

유도 전동기 구동용 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터

이 성룡, *고 성훈, 권 순신, 송 인식+

군산 대학교 전기전자제어공학부, 한국 전기 연구소 +

A Diode Bridge-type ZVT Inverter for Induction Motor Drive Application

S. R. Lee, *S. H. Ko, S. S. Kwon, I. S. Song+

Kunsan National University, Korea Electrotechnology Research Institute +

Abstract

In this paper, the diode bridge-type /T(Zero-Voltage Transition) inverter is proposed. consists of one auxiliary switch, three resonant ductors and six blocking diodes. So, the vantage of the proposed topology is the duction of the auxiliary switch. The topology of e proposed ZVT inverter is analyzed with a scription of the control conditions based on the ad current. Therefore, this paper two control gorithms were discussed. a variable resonant ttern control algorithm by using load current edback and a resonant period control algorithm using resonant inductor current feedback is oposed in order to achieve the ZVT switching ndition in full control range and the reducing rrent spike main switches cause by reverse covery problem.

1. 서론

최근의 인버터 기술의 추세가 인버터의 효율 개선 소형 경량화를 위해 스위칭주파수를 높게 제어하 만, 기존의 하드-스위칭(Hard-switching) 인버터로 고주파수 스위칭시 많은 문제점이 발생한다. 따라 유도 전동기의 고효율 구동을 위하여 소프트-스 칭(Soft-switching)인버터에 대한 연구가 활발하게 행되고 있다. 소프트-스위칭 기법은 주 전력 스위 소자가 스위칭 할 때 발생하는 과 전압 및 과 전류 파이크를 제거 또는 감소시킬 수 있기 때문에 기존 하드-스위칭 기법 보다 스위칭 손실 및 스위칭

시 발생하는 각종 문제를 감소시킬 수 있다.[1]

일반적으로 유도 전동기 구동용 소프트-스위칭 인 버터로는 ZVT(Zero Voltage Transition) 토폴로지를 사용한다. 그 이유는 유도 전동기의 절연보호를 위해 dv/dt 를 효과적으로 제한할 수 있기 때문이다. 대표 적인 ZVT 토폴로지로 ARCP (Auxiliary Resonant Commutated Pole) 인버터가 제안된 이후로 RTI(Re sonant Transition Inverter), Y/Delta-configured RSI(Resonant Snubber Inverter) 등 많은 ZVT 토폴 로지가 연구되고 제안되어졌다. RSI를 살펴보면 주전 력 스위치는 ZVT조건으로 보조공진 스위치는 ZCT (Zero Current Transition) 조건으로 스위칭 하는 우 수한 특성을 가지고 있지만 3상인 경우 보조회로부문 에 6개의 보조스위치, 6개의 다이오드, 1개의 공진 인 덕터를 추가 사용한다. 이러한 기존의 ZVT 토폴로지 가 가지고 있는 공통적인 단점은 주전력 스위치가 ZVT 조건을 만족하기 위한 보조회로부문에 과도한 컴포넌트의 추가사용으로 인한 원가상승 및 제어의 복잡성 등의 문제점을 안고 있다.[1]-[5]

그러므로 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 개선된 다이오드-브릿지 타입 ZVT 인버터를 제안 한다. 이 토폴로지는 지금까지 제안된 ZVT 인 버터와 비교하여 보조공진회로의 컴포넌트의 수를 상 당히 감소시킬 수 있다. 제안된 인버터의 보조공진회 로는 한 개의 보조공진 스위치, 3개의 보조공진 인덕 터와 6개의 블로킹 다이오드로 구성된다. 이 토폴로 지에서 가장 중요한 장점은 한 개의 보조공진 스위치 를 사용함으로써 스위칭 디바이스의 감소로 인한 가 격의 저렴화, 제어의 용이성이다. 하지만 제안된 인버 터는 공진 스위치의 양단의 역회복전류를 제거해야 하는 문제점이 있다.

따라서, 본 연구에서는 한 개의 보조공진 스위치만

사용하는 개선된 ZVT 토폴로지와 이를 효율적으로 제어하기 위한 2가지의 제어 알고리즘에 대해 논의한다. 이를 시뮬레이션을 통하여 제시된 토폴로지와 제어 알고리즘의 유용성을 입증하였다.

