

유도 전동기 구동용 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터

李 星 龍, 高 晟 勳, 宋 仁 碩

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

Seong-Ryong Lee, Seong-Hun Ko, In-Seok Song

요 약

최근에 유도 전동기의 고효율 구동을 위하여 ZVT(Zero Voltage Transition) 인버터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 또한 많은 토폴로지가 제안되었다. 하지만 기존의 ZVT 인버터는 보조공진 회로부분에 과도한 컴포넌트의 추가사용으로 인하여 가격상승 및 제어회로가 복잡해지는 문제점이 있다. 이의 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 보조 공진 스위치 하나만을 사용하는 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 제안하고, 이의 동작을 이론적으로 해석하였으며, ZVT용 보조공진회로의 설계 방법에 대하여 논하였다. 또한 제안된 ZVT 인버터가 최적의 조건으로 구동하기 위한 공진기간 가변제어에 대해 논의하고 이의 유용성을 시뮬레이션 및 실험을 통하여 입증하였다.

ABSTRACT

In this paper, the diode bridge-type ZVT(Zero-Voltage Transition) inverter is proposed. It consists of one auxiliary switch, three resonant inductors and six blocking diodes. So, the main advantage of the proposed topology is the reduction of the auxiliary switch compare to the conventional ZVT inverter. The topology of the proposed ZVT inverter is analyzed with a description of the control conditions based on the load current. And the resonant period control for operating the proposed inverter optimally is discussed by using resonant inductor current feedback. To verify the proposed topology, the detailed simulation and experimental results indicate that zero voltage operation during transition can be achieved.

Key Words : ZVT Inverter, Zero Voltage Transition, Soft-switching

1. 서 론

유도 전동기 구동용 인버터의 소형 경량화 및 성능 향상을 위해 스위칭 주파수를 높게 제어하는 경향이 있는데, 이 때문에 기존의 하드-스위칭(Hard-switching) 인버터로는 스위칭 시 발생하는 전력손실 및 스트레스(stress)등 여러 문제점이 발생하게 된다. 이러한 인버터의 효율 향상을 위하여 소프트-스위칭(Soft-switching) 인버터에 대한 연구가 최근 들어 활발하게 진행되고 있다. 일반적으로 소프트-스위칭 기법은 주 전력 스위칭소자가 스위칭 할 때 발생하는 과 전압 및 과 전류 스파이크를 제거 또는 감소시킬 수 있기 때문

에 기존의 하드-스위칭 기법 보다 스위칭 손실 및 스위칭 시 발생하는 각종 문제를 감소시킬 수 있다.^{[1] [3]}

유도 전동기 구동용 소프트-스위칭 인버터의 대표적인 토폴로지로서 ARCP (Auxiliary Resonant Commutated Pole) 인버터가 제안된 이후로 Δ -타입 RSI 인버터(Delta-configured Resonant Snubber Inverter) 등 많은 ZVT 토폴로지가 연구되고 제안되어 졌다. 이들 중 가장 특성이 우수한 것으로 알려진 Δ -타입 RSI 인버터를 살펴보면 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 보조공진 스위치는 ZCT(Zero Current Transition) 조건으로 스위칭 하는 우수한 특성을 가지고 있지만, 이를 위해 3상인 경우 보조회로부분에 1개

의 공진용 인덕터, 6개의 다이오드 그리고 6개의 보조 공진 스위치를 추가 사용해야 한다. 따라서 기존의 ZVT 토폴로지는 공통적으로 주 전력 스위치가 ZVT 조건을 만족하기 위해 사용되는 보조회로부분에 과도한 컴포넌트의 추가사용으로 인한 원가상승 및 제어의 복잡성 등의 문제점을 안고 있다.^{[1] [3]}

그러므로 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다이오드-브릿지 타입 ZVT 인버터를 제안한다. 이 토폴로지는 지금까지 제안된 ZVT 인버터와 비교하여 보조 공진 회로부분의 컴포넌트의 수를 감소시킬 수 있다. 제안된 인버터의 보조공진회로는 3개의 공진용 인덕터, 6개의 다이오드 그리고 1개의 보조공진 스위치로 구성된다. 이 토폴로지의 가장 중요한 장점은 한 개의 보조공진 스위치를 사용함으로써 가격의 저렴화 및 스위칭 디바이스의 감소로 인한 제어의 용이성이다.

따라서, 본 연구에서는 제안된 ZVT 토폴로지를 이론적으로 해석하고 ZVT 동작을 위한 보조공진 회로의 적정설계 방법에 대하여 논하였으며, 공진 인덕터의 전류 리셋(reset)을 위한 공진기간 가변제어 알고리즘을 제시하였다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 통하여 주 전력 스위치가 스위칭시 ZVT로 운전되고 있음을 보임으로써 제안된 ZVT 토폴로지와 알고리즘의 유용성을 입증하였다.

2. 기존의 ZVT 인버터

소프트-스위칭 기법은 DC-DC 컨버터를 중심으로 개발되어 주로 정지형 전력변환장치(Static Power Converter)분야에서 적용되어 큰 성과를 이루었다. 하지만 유도 전동기 구동을 위한 인버터는 모터링(Motoring)과 제너레이팅(Generating) 모두를 고려해야 하는 어려움 때문에 최근에서야 소프트-스위칭 기법이 적용되기 시작했다. 이러한 소프트-스위칭 기법은 주 전력 스위칭 소자의 스위칭 상태에 따라 크게 ZVT와 ZCT로 구분할 수 있는데 전자는 스위치 양단간의 전압이 "0"[V] 상태에서 스위칭을 함을 의미하며, 후자는 스위치에 흐르는 전류가 "0"[A] 상태에서 스위칭을 함을 말한다. 여기서 유도 전동기 구동용 소프트-스위칭 인버터는 주로 ZVT 타입을 많이 사용하는데, 그 이유는 dv/dt 를 효과적으로 제어할 수 있어 유도전동기 절연에 유리하기 때문이다.

