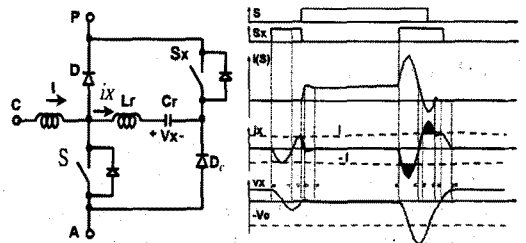
그림1. 3레벨 ZCT 전압원 인버터

소프트 스위칭 회로 조건은 주 전력의 패스(path)가 되지 않아야 하고, 보조 스위치의 전압 스트레스가 주 스위치의 전압 스트레스를 넘지 않아야 하며, 주 스위치의 턴-온과 턴-오프 시 모두 스위칭 손실을 저감할 수 있어야 할 뿐 아니라 보조 스위치 또한 소프트 스위칭 되어야 한다. 그림.1의 제안된 3레벨 인버터는 기존의 3레벨 인버터에 소프트-스위칭을 위한 ZCT 회로가 부가된 것으로 공진용 인덕터 L,와 캐패시터 C, 그리고 12개의 보조 스위치 Sx1~Sx12 및 다이오드 Dx1~Dx12로 구성된다. 그림.1에서 소프트-스위칭을 위한 ZCT 토폴로지는 다음과 같다.

- Sq1: Sq1→Dxq1→Sq1→Dq1, Upper Resonant L, - C,
- Sq2: Sq2→Dq1→Dxq2→Sq2→Dq1→Dq3, Lower Resonant L, - C,
- Sq3: Sq3→Dq1→Dxq3→Sq3→Dq1→Dq2, Upper Resonant L, - C,
- Sq4: Sq4→Dq1→Dxq4→Dxq4, Lower Resonant L, - C,

여기서 q=a, b, c 상임

이들은 결국 그림2.(a)의 ZCT PWM Cell과 같은 구조이고 이의 동작 파형은 그림2.(b)와 같다.



(a) ZCT PWM Cell (b) ZCT 동작파형
 그림2. ZCT PWM Cell 및 동작파형

2.2 3레벨 인버터의 중성점 전압

그림.1의 3레벨 인버터는 스위치의 조합에 따라 출력 전압의 벡터가 결정되고, 이 벡터들은 Large, Medium, Small 그리고 Zero 벡터 그룹으로 나누어진다. 이를 그림3.에 보였고, 이들 스위치 벡터에 따른 인버터의 등가회로는 그림4.와 같다.

