

3상 유도전동기 구동용 새로운 ZVT 인버터의 제어기법

*송 인석, 이 성룡

군산대학교 제어계측공학과

A Control Strategy of the ZVT Inverter for Induction Motor Drives

*In-Seog Song, Seong-Ryong Lee

Dept. of Control & Instrumentation Eng, Kunsan National Univ.

Abstract

In this paper, a control strategy of the three phase ZVT inverter for ac motor drives is proposed. The topology of ZVT inverter analyzed with a description of the control conditions dependent on the load current and MSVM(Modified Space Vector Modulation). The detailed simulation results indicate that zero-voltage operation during transition of the MSVM algorithm can be achieved.

1. 서론

최근 10년 동안, 유도 전동기의 고효율 구동을 위한 전력변환장치로 소프트-스위칭 인버터(Soft-Switching Inverter)에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 일반적으로 소프트-스위칭은 주 전력 스위칭소자가 스위칭 할 때 발생하는 과 전압 및 과 전류 스파이크를 제거 또는 감소시킬 수 있기 때문에 기존의 하드-스위칭(Hard-Switching)보다 스위칭 손실 및 스위칭 시 발생하는 각종 문제를 감소시킬 수 있다. 따라서 소프트-스위칭 인버터가 기존의 인버터에 비하여 고효율, 고 신뢰성(High Reliability), 고 전력밀도(High Power Density), 강인성(Robustness), 높은 스위칭 주파수에 대한 낮은 EMI(Electro-magnetic Interference), 저 가격(Low Cost Effectiveness) 그리고 소형 경량화가 가능한 장점을 갖고 있기 때문에 EV(Electric Vehicle),

전기철도차량 등의 유도전동기 구동용 인버터로 채택되기 시작하였다.^[1-3] 이러한 소프트-스위칭 인버터는 ZVT(Zero Voltage Transition) 조건으로 스위칭하기 위하여 과도한 컴포넌트의 추가 사용으로 인한 가격상승 및 제어회로가 복잡한 문제가 있어, 최근에 이를 해결하기 위한 ZVT 토폴로지가 제안되었다.^[4] 그러나 기존의 ZVT 토폴로지는 부하전류에 의하여 공진시간이 영향을 받기 때문에 최적의 조건으로 설계한다 하더라도 ZVT로 스위칭되지 않는 부분이 존재하게 된다. 또한 제안된 ZVT 인버터는 스위칭 직전의 벡터와 스위칭 시의 벡터가 180° 위상차를 갖고 있어야만 공진회로에 의하여 주 스위치의 ZVT 스위칭을 얻을 수 있다. 여기서 단상의 경우는 2 레벨 인버터로 운전하면 아무 문제가 없지만 3상 인버터의 경우 기존의 SVM(Space Vector Modulation) 제어는 스위칭 전후의 스위칭 벡터 위상차가 180° 가 안되기 때문에 이를 적용하지 못하는 문제가 있다.

따라서 본 논문에서는 제안된 ZVT 인버터가 최적의 상태로 운전 될 수 있도록 첫째, 부하전류를 검출하여 부하전류에 따라 공진회로를 제어하는 최적 공진제어 알고리즘을 제안하고, 둘째, 기존의 SVM 제어기법을 해석하여 제안된 ZVT 인버터에 적합한 최적 ZVT SVM 제어기법을 도출한 다음, 이를 시뮬레이션 통하여 제안된 제어기법의 유용성을 입증하고자 한다.

2. 브리지 타입 ZVT 인버터

유도 전동기 구동용 인버터분야에서 기존의 하드-스위칭 SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation) 인버터의 효율 및 낮은 EMI, 소형 경량화 등을 위하여 많은 토폴로지(topology)들이 발표되어져 왔다. 이러한 토폴로지는 ARCP(Auxiliary Resonant Commutated Pole), Y/Delta-configured ARS(Auxiliary Resonant Snubber) 인버터 등이 제시되었다.^[2-3] 하지만 이러한 토폴로지는 과도한 컴포넌트의 추가사용으로 인한 원가상승 및 제어의 복잡성등이 문제되어진다. 따라서 본 연구에서는 위의 문제점들을 해결하기 위해 최근에 제안된 브리지 타입 ZVT 토폴로지(그림.1)를 채택하고자한다. 이 토폴로지는 기존의 RSI(Resonant Snubber Inverter)의 동작원리와 결과는 같으면서 3상으로 확장시 보조스위치 6개 다이오드 1개, 인덕터 1개로 감소시킬 수 있다. 이는 컴포넌트를 줄일 수 있기 때문에 가격, 전력밀도, 게이트 드라이브 회로와 관련된 제어의 용이성등의 면에서 장점을 갖는다.^[4]