그림 1은 유도 전동기 구동용 소프트-스위칭 인버터의 대명사로 알려진 ARCP 인버터이다.^[4]

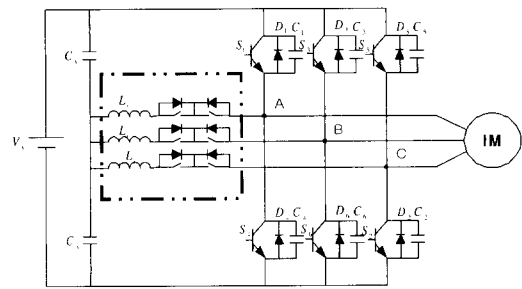


그림 1 ARCP 인버터

Fig. 1 Auxiliary Resonant Commutated Pole Inverter

ARCP 인버터의 구조는 기존의 3상 하드-스위칭 PWM(Pulse Width Modulation) 전압원 인버터에 ZVT 조건을 만족하기 위한 보조공진 회로(점선부분)로 구성되어 있다. 이 토폴로지는 하드-스위칭 인버터에 비해 주 전력 스위치 디바이스의 과전압 및 과전류를 크게 감소할 수 있는 우수한 특성을 가지고 있지만 ZVT 조건을 만족하기 위해서 보조공진 회로부분에서 3개의 공진용 인덕터, 6개의 다이오드 그리고 6개의 스위치를 사용해야 한다. 또한 DC 링크 캐패시터 두 개를 직렬 연결하여 사용함으로써 중성점(Neutral Point) 전압의 불균형 문제도 지니고 있다.

따라서, 이러한 ARCP 인버터의 여러 문제점을 개선하고자 많은 연구가 진행되어왔고, 그 중 하나가 그림 2와 같은 Δ -타입 RSI 인버터이다.^[1]

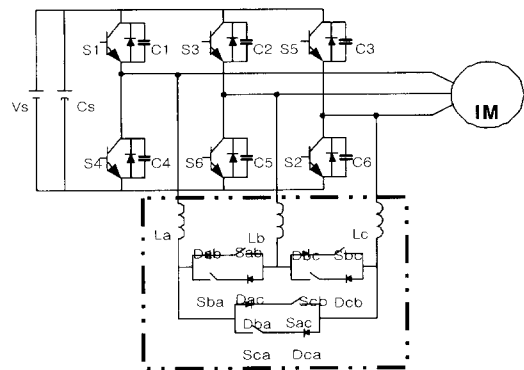


그림 2 Δ -타입 RSI 인버터

Fig. 2 Delta-configured Resonant Snubber Inverter

Δ -타입 RSI 인버터의 구조는 ARCP 인버터와 같이 기존의 3상 전압원 인버터의 출력 단에 Δ -타입 보조공진 회로(점선부분)를 연결한 형태로 구성되어 있다. 이 토폴로지는 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 보조공진 스위치는 ZCT 조건으로 스위칭 할 수 있는 우수

한 특성을 가지고 있다. 하지만 여전히 보조공진 회로 부문에서만 3상인 경우 3개의 공진용 인덕터, 6개의 다이오드 그리고 6개의 보조 스위치를 사용해야 한다. 따라서, Δ -타입 RSI는 ARCP 인버터의 캐패시터 중성점 전압의 불균형 문제는 해결했지만 보조공진회로의 컴포넌트의 수를 감소시키지는 못하였다.

지금까지 살펴본 각 토폴로지들은 공통적으로 주 전력 스위칭 디바이스의 ZVT 조건을 만족하기 위하여 필요한 보조공진 회로부문에 과도한 컴포넌트를 추가 사용함으로써 원가 상승 및 제어 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 연구에서는 보조공진 회로의 토폴로지의 개선을 통하여 컴포넌트를 최소로 하는 새로운 ZVT 토폴로지를 제시한다.

3. 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터

3.1 제안된 ZVT 인버터

유도 전동기 구동용 ZVT 인버터의 보조공진 회로 부문을 개선하기 위하여 그림 2의 Δ -타입 RSI의 보조공진 회로부문의 한 상의 브랜치(branch)를 살펴보면, 이의 기본적인 셀(Cell)은 그림 3 (a)와 같이 1개의 공진용 인덕터, 2개의 다이오드와 2개의 스위치로 구성된다. 이 셀은 그림 3 (b), (d)의 세미 컨버터 타입과 정류기 타입으로 변환 될 수 있다. 여기서 세미 컨버터(semi-converter) 타입은 다이오드의 프리휠링(freewheeling) 동작으로 인하여 소프트-스위칭 조건을 만족 할 수 없으므로, 그림 3 (c)의 풀 컨버터(full converter) 타입으로 변환해야 한다. 풀 컨버터 타입은 3상으로 확장시 1개의 공진용 인덕터, 6개의 다이오드, 6개의 보조 스위치를 필요로 한다. 이는 공진용 인덕터를 하나만 사용하는 장점을 가지지만 보조 스위치 수를 줄이지 못하기 때문에 시스템이 대형화되고 제어가 쉽지 않다는 단점을 가진다.