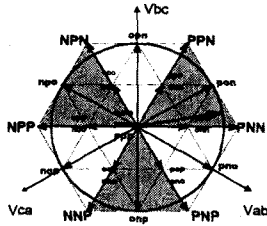


그림3. 3레벨 인버터의 벡터

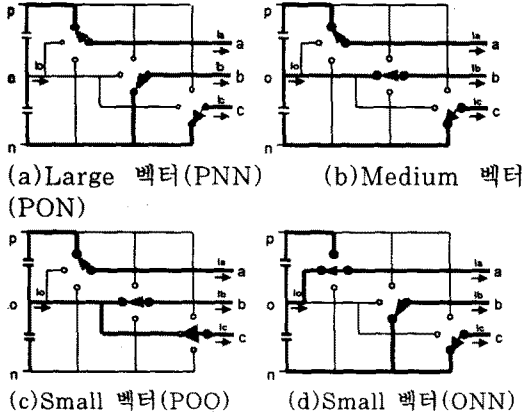


그림4. 스위칭 벡터에 따른 인버터 등가회로

이상의 내용을 분석하면 Large 벡터는 3상중 어느 상도 중성점과 연결되지 않기 때문에 캐패시터(Cs)의 중성점과는 무관하고 벡터(V_{L1})의 크기는 $2V_s/\sqrt{3}$ 이다. 그러나 Medium과 Small 벡터는 3상중 1상 이상이 중성점에 연결되기 때문에 중성점에 흐르는 전류에 따라 중성점 전압에 영향을 준다. 여기서 Medium 벡터는 B상 전류가 곧 중성점 전류이기 때문에 B상 전류, 즉 부하전류에 따라 중성점 전압이 변화 하지만 Medium 벡터 자신만으로는 변화된 중성점 전압을 제어할 방법이 없으며 이때 벡터(V_m)의 크기는 V_s 이다. 한편, Small 벡터는 그림4.(c)와 (d)처럼 두 개의 토폴로지가 있는데, 이들의 벡터 V_{S1} 은 크기와 위상이 같다. 다만 그림4.(c) 토폴로지의 경우 중성점 전류가 (-)A상 전류이고 그림4.(d) 토폴로지의 경우 (+)A상 전류로 중성점 전류의 방향이 서로 반대 방향으로 흐르기 때문에 어떤 토폴로지를 선택하느냐에 따라 중성점 전압을 원하는 형태로 제어할 수 있다. 3레벨 인버터에서 원하는 임의의 출력전압 패이서 v 는 그림3.처럼 Δ_1 영역에 있을 경우, 다음과 같이 표현된다.

$$V_{S1} \cdot d_{VS1} + V_m e^{j\frac{\pi}{6}} \cdot d_m + V_{L1} \cdot d_{VL1} = d_m \cdot e^{j\theta} \quad \dots(1)$$

$$d_{VS1} + d_m + d_{VL1} = 1$$

여기서 d_{VS1} , d_m , d_{VL1} 은 각각 Small 벡터 V_{S1} , Medium 벡터 V_m , Large 벡터 V_{L1} 의 듀티비이고, d_m 은 변조지수이며, ω 는 출력전압의 각 속도이다.

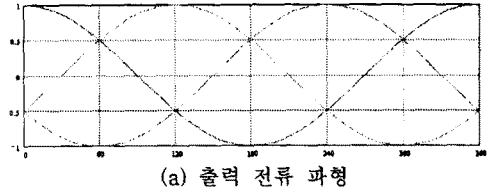
패이서 v 가 Δ_{1-3} 영역에 있을 때는 Medium 벡터가 필요하고, 이때 영역에 따라 두 개 혹은 4개의 Small 벡터를 이용할 수 있다. 따라서 중성점 전압의 변화를 예측하기 위하여 벡터, 부하전류 그리고 중성점 전압 사이의 상관관계를 해석할 필요가 있다. 먼저 중성점 전압은 중성점 전류를 계산함에 의해 알 수 있다. 순수 저항 부하일 경우 3상 부하 전류와 중성점 전류와의 관계는 그림5.와 같다. 그림5.(a)는 3상 부하 선전류이고 그림(b)는 그림4에 보인 스위칭 조합에 따른 각 벡터의 중성점 전류 파형이다. 중성점 전류의 실제 값은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$i_{VS1}(\theta, \alpha, d_m) = I_{VS1}(\theta\alpha) \cdot d_{VS1}(\theta, d_m) \quad \dots(2)$$

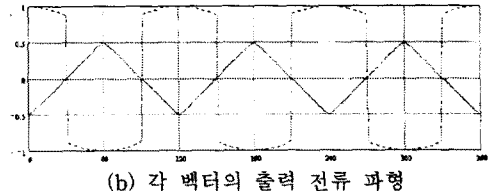
$$i_{Vm}(\theta, \alpha, d_m) = I_{Vm}(\theta\alpha) \cdot d_{Vm}(\theta, d_m)$$

여기서 α 는 전압과 전류의 위상차이고 d_{VS1} , d_{Vm} 은 식.(1)에 의해 구할 수 있다.

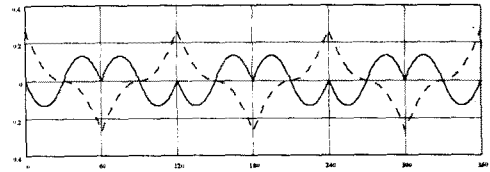
식.(2)에 의해 $d_m=0.8$, $\alpha=0$ 일 때의 실제 중성점 전류를 그림5.(c)에 보였다.



