

소프트-스위칭 PFC-인버터에 대한 연구

이성룡, 권순신, 주연홍  
 군산대학교 전자정보공학부

A Study on PFC-Inverter Soft-Switching

S. R. Lee, S. S. Kwon, Y. H. Joo  
 Kunsan Nat'l University Division of the Electronic and Information Engineering

Abstract - A new soft-switching PFC-Inverter for Induction Motor's operation with single phase or three phase medium size is proposed. In order to improve the power factor and the efficiency, in this paper, the ZVT topology in the conventional PFC-Inverter is adopted. So, the operation mode of the proposed ZVT PFC-Inverter is analyzed and the optimum circuit is designed. At last, the PSPICE simulation and experiment results are presented in order to verify the validity of the proposed circuit.

1. 서 론

최근 들어 인버터 시스템이 그 유용성으로 인하여 작게는 가전 제품에서부터 크게는 산업용기기에 이르기 까지 널리 보급되어지고 있다. 일반적으로 인버터는 전원 정류부, 제어부와 인버터부분으로 구성되어 진다. 여기서 단상 중용량의 경우(인버터 에어컨 등), 단상 220V를 콘덴서 입력형 다이오드 정류기에 의하여 정류함으로써 인버터의 DC전원을 얻는 것이 일반적인데, 다이오드 정류기는 입력전류의 역률과 고조파 발생등의 각종 문제를 발생시킨다. 최근에는 이러한 문제를 해소하기 위하여 인버터에 PFC기능을 갖는 승압형 다이오드 정류기를 적용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.[1]-[5]

그러나 이러한 PFC-인버터 시스템은 입·출력에서 발생하는 고조파 및 필터 사이즈의 감소를 위하여 주전력 스위칭 소자의 스위칭 주파수를 높게 제어하는 경향이 있고, 이에 따라 필연적으로 주 전력 스위칭 소자의 스위칭손실 증가에 의한 효율 저하 및 스위칭 스트레스에 의한 서지 등의 EMI 등의 문제를 피할 수 없게 된다. 이는 PFC-인버터 시스템을 고효율·고품질화 하기 위해서는 스위칭 손실 및 스위칭 스트레스를 확실하게 저감시키기 위한 소프트-스위칭 기법의 적용이 필요하다는 것을 의미한다. 본 연구에서는 이상의 문제를 해결하기 위하여 소프트-스위칭기법을 적용한 PFC-인버터 시스템을 제안 하고자 한다.[1]-[4]

그러므로 본 연구에서는 PFC-인버터의 적용대상이 인버터 에어컨과 같은 단상 중용량의 전동기가 주류이기 때문에 전동기의 절연문제 등을 위하여 스위칭 전압의 dv/dt를 효율적으로 제한할 수 있는 ZVT기법이 효율적인 것으로 판단되어 ZVT기법을 적용한다.

따라서 본 연구에서는 PFC와 인버터에 각각 그에 맞는 ZVT기법을 적용하고 각각의 동작 원리를 해석한 다음 최적의 시스템을 설계하였다. 시스템 설계 조건은 용량 3[KW], 스위칭 주파수는 스위칭 소자의 스위칭 특성상 MOSFET를 사용한 PFC는 70[KHz], IGBT를 사용한 인버터는 20[KHz]로 하였다. 이상의 조건으로 설계된 PFC와 인버터는 PSPICE와 PSIM을 이용한 시뮬레이션을 통해 그 유용성을 입증하고, 이들을 결합한 최적의 ZVT PFC-인버터 시스템을 구성하기 위하여 각각의 동작특성을 분석하고 각각 상대 토폴로

지와 최적으로 결합할 수 있는 제어 방법을 모색하여 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 유용성을 입증하고자 한다.

2. PFC-인버터 시스템

Fig 1은 일반적으로 인버터 시스템에 PFC 기능을 추가한 PFC-인버터 시스템의 블록 다이어그램을 나타내고 있다. 본 시스템은 기존 인버터의 DC 입력을 얻기 위한 다이오드 정류기 부분에 Boost 타입 초퍼를 부가하여 PFC 기능을 추가함으로써 전원측의 고조파 및 역률을 개선할 수 있다.. 그러나 이 시스템을 고효율·고품질화 하기 위해서는 고조파 및 입력력 필터 사이즈 저감을 위한 고 스위칭 주파수 운전이 필요하고 이에 따라 수반하는 스위칭 손실 및 스트레스 저감을 위해 소프트-스위칭 기법을 적용할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 PFC와 인버터에 각각 ZVT기법을 적용시키는 방법에 대하여 논하고 이의 동작원리를 기술한다.