그림 3 (d)의 다이오드 브릿지-타입의 셀은 1개의 공진용 인덕터, 4개의 다이오드, 1개의 보조스위치로 구성된다. 따라서 3상으로 확장 시 보조 스위치 수를 대폭 감소시킬 수 있는 다이오드 브릿지-타입이 가격, 제어의 용이성 및 소형경량화에 큰 장점을 지닌다.

그러므로, 본 논문에서는 스위치 컴포넌트를 최소화 하기 위해서 그림 3 (d)의 다이오드 브릿지-타입 셀을 이용하여 보조 스위치 하나만을 사용하는 그림 4의 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 제안하였다.

제안된 ZVT 토폴로지는 일반적인 3상 전압원 인버터에 점선부분과 같은 다이오드 브릿지-타입의 보조공

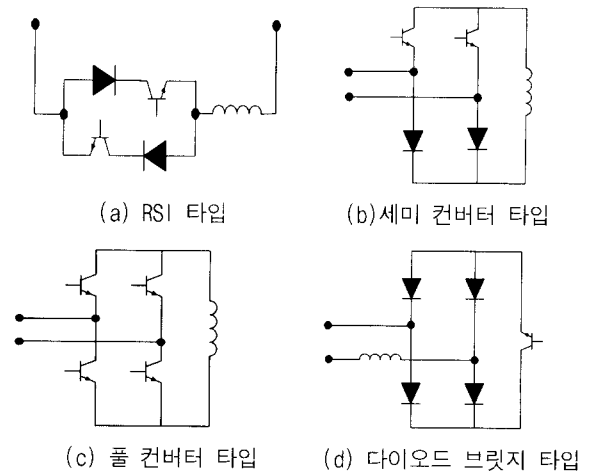


그림 3 토폴로지의 변형
Fig. 3 Topology Variation

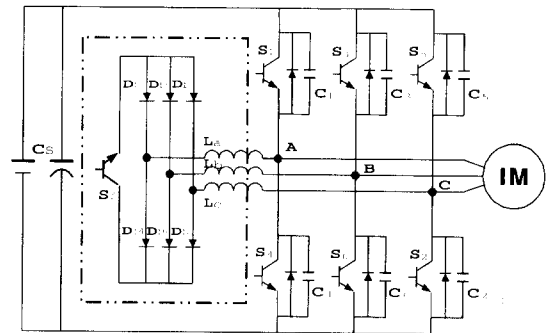


그림 4 제안된 ZVT 인버터
Fig. 4 Proposed ZVT Inverter

진 회로를 출력단에 연결한 형태이다. 3상 전압원 인버터는 6개의 주 전력 스위치(S1~S6), 6개의 역 방향(antiparallel) 다이오드(D1~D6) 그리고 6개의 스너버 캐패시터(C1~C6)로 구성되어지며, 보조공진 회로는 1개의 보조 스위치(Sr), 6개의 다이오드(D_{n1}~D_{n6}) 그리고 3개의 공진용 인덕터(La~Lc)로 구성된다. 이 토폴로지의 가장 큰 장점은 보조공진 회로에서 가격 상승의 주원인이 되는 스위치 수를 1개로 줄일 수 있기 때문에 기존의 ZVT 토폴로지에 비해서 원가절감 및 제어의 용이성의 장점을 가진다.

3.2 동작원리

제안된 토폴로지의 동작원리를 설명하기 위해 먼저 SVM(Space Vector Modulation)기법에 대하여 설명한다. 그림 4에서 주 전력 스위치 6개중에 DC 입력전원의 (+)전원(Positive : P)에 연결된 스위치가 턴-온

(Turn-on)했을 때를 P상태라 하고 (-)전원(Negative)에 연결된 스위치가 턴-온 했을 때를 N상태라 하며, 각상의 순서를 a, b, c상으로 한다. 예를 들면, 스위치 S_1, S_6, S_2 가 턴-온 되었을 때를 PNN 상태, S_4, S_3, S_2 가 턴-온 되었을 때를 NPN 상태로 표현한다. 따라서 이러한 스위칭 상태에 따른 공간 전압 벡터는 그림 5와 같다.