2. 제안된 인버터

기존의 유도전동기 구동용 ZVT 인버터의 최대 단점은 보조회로부문의 과도한 컴포넌트의 추가사용으로 인한 원가상승이다. 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 그림 1의 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 제안한다.

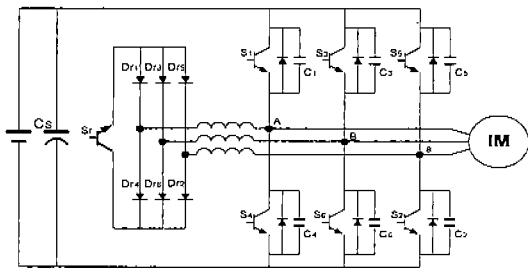


그림 1. 제안된 ZVT 인버터

제안된 토폴로지는 보조회로에서 스위치 1개, 공진용 인덕터 3개, 다이오드 6개의 구조를 갖는다. 이 토폴로지의 가장 큰 장점은 가격상승의 주원인인 스위치의 수를 1개로 줄일 수 있기 때문에 스위칭 다이오드의 감소로 인한 원가절감 및 제어의 용이성의 장점을 가진다.

2.1 동작원리

제안된 토폴로지의 동작원리를 설명하기 전에 유도전동기 구동에 적합한 경현파 출력력을 얻기 위한 SVM (Space Vector Modulation) 기법을 설명한다. 그림 2의 섹터 I 영역에서의 스위칭 시퀀스는 [NNN → PNN → PPN → PPP] 으로 진행한다. 여기서 PNN이란 그림 1의 DC 전원의 (+)전원에 연결된 스위치 중 A 상에 연결된 스위치만 턴-온 상태이며 B, C상에 연결된 스위치 중 (-)전원에 연결된 스위치가 턴-온이 됨을 의미한다. 섹터 I 영역에서의 주전력 스위치는 S1, S2, S6 이며, ZVT 조건은 주 전력 스위치가 턴-온 되기 전에 전압을 전환하기 위해서 180° 위상차 나는 스위치(S3, S4, S5)의 전압은 0V 이어야 한다. 섹터 I 영역에서의 ZVT조건을 만족하기 위해서 스위칭 시퀀스 중 주 전력 스위치가 턴-온되기 전에 180° 위상차를 갖는 벡터모드를 영벡터 모드로 대체하여 섹터 I 영역에서의 스위칭 시퀀스는 [NPP → PNN → PPN → PPP]이 된다.

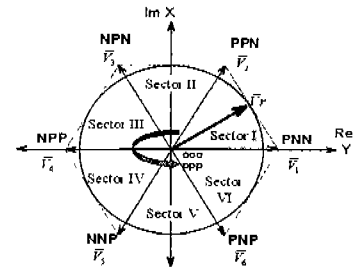
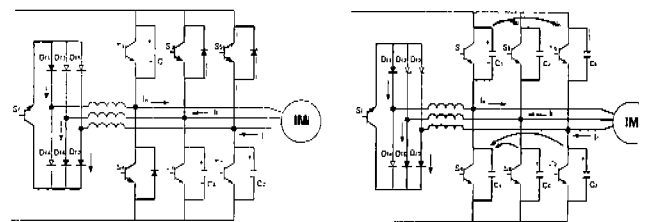
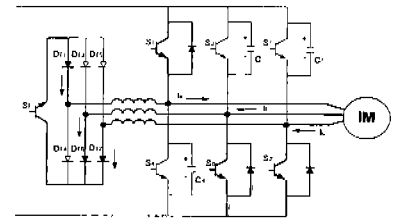


그림 2. 공간 전압 벡터도

제안된 인버터의 ZVT 동작은 그림 3과 같이 크게 3가지의 모드로 나누어지며, 각 모드별 상세한 동작 설명은 그림 4의 각 스위칭 시퀀스 전압, 전류 파형으로 설명한다.