(a) 출력 전류 파형



(b) 각 벡터의 출력 전류 파형



(c) $d_m=0.8$, $\alpha=0$ 일 때의 중성점 전류

그림5. 출력 전류와 중성점 전류

중성점에 흐르는 전류의 총량은 식3.과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q_s(\alpha, d_m) = \int_{t_0}^{t_1} |i_{01}(t, \alpha, d_m)| + |i_{02}(t, \alpha, d_m)| dt \quad \dots(3)$$

$$Q_m(\alpha, d_m) = \int_{t_0}^{t_1} i_{12}(t, \alpha, d_m) dt$$

따라서 스위칭 조합에 의하여 중성점 전압을 제어하기 위해서는 한 주기 내에서 중성점에 흐르는 Medium 벡터 전류량($Q_m(\alpha)$)보다 Small 벡터에 의한 전류량($Q_s(\alpha)$)이 식4.와 같이 커야 한다.

$$|Q_m(\alpha)| < Q_s(\alpha) \quad \dots(4)$$

그림5.의 처음 60° 동안에 d_m 을 0.6에서 1까지, α 를 -90° 에서 $+90^\circ$ 까지 변화시킬 때 $Q_s(\alpha)/|Q_m(\alpha)| - Q_s(\alpha)$ 에 $6/T$ 을 곱한 값을 그림6.에 나타내었다.

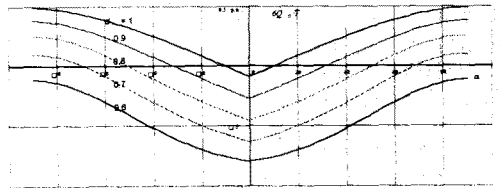
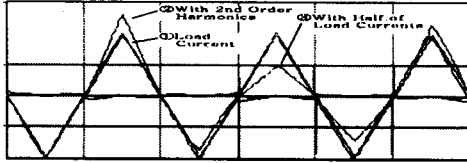


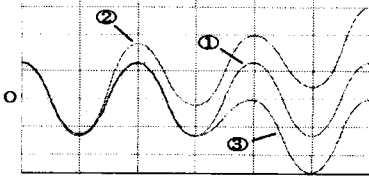
그림6. 중성점에 흐르는 전류의 총량

여기서 d_m 이 1인 경우를 보이면은 $\pm 10^\circ$ 동안은 제외하고 60° 동안 중성점의 밸런스를 유지할 수 없으며, 이에 반하여 d_m 이 0.6인 경우는 60° 동안 중성점 밸런스를 유지할 수 있음을 보여준다.

그림.7은 부하전류가 비 선형일 경우 한 주기동안 중성점 전류와 그의 충전 전류를 보여준다.



(a) 중성점 전류



(b) 중성점 충전 전류

그림.7 부하전류가 비 선형 일 때의 중성점 전류

그림.7.에서 알 수 있듯이 부하전류에 2차 고조파가 포함되어 있거나 부하가 불평형 일 때는 중성점 전압의 밸런스 제어가 불가능함을 알 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 고찰

제안된 3레벨 인버터의 중성점 전압 밸런스 제어를 적용하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 제안된 제어 기법의 유용성을 확인하고자 한다. 시뮬레이션은 순 저항 부하, 인덕터 부하, 2차 고조파 포함하는 인덕터 부하의 3가지 부하에 대하여 수행하였다. 이를 그림.8에 보였다.