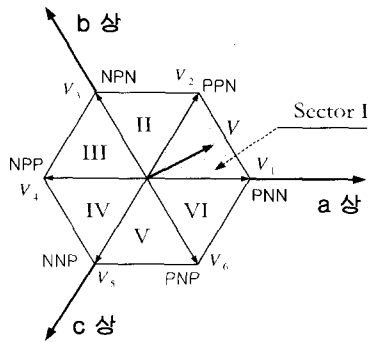


그림 5 스위칭 상태와 공간 전압 벡터
Fig. 5 switching state and voltage space vectors

여기서 인버터의 공간전압벡터 \bar{V} 가 두 개의 공간 전압벡터 \bar{V}_1 (PNN)에서 \bar{V}_2 (PPN)으로 진행되는 섹터(Sector) I 영역에 있다면 스위칭 시퀀스는 [NPN → PNN → PPN → PPP]가 된다. 이 때 주 전류(I_o)가 (+) 방향이라고 가정하면, 제안된 인버터는 주 전력 스위치 S_3, S_4, S_5 가 턴-온 되는 구간에서는 역병렬 다이오드 D_3, D_4, D_5 를 통해 전류 패스가 이루어지고, 또한 모든 주 전력 스위치($S_1 \sim S_6$)의 턴-오프 구간에서는 스너버 캐패시터에 의하여 소프트-스위칭 동작을 할 수 있지만 섹터 I 영역에서의 주 전력 스위치 S_1, S_2, S_6 가 턴-온시 ZVT 조건으로 스위칭하기 위해서는 보조공진회로를 필요로 한다. 하지만 기존의 SVM 제어기법의 스위칭 시퀀스로는 보조공진회로를 적용하더라도 주 전력 스위치(S_1, S_2, S_6)의 스너버 캐패시터가 인덕터와 공진 패스를 구성할 수 없어 ZVT 조건을 만족 할 수가 없다. 이는 스위칭 시퀀스 중 주 전력 스위치(S_1, S_2, S_6)가 턴-온되기 전에 180° 위상차를 갖는 벡터모드(NPP)를 첨가하여 해결 할 수 있다. 첨가되는 벡터모드는 보조공진회로의 공진 조건을 만족하는 최소의 시간으로 설정하여 출력전류에 미치는 영향을 최소화한다. 따라서 수정된 ZVT 인버터용 SVM의 스위칭 시퀀스는 [NPP → PNN → PPN → PPP]으로 그림 6 (b)와 같다.

phase	SW.state	NNN	PNN	PPN	PPP
A	S_4			S_1	
B		S_6		S_3	
C			S_2		S_5

(a) 기존의 SVM(Conventional SVM)

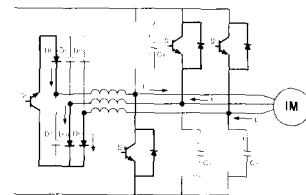
phase	SW.state	NPP	PNN	PPN	PPP
A	S_4			S_1	
B	S_3	S_6		S_3	
C	S_5		S_2		S_5

(b) 수정된 SVM(Modified SVM)

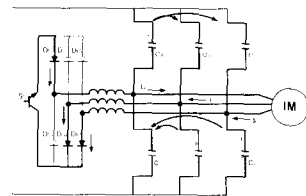
그림 6 SVM 스위칭 시퀀스 (섹터 I)

Fig. 6 SVM switching sequence (sector I)

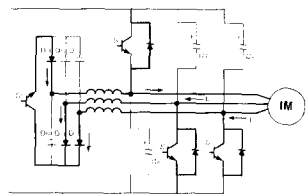
이 스위칭 시퀀스에서 ZVT 스위칭 동작은 그림 7과 같이 크게 충전모드, 공진모드 그리고 방전모드의 3가지 동작모드로 나누어지는데, 그림 7에서 주 전류 패스는 진한부분이며 방향은 화살표 방향과 같다. 각 모드별 상세한 동작설명은 그림 8의 스위칭 시퀀스에 따른 전압 및 전류 파형과 관련하여 상세히 설명한다.



(a) 충전모드 ($t_1 \sim t_3$)



(b) 공진모드 ($t_3 \sim t_4$)



(c) 방전모드 ($t_4 \sim t_6$)

그림 7 제안된 인버터의 동작모드

Fig. 7 Operating Mode of the proposed inverter

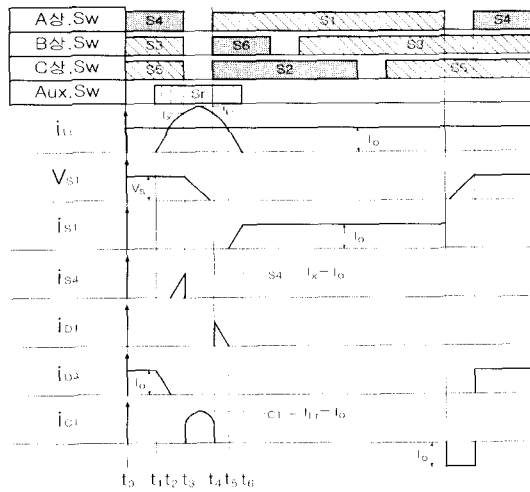


그림 8 주 전력 스위치 S1의 ZVT 동작파형
Fig. 8 ZVT operation waveforms of the main switch S1

그림 8은 각 동작모드에 따른 주 전력 스위치 S1의 ZVT 동작 파형을 나타냈다. 가장 위 부분은 섹터 I 영역에서의 스위칭 시퀀스로 각 상과 보조스위치의 턴-온 되는 구간을 보인 것이다. 다음은 보조스위치의 턴-온에 따라 흐르는 공진용 인덕터 전류(I_{Lr})와 부하전류(I_o)의 파형이며, 주 전력 스위치 S1의 양단전압 V_{S1} , 주 전류(i_{S1} , i_{S4} , i_{D1} , i_{D2}) 그리고 스너버 캐패시터의 전류 i_{C1} 의 순으로 파형을 보였다. 여기서 주 전력 스위치의 전압 V_{S1} 은 턴-오프 시에는 스너버 캐패시터에 의해 dv/dt 가 제한되고, 턴-온 시는 공진 인덕터와의 공진 에너지에 의해 dv/dt 가 제한되며, 주 전력 스위치의 전류는 턴-온 시에 공진용 인덕터에 의해 di/dt 가 제한됨으로써 효과적으로 ZVT 조건을 만들어 주게 된다. 이들의 동작원리를 각 모드별로 나누어 설명하면 다음과 같다.