(a) 충전모드 ($t_0 \sim t_3$) (b) 공진모드 ($t_3 \sim t_4$)



(c) 방전모드 ($t_4 \sim t_6$)

그림 3. 제안된 인버터의 ZVT 동작 모드

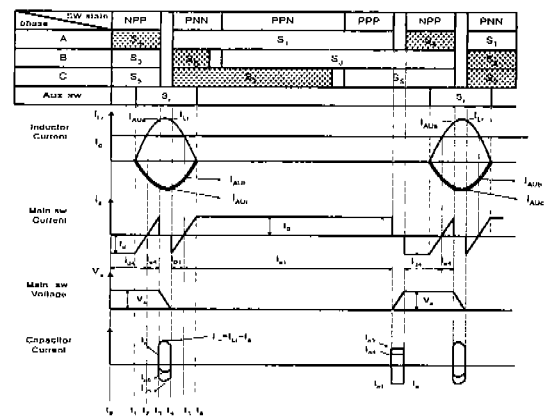


그림 4. 전압 및 전류 파형

(a) 충전 모드 : $t_0 \sim t_3$ 의 구간으로 S3, S4, S5가 턴-온 상태이며 양단간의 전압은 0V가 된다. t_1 에서 보조공진 스위치를 턴-온 시키면 공진용 인덕터에

전류가 흐르기 시작하고 t_3 까지 에너지를 충전한다.

(b) 공진 모드 : $t_3 \sim t_4$ 의 구간으로 모든 주전력 스위치는 턴-온프 상태이며 주 전류는 프리휠링 다이오드를 통해 흐르며, 이때 보조공진 스위치를 통해 공진용 인덕터와 스너버 캐패시터의 공진으로 C1의 전압은 C3, C5으로 C2, C6의 전압은 C4로 에너지 전환이 이루어진다. 에너지 전환이 완전히 끝나면 주전력 스위치 S1, S2, S6의 양단간의 전압은 0V의 ZVT 조건으로 턴-온을 하게 된다.

(c) 방전 모드 : $t_4 \sim t_6$ 구간으로 공진용 인덕터는 남은 에너지를 완전히 방전하고 t_6 에서 ZCT 조건으로 턴-오프 하게 된다.

2.2 보조 공진 회로 설계

유도 전동기 구동용 인버터는 부하전류에 의해서 소프트-스위칭 조건이 제한되어진다. 그러므로 부하전류를 고려하여 인버터를 설계해야 한다. 본 연구에서는 DC 입력 전압 200[V], 출력전류 2[A] ZVT 인버터를 설계 하였다.

(a) 캐패시터 충전·방전 시간 (Δt_c) : 제안된 인버터의 스너버 캐패시터와 부하전류와의 관계는 식 (1)과 같이 표현되어지며, 유도전동기 절연을 위하여 전압 상승 제한은 $dv/dt \cong 220V/\mu s$ 의 IEEE의 규칙을 따른다.[1][2]

$$V_c = C_r \int_0^t \frac{I_o}{2} dt \quad (1)$$

설계 조건에 의해서 $C_r = 4.5 [nF]$ 이며, 그에 따른 캐패시터의 Δt_c 는 식 (2)으로 구할 수 있다

$$\Delta t_c = \frac{2 C_r V_c}{I_o} \quad (2)$$

식 (2)에서의 캐패시터의 충전·방전 시간은 부하 전류와 반비례하기 때문에 부하전류가 어느 이하로 적어지면 설정된 데드타임기간동안 완전한 충전·방전이 이루어지지 않아 ZVT 조건을 만족시키지 못한다.

(b) 에너지 밸런스(Energy Balance) : 제안된 인버터의 ZVT 조건을 만족하기 위해서는 공진 인덕터의 에너지가 스너버 캐패시터의 에너지보다 충분히 커야 공진 구간동안 완전한 에너지 전환이 이루어진다.

$$\frac{1}{2} L_r I_{toff}^2 \geq C_r (V_s - 2 V_{drop})^2 \quad (3)$$

여기서, $I_{toff} = I_{Lr} - I_o$

식 (3)에서 부하전류의 순시값이 가장 클 때 I_{toff} 가 가장 적게되므로 에너지 밸런스 조건을 만족하도록 L_r 의 값을 설계해야 한다. L_r 의 충전시간 $t_{LCr} = 2 [\mu s]$, $I_{Lr} = 2 I_o$ 이면 설계 조건에 의해서 $L_r = 100 [\mu H]$ 이며, 식 (3)의 에너지 밸런스 조건을 고려하면 C_r 은 5~4[nF], L_r 은 100~130 [μH] 까지 조정이 가능하다.