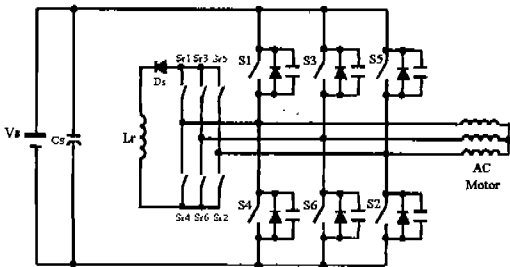


그림.1 제안된 브리지 타입 ZVT 인버터

2.1 동작 원리

제안된 인버터가 그림.2와 같이 a상 부하전류(I_0)가 positive 방향으로 흐르고, 각 스위치의 스위칭 시퀀스가 PNN→PPN→PPP로 진행할 때 동작원리는 주 전력 스위치 S1,2,6이 ZVT조건으로 턴-온하기 위해 보조 공진회로를 먼저 턴 온 시키면 공진용 인덕터에 전류(I_{Lr})가 흐르기 시작하고, 데드타임(t_d) 기간동안 공진용 인덕터와 스너버 캐패시터에 의해 공진하게 되며 스위치 S1,2,6 양단의 전압은 0V로 된다. 이때 스위치 S1,2,6를 ZVT 조건으로 턴-온 하고 보조 공진회로는 전위가 바뀌어 인덕터 전류가 0A로 감소하게 되고 보조 스위치를 ZCT조건으로 턴-오프한다. 따라서 제안된 인버터는 주 스위치는

ZVT 조건으로, 보조 스위치는 ZCT 조건으로 소프트-스위칭하게 된다.

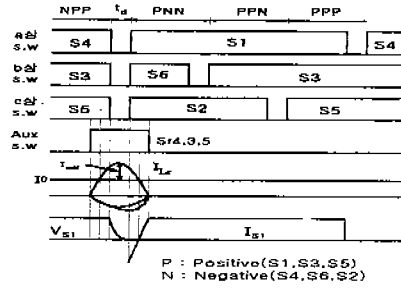


그림.2 동작모드에 따른 출력파형

2.2 부하전류에 따른 공진회로의 조건

유도 전동기 구동용 ZVT 인버터는 부하전류에 의해 소프트-스위칭 조건이 제한되며, 인버터 설계와 운전 시 부하전류를 고려해 주어야 한다.

①에너지 밸런스(Energy Balance)

제안된 인버터의 컴포넌트 설계시 그림.2와 같은 ZVT 조건을 얻기 위해 공진용 리액터(L_r)의 에너지가 캐패시터(C_r)의 에너지 보다 커야 한다. 이를 나타내면 식.(1)과 같다.

$$\frac{1}{2} L_r I_{toff}^2 \geq C_r (V_s - 2V_{drop})^2 \quad (1)$$

여기서, $I_{toff} = I_{Lr} - I_0$ 이다.

식.1에서 부하전류의 순시값이 가장 클 때 I_{toff} 가 가장 작게되며, 이때 식.1의 에너지 밸런스 조건을 만족하도록 L_r 의 값을 설계해주어야 한다.

②캐패시터 충·방전 시간(Δt_c)

제안된 인버터에서 공진용 캐패시터와 부하전류의 관계는 식.2과 같다.

$$C_r \int_0^t \frac{I_0}{2} dt = V_s \quad (2)$$

위 식으로부터 캐패시터의 충·방전 시간은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta t_c = \frac{2C_r V_s}{I_0} \quad (3)$$

이는 공진용 캐패시터의 충·방전 시간이 부하전류에 반비례하기 때문에 부하 전류가 어느 이하가 되면 캐패시터 충·방전 시간이 인버터에 설정된 데드타임보다 커지게 되고, ZVT 조건을 만족시키지 못하게 된다.