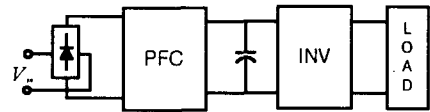


Fig 1 PFC-인버터 시스템

2.1 ZVT PFC

Fig 2는 기존의 다이오드 정류회로에 많이 사용되고 있는 승압형 PFC회로에 ZVT 보조회로(점선부분)를 추가한 ZVT-PFC 회로이다. 승압형 PFC회로는 회로가 간단하고, 역률 개선 효과가 뛰어나 기존의 정류회로에 많이 사용되었다. 그러나 입력 고조파 및 필터 사이즈를 감소시키기 위하여 높은 스위칭 주파수(70[KHz] 이상)로 운전하게 되는데, 이 때문에 스위칭 스트레스 및 손실을 저감하기 위하여 각종 snubber 회로가 제안되어졌다.[3][4]

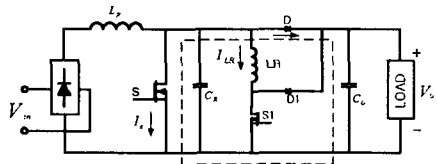


Fig 2 ZVT PFC

본 연구에서는 이상의 snubber 회로 중 자체 손실 없이 Active snubber가 가능한 소프트-스위칭 기법 중 Fig 2의 점선 부분과 같은 ZVT 기법을 적용한다.[4] 이는 ZCT 기법이 주 스위치 턴 온/오프 시 모두 보조스위치를 턴 온 시켜야 하는데 반하여 ZVT 스위칭 기법은 주 스위치의 턴 온 시에만 보조스위치를 턴 온하면 되기 때문에 제어가 간단하고, 인버터와 관련해서 스위칭 소

자의  $dv/dt$ 의 제한을 효과적으로 할 수 있는 장점이 있기 때문이다.

본 연구에서 적용한 ZVT-PFC 회로의 동작을 Fig 3에 보였다. Fig 3에서 알 수 있듯이 주 스위치 및 ZVT 동작하도록 하기 위해 보조 스위치 및 공진 회로를 사용하게 된다.

동작특성은 보조스위치  $S_1$ 이  $T_0$ 에서 turn-on되면 공진

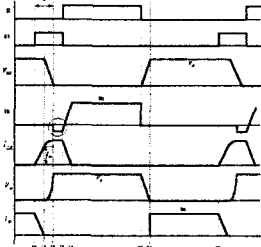


Fig 3 ZVT PFC 회로의 동작

인덕터에 흐르는 전류는 입력 전류에 도달할 때까지 흐르게 되며 공진 인덕터 전류는 인덕터  $L_R$ 과 캐패시터  $C_o$  사이의 공진 값에 따라 충전된 전압이 영전압이 될 때까지 증가한다.  $T_3$ 에서  $S_1$ 은 턴 오프되고 스위치 양단의 전압은  $V_o$ 가 된다. 이 시간 동안 주 스위치  $S$ 는 turn on된다. 이 시간동안 공진 인덕터에 축적된 에너지는 부하로 전달된다. 인덕터 전류는  $T_4$ 에서 zero가 될 때까지 감소한다.

Fig 3의 왼 부분은 ZVT가 되고 있음을 나타낸다. ZVS (zero voltage switching)이 되기 위한 timing  $T_0$ 는  $t_{01} + t_{12}$  보다 커야하며 주 스위치가 턴 온 되기 전에 턴 오프 되어야한다.

## 2.2 ZVT 인버터

본 연구에서는 PFC-인버터 시스템용 ZVT-인버터로 다이오드 브릿지 타입 ZVT-인버터를 채택하였고, 회로의 구성은 Fig 5와 같다.