2.3 제안된 인버터의 제어 알고리즘

본 연구에서 제안된 인버터가 스위칭 전구간동안 ZVT 조건을 만족하고, 또한 보조공진 스위치 양단의 역회복전류를 제거 하기 두 가지 제어 알고리즘은 제시한다. 그림5는 제안된 인버터의 시스템 블록도이다.

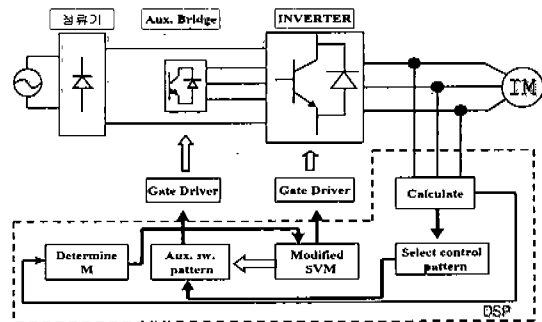


그림 5. 인버터 제어 시스템

(a) 전류추종 제어 : 식 (2)에서 처럼 캐패시터의 충전·방전 시간은 부하전류와 반비례 관계이기 때문에 그림 6의 부하전류가 zero cross 되는 $I_{o\min}$ 보다 작은 영역에서는 캐패시터의 충전·방전 시간이 더 요구되어지고 이에 따라 인버터의 설정된 데드타임 시간보다 더 커지기 때문에 ZVT 조건을 만족하지 못한다.

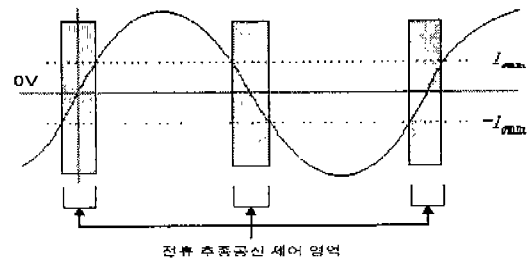


그림 6. 전류 추종 공진 제어 필요 구간

따라서 제안된 인버터가 스위칭 전구간 동안에서 ZVT 조건을 만족하기 위하여 그림 5에서처럼 부하전류를 검출하여 설계된 부하전류 최소치 ($I_{o\min}$) 보

다 적을시 주 스위치의 턴-오프 구간에도 보조 스위치를 턴-온 시킴으로써 ZVT 조건을 만족할 수 있는 알고리즘으로, 제안된 인버터가 유도 전동기 구동시 부하전류에 상관없이 스위칭 전구간 동안에 ZVT 스위칭을 할 수 있다.

(b) 가변시간 공진 제어 : 제안된 토폴로지의 보조 회로부분은 3상 정류기 형태로 공진을 발생하는데 아무런 문제가 없으나 공진이 종료된 후에 턴-오프 하지 않으면 보조공진 스위치에 역회복전류가 발생한다. 이를 해결하고자 보조스위치의 턴-온 시간은 일정하나 턴-오프 시간은 그림 5와 같이 공진 전류를 검출하여 공진이 종료됨과 동시에 보조 스위치를 턴-오프 하는 알고리즘으로, 이로 인해 보조 스위치는 ZCT 조건으로 턴-오프 하게 된다.

3. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 연구에서 제안된 ZVT 인버터 토폴로지가 스위칭 전 구간 동안에서 ZVT 조건을 만족하기 위해 두 가지 제어알고리즘을 제시하였고 그 유용성을 확인하기 위하여 PSpice를 통하여 시뮬레이션을 하였다.