제안된 인버터로 유도 전동기 구동시 그림.3과 같이 부하전류는 정현파 형태이기 때문에 본질적으로 부하전류 주기마다 캐패시터 충전·방전 시간이 데드타임보다 커지거나 작아지는 경우 모두가 반복해서 발생하게 된다. 따라서 ZVT 조건을 만족시키기 위해 이를 구분해서 공진화를 제어할 필요가 있다.

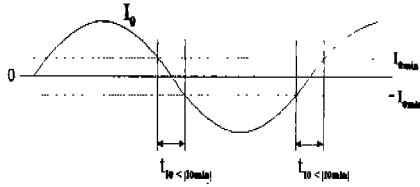


그림.3 ZVT 공진 보상 구간

2.3 SVM(Space Vector Modulation) 제어

기존의 3상 PWM 인버터의 제어 알고리즘은 SVM 제어기법이 일반화되어 있고, 출력특성 또한 좋은 것으로 평가되고 있다.^[5] SVM의 동작 원리는 전압 벡터 \overline{V} , 가 \overline{V}_1 에서 \overline{V}_2 로 진행하는 Sector.I 영역에 있다면, 이 벡터는 식.4와 같이 \overline{V}_1 , \overline{V}_2 와 각 벡터의 듀티비 d1, d2 및 d0 (제로벡터)에 의해 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} d1 \cdot V_1 + d2 \cdot V_2 &= \overline{V}, \\ d1 + d2 + d0 &= 1 \end{aligned} \quad (4)$$

그림.4는 3상 전압원 인버터의 SVM 벡터도와 Sector.1에서의 스위칭 시퀀스를 나타낸다.

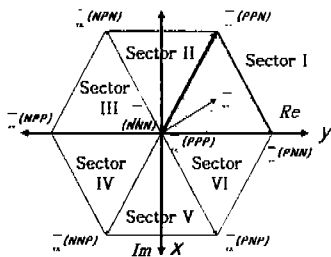


그림.4 전압원 인버터의 스위칭 상태 벡터

이와 같은 방식으로 나머지 벡터 공간들도 표현할 수 있다. 하지만 그림.5와 같이 기존의 SVM 제어로 제안된 인버터에 적용할 경우 ZVT 조건을 만족하지 못하거나 유도전동기를 구동시키는 데 적합하지 못한 문제가 있으며, 따라서 기존의 SVM을 변형시킨 새로운 SVM을 적용시켜야 한다.

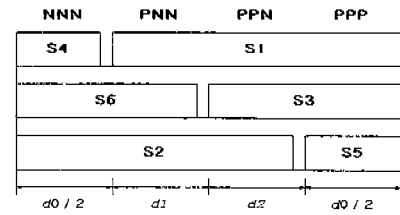


그림.5 SVM 스위칭 시퀀스(Sector.I)

3. ZVT 인버터의 새로운 제어 기법

3.1 전류 추종 공진제어

제안된 인버터가 항상 소프트-스위칭을 하기 위하여 부하전류 센싱에 의한 전류 추종 공진제어 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 소프트-스위칭 조건을 만족시키는 부하전류의 최소치 ($I_{o,min}$) 보다 부하전류가 적을 시 주 스위치의 턴-온 트랜지션 기간에도 보조 스위치를 턴-온 시킴으로서 주 스위치를 ZVT조건으로 만들어 주는 알고리즘이다. 이는 ZVT인버터로 유도전동기 구동시에 부하전류에 상관없이 소프트-스위칭을 할 수 있다는 장점을 지닌다. 그림.6은 전류 추종 공진제어의 블록선도이다.

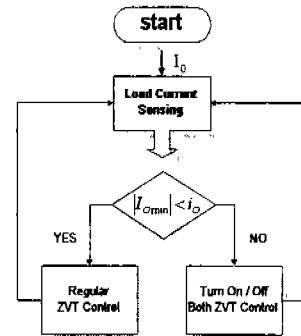


그림.6 전류 추종 공진제어의 개념

3.2 새로운 SVM

본 논문에서는 제안된 인버터에 SVM 제어기법을 적용하기 위해서 새로운 MSVM(modified SVM)을 제안한다. 새로운 MSVM은 기존의 SVM제어에 스위칭 시 ZVT조건을 만족시키기 위해 턴-온을 수행하려는 벡터와 180° 위상차 나는 벡터 모우드를 제로 벡터 모우드로 대체한다. 그림.7의 테이블과 같이 NNN→PNN→PPN→시퀀스를 NPP→PNN→PPN→시퀀스로 수정한다. 이 알고리즘의 출력전류는 기존의 SVM처럼 정현파이기 때문에 유도전동기 구동용으로 적합하다.