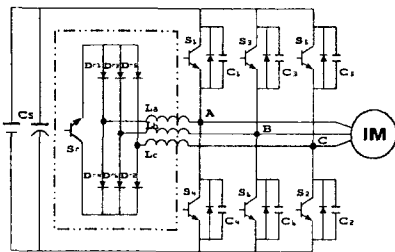


Fig 5 ZVT-인버터의 회로 구성

인버터의 동작원리를 살펴보면 주 전류 ( $I_o$ )가 (+) 방향이라고 가정하면, 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 보조공진 회로를 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  $180^\circ$  위상차를 갖는 벡터모드(NPP)를 첨가하여 해결 할 수 있다. 따라서 수정된 ZVT 인버터용 SVM의 스위칭 시퀀스는 [NPP  $\rightarrow$  PNN

$\rightarrow$  PPN  $\rightarrow$  PPP]으로 변환하게 된다.

Fig 6은 주 전력 스위치  $S_1$ 의 ZVT 동작 파형을 나타냈다. 가장 위 부분은 섹터 I 영역에서의 스위칭 시퀀스로 각 상과 보조스위치의 턴-온 되는 구간을 보인 것이다. 다음은 보조스

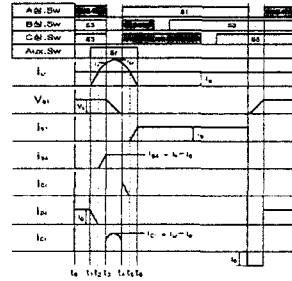


Fig 6 ZVT-인버터의 동작 특성

위치의 턴-온에 따라 흐르는 공진용 인덕터 전류( $I_{Lr}$ )와 부하전류 ( $I_o$ )의 파형이며, 주 전력 스위치  $S_1$ 의 양단전압  $V_{S1}$ , 주 전류 ( $i_{S1}, i_{S4}, i_{D1}, i_{D4}$ ) 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.[1][2]

## 3. 시스템 설계

### 3.1 ZVT-인버터의 설계

일반적으로 소프트-스위칭 인버터는 부하전류에 의해서 공진조건등이 영향을 받기 때문에, ZVT 인버터의 설계와 운전시 부하전류를 고려해야한다. 공진을 위한 스너버 캐패시터와 공진 인덕터는 먼저 인버터의 부하전류 범위를 결정하고 이에 따라 최적값을 설계할 필요가 있다. [1][2]

#### ㉞ 스너버 캐패시터 $C_r$

Fig 5의 ZVT-인버터의 스너버 캐패시터와 부하전류와의 관계는 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

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 데드타임을  $2us$ 로 설정하였다.

#### ㉟ 공진용 인덕터 $L_r$

제한된 인버터가 공진 구간 동안 완전히 에너지 전환을 하기 위해서는 공진용 인덕터  $L_r$ 의 에너지가 스너버 캐패시터  $C_r$ 의 에너지보다 충분히 커야 ZVT 조건을 만족할 수 있으며 다음과 같이 표현되어진다.

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

여기서,

$$I_{toff} = I_{Lr} - I_o \quad (3)$$

식 (2)에서 공진에 관계되는 전류  $I_{toff}$ 는 부하 전류가 최대일 때 최소가 된다. 그러므로  $I_{toff}$ 가 최소가 되는 구간에서도 에너지 밸런스 조건을 만족하도록 공진용 인덕터의 값을 설계해야 한다.

### 3.2 ZVT-PFC의 설계

Boost PFC의 있어서 인덕터의 용량 및 스위칭 주파수

에 따라 효율 특성은 변하게 된다.

①  $C_o$  값 선정

$C_o$ 의 선택의 주요한 요인은 2차 고조파에 의한 출력 리플이다. 따라서  $C_o$ 는 식 (6)과 같다.

$$C_o = \frac{P_o / \eta}{4\pi f_L V_o^{rbl}} \quad (6)$$

여기서,  $V_o^{rbl}$ 은 출력 리플 전압 나타내며,  $\eta$ 는 효율  $f_L$ 은 입력전원의 주파수이다.