그림 7은 제안된 인버터의 3상 ZVT 동작파형으로 주 전력 스위치(S1,S2,S6)가 턴-온 하기 전에 보조 스위치(Sr)를 턴-온 시켜 L-C 공진을 이용한 에너지 전환이 이루어져 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 턴-온 하며 공진 상태를 검출하여 보조공진 스위치를 턴-오프 함으로써 보조 스위치는 ZCT 조건으로 턴-오프 함을 알 수 있다. 그림 8(a)는 본 연구에서 제안한 제어 알고리즘을 적용하지 않은 경우로서 공진이 종료되어 주 스위치는 ZVT 조건은 만족했지만 보조 스위치가 턴-온 상태이므로 주전력 스위치에 역회복전류(I_{si})가 흐른다. 그림 8(b)는 제어 알고리즘을 적용한 경우로서 L-C 공진으로 주 스위치가 ZVT 조건으로 턴-온하고, 공진용 인덕터의 에너지가 방전이 완료된 시점에 보조 스위치를 턴-오프 함으로써 역회복전류의 문제점을 해결하여 보조 스위치는 ZCT 조건으로 턴-오프하게 된다.

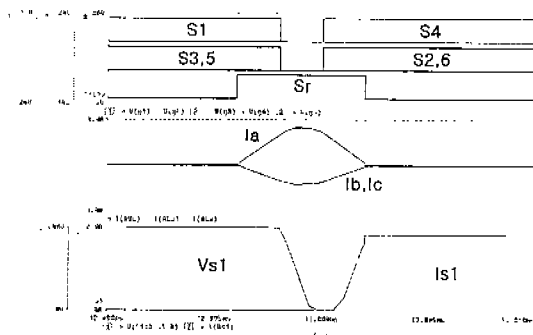


그림 7. 제안된 인버터의 ZVT 동작 파형

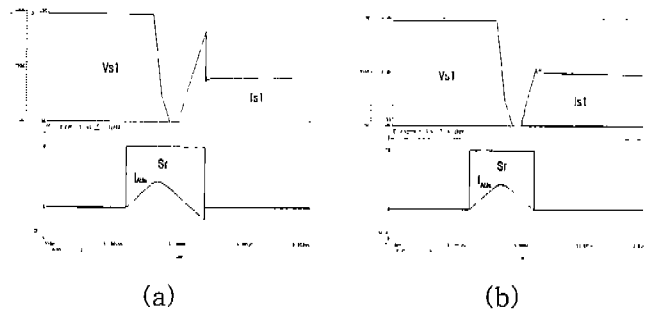


그림 8. 제안된 제어 알고리즘

4. 결론

본 논문에서는 기존의 ZVT 인버터의 과도한 컴포넌트의 추가 사용으로 인한 문제점을 해결하고자 보조공진스위치 1개만을 사용하는 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 제안하였다. 또한 제안된 ZVT 인버터가 최적의 조건으로 스위칭 전구간동안 ZVT 조건으로 스위칭 할 수 있는 2가지 제어 알고리즘을 제시하였고, 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 입증하였다. 시뮬레이션 결과 제안된 ZVT 인버터가 스위칭 전구간동안 주전력 스위치는 ZVT 조건으로 보조공진 스위치는 ZCT로 스위칭이 됨을 알 수 있었고, 출력파형 또한 유도 전동기에 적합한 정현파임을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] B.M. Song, S.R. Lee, and J.S. Lai, "An Improved Three-Phase Auxiliary Resonant Snubber Inverter for AC Motor Applications, *Conf. Rec. of IEEE PESC*, Hukuoka, Japan, May 1998, pp423-428
- [2] J. S. Lai, Resonant Snubber-based Soft-switching Inverters for Electric Propulsion Drives, *IEEE Trans. on Ind. Electr.*, Vol. 44, No. 1, Feb. 1997, pp. 71-80.
- [3] H. Mao and F. C. Lee, Improvement on Zero-Voltage Transition Three-Phase Rectifier/Inverter, *Proc. of 1995 VPEC Seminar*, Vol. 13, 1995, pp.19-27.
- [4] R. W. DeDoncker and J. P. Lyons, "The Auxiliary Quasi-resonant DC Link inverter," *Conf. Rec. of IEEE PESC*, June 1991, pp. 248-253.
- [5] Seong-Ryong Lee, "A control Strategy of the Three-Phase Bridge-type ZVT inverter for AC Motor Drive," *Conf. Rec. of ICPE '98*, October, 1998, pp. 529-534.