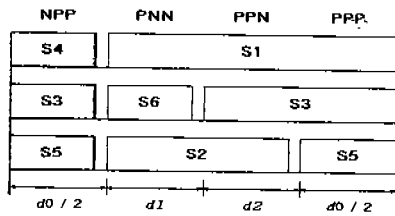


그림.7 MSVM 스위칭 시퀀스(Sector.I)

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

제안된 인버터 토폴로지에 공진제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위해 PSpice를 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림.7은 스위칭 시퀀스가 PNN에서 PPN으로 진행되는 Sector.1일 때 제안된 MSVM 알고리즘을 시뮬레이션한 출력파형이다. 제안된 MSVM 알고리즘은 기존의 SVM의 NNN(제로-벡터)를 NPP로 대체하였을 시 주 스위치가 ZVT조건으로 동작함을 나타낸다.

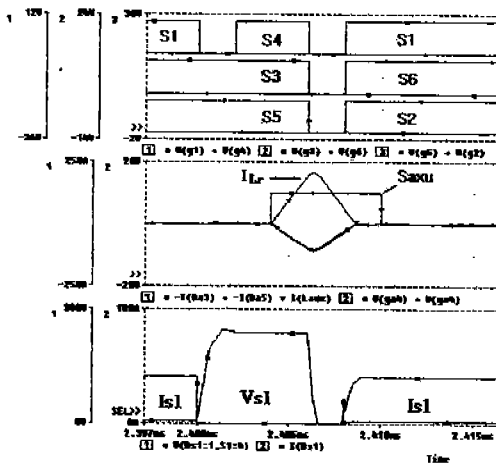


그림.8 제안된 MSVM의 스위칭 파형

그림.9는 제안된 인버터에 새로운 MSVM을 시뮬레이션에 적용하였을 시 부하전류 파형을 나타낸다.

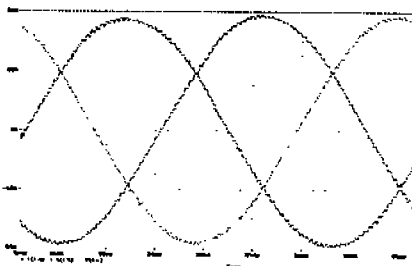


그림.9 제안된 인버터의 출력 파형

5. 결론

본 논문에서 전류 추종 공진제어 기법과 새로운 SVM을 제안하였고 그 유용성을 확인하기 위해서 PSpice 프로그램을 이용하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 인버터가 ZVT 조건으로 스위칭 됨을 확인하였으며, 다음 단계로 실제 인버터를 제작하여 시뮬레이션 결과를 실험을 통하여 입증하고, 제안된 공진제어 기법과 새로운 SVM알고리즘의 유용성을 확인할 것이다.

참고문헌

- [1]H. Mao, "Soft-Switching Techniques for High-Power PWM Converters", Ph. D. Dissertation, Blacksburg, VA: Virginia Tech., 1996.
- [2]J.S.Lai et al., "A Novel Resonant Snubber Based Soft-switching Inverter" in Conference Records of IEEE APEC, pp.797-803, March 1995
- [3]J.S.Lai et al., "A Delta-Configured Auxiliary Resonant Snubber Inverter", IEEE Trans. on Industry Application, Vol.32, No.2, pp518-525, May/June 1996
- [4]B.M.Song, S.R.Lee, J.S.Lai, "An Improved Three-Phase Auxiliary Resonant Snubber Inverter for AC Motor Drive Application", PESC98, Vol.1, pp.423-428 May 1998
- [5]C. Cuadros, D. Borojovic, S. Gataric, V. Vlatovic, H. Mao, F. C. Lee, "Space Vector Modulated, Zero-Voltage Transition Three-Phase to DC Bidirectional Converter", Conference Records of IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 1994, pp.16-23.