(a) 충전 모드: 그림 8의 $t_1 \sim t_3$ 의 구간으로 그림 7(a)처럼 S3, S4, S5가 턴-온 상태이며 주 전류 패스는 프리휠링 다이오드 D3, D4, D5를 통해 형성된다. t_1 에서 보조공진 스위치 S_r 을 턴-온 시키면 D_{r1} , D_{r2} , D_{r6} 을 통한 전류 패스를 통해 공진용 인덕터에 전류가 흐르기 시작하여 공진용 인덕터는 에너지를 충전하게 된다. t_2 에서 공진용 인덕터의 전류 I_{Lr} 은 부하전류 I_o 와 같아지며 다이오드 D3, D4, D5의 전류는 "0"이 된다. t_2 이후 공진용 인덕터의 전류가 부하전류를 넘어서면 스위치 S3, S4, S5가 다이오드를 대신하여 전류를 흘러주게 되고, t_3 에서 스

위치에 턴-오프 할 때까지 공진용 인덕터의 전류는 I_x 까지 증가하게 된다. 이때까지 공진용 인덕터는 스너버 캐패시터 C3, C4, C5가 충·방전하기에 충분한 에너지를 충전하게 된다.

(b) 공진 모드: 그림 8의 $t_3 \sim t_4$ 의 구간으로 그림 7(b)에서처럼 모든 주 전력 스위치는 턴-오프 상태(레드타임 기간)이며 주 전류는 인덕터와 캐패시터에 저장된 에너지에 의해 흐른다. t_3 에서 보조공진 스위치와 D_{r1} , D_{r2} , D_{r6} 의 전류 패스를 통하여 공진용 인덕터와 스너버 캐패시터는 공진을 시작하게 된다. 이때 C1, C2, C6는 "0" 전압이 될 때까지 방전하고 C3, C4, C5는 입력전압까지 충전하게 된다. 즉, 그림 7(b)의 화살표와 같이 C1의 전압은 C3, C5으로 C2, C6의 전압은 C4로 에너지 전환이 이루어지게 된다. 이로 인해 그림 8에서처럼 주 전력 스위치 S1, S2, S6의 양단간의 전압은 "0" 전압이 된다.

(c) 방전 모드: 그림 8의 $t_4 \sim t_6$ 구간으로 그림 7(c)에서처럼 에너지 전환이 완전히 끝난 t_4 시점에서 주 전력 스위치 양단의 전압이 "0"인 상태이다. 이때 주 전력 스위치 S1, S2, S6가 그림 8에서처럼 턴-온을 하게 되는데, t_4 에서 비록 주 전력 스위치가 턴-온 하더라도 공진용 인덕터의 전류 I_{Lr} 이 부하전류 I_o 와 같아 질 때까지 전류 패스는 프리휠링 다이오드 D1, D2, D6에 의해 흐르게 된다. t_5 에서 공진전류와 부하전류는 같게 되고 이때부터 비로소 그림 8과 같이 주 전력 스위치 S1, S2, S6에 전류가 흐르게 되고, 따라서 주 전력 스위치 S1은 완벽하게 ZVT 조건으로 턴-온 하게 된다. 한편, 보조 스위치 S_r 은 인덕터 전류가 완전히 방전이 끝나는 t_6 에서 턴-오프를 해야 ZCT 조건으로 턴-오프 하게 되는데, 본 토폴로지는 다이오드 브릿지 구조이기 때문에 인덕터 전류가 리셋 될 때 정확하게 턴-오프하지 않으면 역전류가 흐르게 되고 ZCT 조건을 만족하지 못할 수도 있기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다.

4. 회로 구성 및 제어

본 연구에서 제안한 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터는 크게 나누어 3부분으로 나누어지는데, 기존의 PWM 인버터와 같은 주 전력회로, ZVT 동작을 위한 다이오드 브릿지-타입 보조공진회로 그리고 이들의 제어를 위한 제어회로로 구성된다. 이를 그림 9에 나타

냈으며, 여기서 주 전력회로의 구성은 이미 잘 알려져 있기 때문에 본 연구에서는 보조공진회로와 제어회로 구성에 대하여 기술하고자한다. 3장에서 살펴 본 것처럼 본 연구에서 제안한 인버터가 ZVT 인버터로 소프트-스위칭 하기 위해서는 스너버 캐패시터와 공진용 인덕터 그리고 이들의 제어 시기가 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 보조공진회로의 설계방법과 이의 제어에 대하여 설명한다.

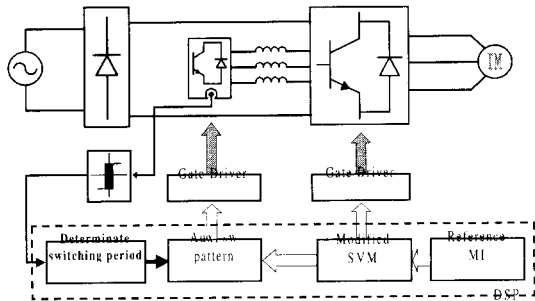


그림 9 제안된 ZVT 인버터 제어 시스템의 개요도
Fig. 9 The proposed ZVT inverter system block diagram

4.1 보조 공진 회로 설계

일반적으로 소프트-스위칭 인버터는 부하전류에 의해서 공진조건 등의 영향을 받기 때문에, ZVT 인버터의 설계와 운전시 부하전류를 고려해야한다. 공진을 위한 스너버 캐패시터와 공진 인덕터는 먼저 인버터의 부하전류범위를 결정하고 이에 따라 적절한 값을 설계할 필요가 있다.