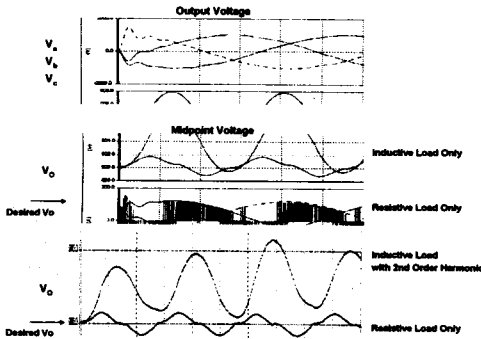


그림.8 부하에 따른 인버터의 중성점 전압 파형

시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 순 저항 부하는 60° 이내에서, 인덕터 부하는 120° 이내에서 중성점 전압이 밸런스를 유지할 수 있으나, 고조파를 포함하는 인덕터 부하는 중성점 전압이 밸런스를 유지하지 못함을 알 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서는 제안된 인버터에 그림.9와 같은 Buck Boost 컨버터를 추가함으로써 문제를 해결할 수 있다.

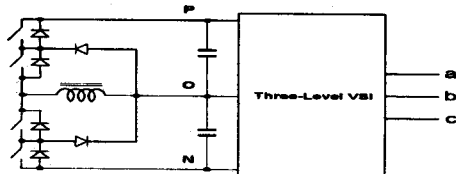


그림.9 중성점 전압 제어용 보조회로

실제 제안된 인버터를 제작하여 출력 파형을 그림 10-11.에 보였다. 그림10.은 제안된 인버터의 주 스위치가 ZCT 조건으로 동작됨을 보여주고 있으며, 그림 11.(a)는 인버터 출력 상 전압을 나타내고, 그림 11.(b)는 순간 전압을 나타낸다.

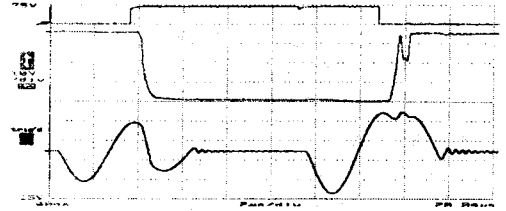
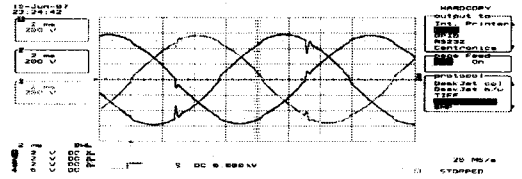
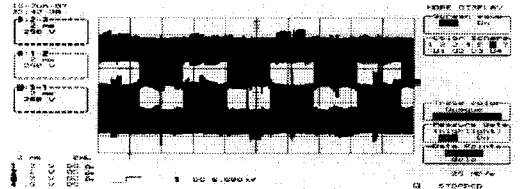


그림.10 제안된 인버터의 ZCT 출력 파형



(a) 인버터 상 전압 출력 파형



(b) 인버터 순간 전압 출력 파형

그림.11 제안된 인버터의 출력 파형

4. 결 론

본 논문에서는 고압압·대전력용으로 사용되어지는 3레벨 ZCT 전압원 인버터를 제안하였고, 제안된 인버터의 중성점 전압 밸런스 및 부하전류의 위상차, 고조파 함유율과 중성점 전압의 관계를 분석하였으며, Small 벡터를 이용한 중성점 전압 밸런스를 위한 새로운 제어 방법을 제시하였다. 또한 부하에 따른 밸런스 문제 해결을 위해 Buck Boost 컨버터를 부과하는 방법을 제안하였다. 제안된 인버터 및 제어방법의 타당성 검토를 위해 시뮬레이션을 수행하여 중성점 전압의 밸런스가 유지됨을 확인하였으며, 150KW 용량의 3레벨 인버터를 제작, 실험을 통하여 그 유용성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

[1] H. Mao, "Soft-switching Techniques for High-power PWM Converter", Ph.D.thesis, Virginia TECH, Dec.6 1996
 [2] D.H Lee, S.R Lee, Fred C. Lee, "An analysis midpoint balance for the neutral-point-clamped three level VSI", PESC98, Vol.1, pp.193-199, May 17-22, 1998
 [3] S. Ogasawara, H. Akagi, "An analysis Variation of Neutral Point Potential in Neutral Clamped Voltage Source PWM Inverters", Proc. IAS '93, pp965-70