(a) 스너버 캐패시터 C_r : 제안된 ZVT인버터(그림 4)의 스너버 캐패시터와 부하전류와의 관계는 식 (1)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_c = C_r \int_0^t \frac{I_o}{2} dt \tag{1}$$

여기서, 유도 전동기 절연을 위한 주 스위치의 전압 상승제한(dv/dt)을 IEEE std-522의 기준을 참고하여 본 연구에서는 $dv/dt=220[v/us]$ 로 하였으며, 인버터의 데드타임(dead time)을 $2us$ 로 설정하였다. 따라서 스너버 캐패시터의 용량은 이들 조건과 식 (1)에 의해 구할 수 있다. 여기서 캐패시터의 충·방전은 인버터의 데드타임 기간에 일어나는데 이는 그림 10과 같이 보조공진회로의 제어에 의해 인덕터와 캐패시터가 공진했을 때(그림 10 (a))와 그렇지 않고 자연적으로 충·방전 했을 때(그림 10 (b))로 나누어진다. 여기서 캐

패시터가 공진하게 되면 그림 10 (a)에서 캐패시터 충전시간은 항상 $\pi\sqrt{L_r C_r}$ 로 일정하게 되어, 이를 데드타임보다 작게 설계하면 부하전류와 관계없이 항상 안정하게 동작할 수 있다. 그러나 그림 10 (b)와 같은 경우는 식 (1)에 의해 캐패시터 충전시간이 식 (2)와 같이 나타난다.

$$\Delta t_c = \frac{2 C_r V_c}{I_o} \tag{2}$$

따라서 이 경우 식 (2)에서 알 수 있는 것처럼 캐패시터의 충·방전 시간은 부하 전류와 반비례 관계이기 때문에 부하 전류가 어느 이하가 되면 충·방전 시간이 길어지고 그로 인해 인버터에 설정된 데드타임보다 커지게 되어 완전한 충·방전이 이루어지지 않아 ZVT 조건을 만족하지 못하고 스위칭시 서지가 발생하는 구간이 발생한다. 따라서 캐패시터를 적절하게 설계했다 하더라도 이 때를 고려하여 부하전류에 따라 공진제어 패턴을 결정하는 알고리즘이 필요하다.

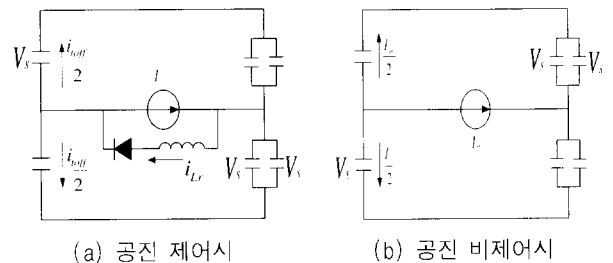


그림 10 제어 패턴에 따른 인버터 등가회로
Fig. 10 Equivalent circuit of the control pattern

(b) 공진용 인덕터 L_r : 제안된 인버터가 공진 구간 동안 완전히 에너지 전환을 하기 위해서는 공진용 인덕터 L_r 의 에너지가 스너버 캐패시터 C_r 의 에너지 보다 충분히 커야 ZVT 조건을 만족할 수 있으며 다음과 같이 표현되어진다.

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

여기서, $I_{toff} = I_{Lr} - I_o$

식 (3)에서 공진에 관계되는 전류 I_{toff} 는 부하 전류가 최대일 때 최소가 된다. 그러므로 I_{toff} 가 최소가 되는 구간에서도 에너지 밸런스 조건을 만족하도록 공진

용 인덕터의 값을 설계해야 한다.

따라서 보조공진회로를 적절히 설계하려면 캐패시터와 공진용 인덕터의 설계조건을 유기적으로 고려하여 설계할 필요가 있다. DC 입력전압 200[V], 부하전류 2[A]일 때의 이들의 조건에 의해서 설계한 결과 스너버 캐패시터 $C_r = 4.5[\text{nF}]$, 공진용 인덕터 $L_r = 100[\mu\text{H}]$ 로 결정하였다.

4.2 제어

본 연구에서 제안한 ZVT 인버터의 효율적인 제어를 위하여 고속 DSP인 TMS320C24를 이용하여 구현하였다. 그림 9에서 보는 것처럼 변조지수 MI (Modulation Index)가 결정되면 DSP는 그림 6 (b)의 제어패턴에 의하여 MSVM 스위칭 패턴을 계산하여 출력함과 동시에 이와 동기를 맞춘 보조공진회로의 스위칭 패턴 또한 계산하여 출력하게 된다. 이때 4.1절에서 언급한 부하전류에 따라 보조공진 제어 패턴을 고려할 필요가 있는데 본 연구의 경우 실제 부하전류를 2[A]로 설정하였기 때문에 캐패시터의 용량이 작아 부하전류에 따라 캐패시터의 충전시간이 크게 영향을 받지 않으므로 실제회로구성에는 고려하지 않았다. 그러나 본 연구에서 제안한 토폴로지는 3상 다이오드 정류기 형태이기 때문에 공진용 인덕터 전류가 리셋팅(resetting)할 때 정확하게 턴-오프 해주지 않으면 보조공진 스위치를 ZCT 조건으로 운전할 수 없을 뿐만 아니라 이로 인해 주 전력 스위치에 서지 전류가 흐르게 될 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 그림 9와 같이 보조공진 인덕터의 전류를 검출하여 인덕터 전류가 "0[A]"가 될 때 보조스위치를 턴-오프 시키는 공진기간 가변제어를 수행하게 된다.

5. 시뮬레이션 및 실험 결과

본 연구에서 제안된 유도 전동기 구동용 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터의 유용성 및 보조공진회로 소자 설계방법의 적정성을 확인하기 위하여 제시된 회로설계조건과 같은 조건인 DC 입력전압 200[V], 부하전류 2[A], 보조공진 소자 $L_r = 100 [\mu\text{H}]$, $C_r = 4.5[\text{nF}]$ 의 조건으로 시뮬레이션을 수행하였고 그 결과를 그림 11, 12에 보였다.

그림 11은 본 연구에서 제안한 3상 ZVT 동작파형으로 A상 주 전류(I_a)가 양 방향일 때 ZVT 인버터를 위한 수정된 SVM(MSVM)의 스위칭 벡터가 섹터 I영역일 때 공진용 인덕터의 전류, 주 전력 스위치의 전

압과 전류를 보인 것이다. 그림의 윗 부분은 주 전력 및 보조스위치의 스위칭 시퀀스이고, 중간부분은 공진용 인덕터(I_{La} , I_{Lb} , I_{Lc})에 흐르는 전류(I_{La} , I_{Lb} , I_{Lc})이며, 아랫부분은 이때 주 전력 스위치의 전압과 전류를 보인 것이다. 이는 그림 8의 동작 과정에서 보는 것과 같이, 스위치 턴-온시 공진용 인덕터와 스너버 캐패시터의 공진에 의해 에너지 전이를 이용으로써 주 전력 스위치가 ZVT 조건으로 스위칭 함을 보여주는 것으로 본 연구에서 제안한 토폴로지 및 제시된 설계방법이 적절함을 알 수 있다. 그림 12는 본 연구에서 제안한 공진기간 가변제어 알고리즘의 효과를 보여주는 파형으로 위의 그림은 주 전력 스위치(S1)의 전압과 전류 파형이며, 아래 그림은 보조 스위치(Sr)의 게이트 드라이브 펄스 파형 및 보조 스위치에 흐르는 공진 전류 파형이다. 그림 12 (a)는 제어 알고리즘을 적용하지 않은 경우로 공진이 완료되어 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 스위칭을 했지만 보조 스위치가 턴-온 상태를 유지 하고 있으면 본 토폴로지가 다이오드 브릿지 형태이기 때문에 역 전위에 의한 공진용 인덕터에 전류가 계속 흐르게 되어 이에 의해 주 전력스위치에 과전류가 발생하는 문제가 발생한다. 따라서 그림 12 (b)와 같이 공진용 인덕터의 전류를 검출하여 이 전류가 리셋팅 할 때 정확하게 보조스위치를 턴-오프 하는 공진기간 가변제어 알고리즘을 적용함으로써 공진이 완료되어 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 턴-온 할때, 주 전력 스위치의 과전류 발생문제를 해결하고, 이로 인해 보조 스위치는 ZCT 조건으로 스위칭 함을 알 수 있다.

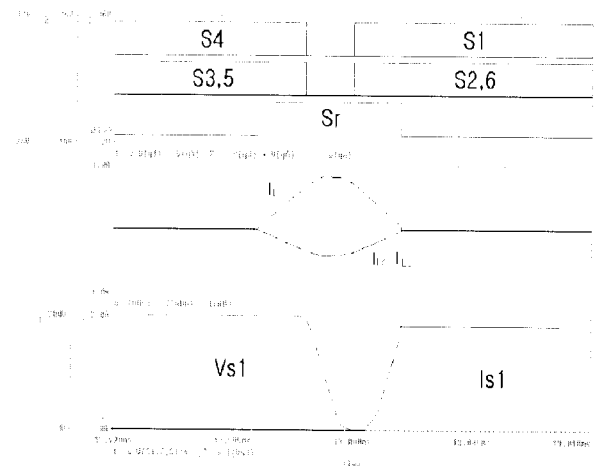


그림 11 제안된 인버터의 ZVT 동작 파형
Fig. 11 ZVT waveforms of proposed inverter

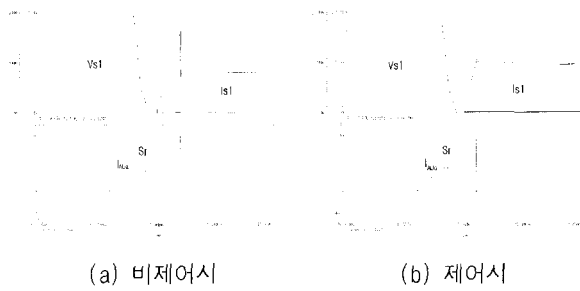


그림 12 공진기간 가변제어 효과
Fig. 12 The effect of the resonant period control

이상 시뮬레이션을 통하여 확인한 제안된 토폴로지의 유용성 및 회로설계방법의 적정성을 실제 실험을 통하여 입증하기 위하여 본 연구에서는 1[kw]용량의 실험용 ZVT 인버터를 제작하였다. 이때 사용한 주전력 및 보조 스위치는 IGBT 모듈(2MB50L-60)을 사용하였고, 보조공진용 소자인 스너버 캐패시터는 4.7[nF], 공진용 인덕터는 110[μH]를 사용하였으며, 인버터의 스위칭 주파수는 10[kHz], 실험 조건은 입력전압 100[V], 부하전류 1[A]에서 실험을 수행하였다.

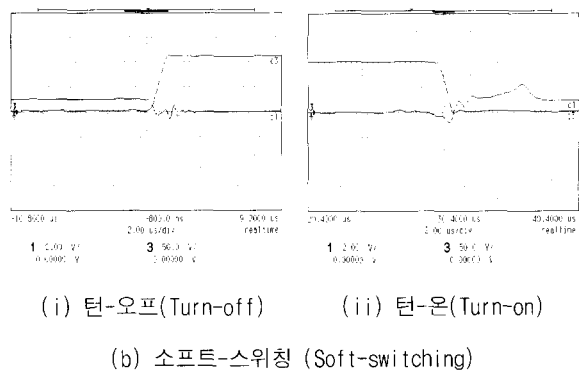
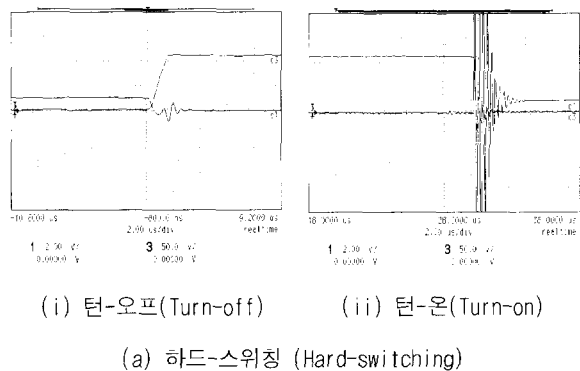


그림 13 전압 및 전류의 실험 파형
Fig. 13 Experimental voltage and current waveforms

실험 결과, 주 전력 스위치의 전압 및 전류파형을 그림 13에 보였다. 이는 주 전력 스위치가 똑같은 조건하에서 그림 13 (a)는 기존의 하드-스위칭 방법으로 스위칭 할 때의 파형이고, 그림 13 (b)는 본 연구에서 제안한 다이오드 브릿지-타입 보조공진회로를 적용하여 소프트-스위칭 할 때의 주 전력 스위치의 전압 및 전류 파형이다.

그림 13에서 주 전력 스위치가 턴-오프 할 때는 하드-스위칭과 소프트-스위칭 모두 결과가 비슷함을 알 수 있는데 이는 두 경우 모두 스위칭시 스너버 캐패시터에 의해 자연적으로 스위치 전압의 dv/dt를 제어하여 ZVT 조건을 만족하기 때문이다. 한편, 주 전력 스위치가 턴-온 할 경우, 하드-스위칭 할 때는 부하전류 때문에 스너버 캐패시터가 스너빙 할 수 없어 주 전력 스위치의 스너버 캐패시터에 전압이 걸려 있는 상태에서 스위치가 턴-온 되어 스위치에 매우 큰 스파이크 전류가 흐르게 되고 또한 회로의 기생 인덕턴스와 결합하여 심한 링킹(ringing)이 발생함을 알 수 있다. 그러나, 본 연구에서 제안한 소프트-스위칭의 경우, 공진용 인덕터의 공진에너지에 의해 캐패시터가 스너빙하게 되어 스위치 전압이 "0"인 상태에서 턴-온 하게되므로 그림 13 (b)에서 볼 수 있는 것 처럼 ZVT 조건으로 운전 할 수 있음을 알 수 있다. 이는 스위치 전압과 전류가 중복되는 부분이 거의 없기 때문에 기존의 하드-스위칭에 비해 스위칭 손실을 획기적으로 감소시킬 수 있음을 보여 주는 것이다. 다만 그림 13(b)에서 보는 것처럼 일정시간후 스위치 전류에 약간의 과전류가 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 본 토폴로지의 다이오드 역 회복 전압 문제 때문에 발생하는 것으로 생각되고 고속 역회복 다이오드(Fast recovery Dide)를 사용한다면 이런 현상을 감소시킬 수 있을 것으로 사료된다.

6. 결론

본 논문에서는 기존의 ZVT 인버터의 장점을 최대한 살리면서 과도한 컴포넌트 사용 등의 문제를 해결하기 위하여 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 제안하였고, 이의 시작품을 제작하여 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 ZVT 인버터에 비하여 보조공진 스위치를 6개에서 1개로 감소시켰다.
2. 주 전력 스위치를 ZVT 조건으로 스위칭 할 수 있어 스위칭 손실을 저감 할 수 있다.

3. 주 전력 스위치의 스위칭시 발생하는 과전압 및 과전류를 제거 또는 감소가 가능하다.

이상의 결과로 본 연구에서 제안한 새로운 토폴로지가 유용함을 확인하였고, ZVT를 위한 보조공진 스위치가 1개만으로도 충분하기 때문에 기존의 하드-스위칭 인버터와 비교하여도 가격경쟁력을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

앞으로 보조공진회로에 사용하는 다이오드 역 회복 문제와 회로의 기생인덕턴스를 감소시키는 방법에 대한 연구가 진행되어야 할 것이고, 본 토폴로지를 유도 전동기에 적용하여 실제 효율개선 효과 등을 검증하는 연구가 계속 되어야 할 것이다.

이 논문은 에너지 관리공단의 '99 에너지 기술 학술진흥사업으로 연구되었음.

참 고 문 헌

[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.

저 자 소 개



이성룡(李星龍)

1958년 11월 30일생. 1980년 명지대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~1998년 Virginia Tech. visiting professor. 1990년~현재 군산대학교 공대 전기전자제어공학

부 교수.



고성훈(高晟勳)

1972년 6월 1일생. 1998년 군산대학교 제어계측공학과 졸업. 현재 동 대학원 석사과정 수료.



송인석(宋仁碩)

1971년 4월 1일생. 1997년 군산대 제어계측공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 현재 한국전기연구소 인턴연구원.