②  $L_F$ 의 선정

승압 인덕터  $L_F$ 의 제산은 식 (7)과 같다.

$$L_F = \frac{(\sqrt{2} V_{inmin} D_{max}) / f_s}{I_o^{rbl} I_o^{peak}} \quad (7)$$

여기서,  $D_{max}$ 는 시비율,  $f_s$ 는 스위칭 주파수,  $I_o^{rbl}$ 는 출력전류의 p-p,  $I_o^{peak}$ 는 출력 전류의 최대값이다.

③ 공진 인덕터  $L_R$

공진 인덕터값은 Fig 3의  $t_0-t_1$ 에 의해 유도할 수 있다.

$$L_R = \frac{t_{01} V_o}{I_{in}} \quad (8)$$

④ 공진 캐패시터  $C_R$

공진 캐패시터 값은 Fig 3의  $t_1-t_2$ 에 따라 유도할 수 있다.

$$C_R = \frac{t_{12}^2 \times 4}{\pi^2 \times L_R} \quad (9)$$

4 결과 및 검토

ZVT-PFC의 유용성 공진회로의 소자 설계방법의 적정성을 확인하기 위하여 제시된 회로설계조건과 같은 조건인 DC 입력전압 220[V],  $L_F = 0.45$  [mH],  $C_F = 4700$  [uF]의 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. Fig 7은 ZVT-PFC를 ZVT-인버터에 적용하였을 때 PFC의 입력 전압과 입력 전류를 나타내고 있다.

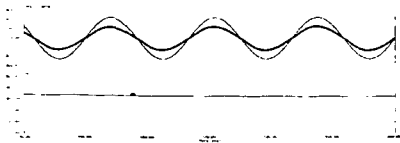


Fig 7 PFC의 입력 전류와 전압파형

으며, Fig 8은 인버터의 출력 전류를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과를 통해 인버터의 출력 특성이 좋음을 알 수 있다.

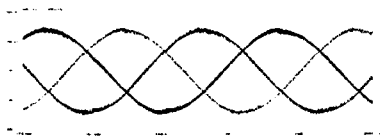
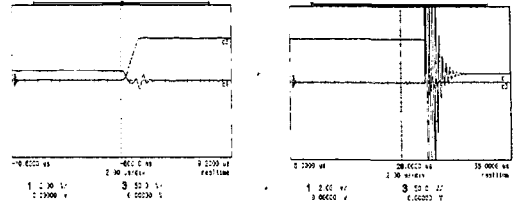


Fig 8 인버터의 출력파형

이상 시뮬레이션을 통하여 확인한 소프트-스위칭 PFC-인버터의 유용성 및 회로설계방법의 적정성을 실제 실험을 통하여 입증하기 위하여 본 연구에서는 1[kw]용량의 실험용 ZVT 인버터를 제작하였다. 이때 사용한 주전력 및 보조 스위치는 IGBT를 사용하였고, 스너버 캐패시터는 4.7[nF], 공진용 인덕터는 110[uH]를 사용하였으며, 스위칭 주파수는 10[kHz], 실험 조건은 입력전압 100[V], 부하전류 1[A]에서 실험을 수행하였다.

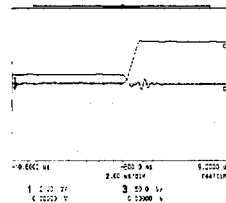
실험 결과, 주 전력 스위치의 전압 및 전류파형을 Fig 9에 보였다. 이는 주 전력 스위치가 똑같은 조건하에서 Fig 9(a)는 기존의 하드-스위칭 방법으로 스위칭 할 때의 파형이고, Fig 9(b)는 소프트-스위칭 할 때의 주 전력 스위치의 전압 및 전류 파형이다.



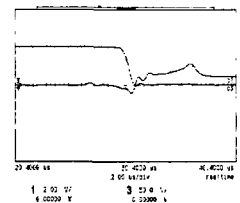
(i) 턴-오프(Turn-off)

(ii) 턴-온(Turn-on)

(a) 하드-스위칭 (Hard-switching)



(i) 턴-오프(Turn-off)



(ii) 턴-온(Turn-on)

(b) 소프트-스위칭 (Soft-switching)

Fig 9 전압 및 전류의 실험 파형

5. 결론

본 논문에서는 주 전력 스위치를 ZVT 조건으로 스위칭 할 수 있어 스위칭 손실을 저감할 수 있었으며, 주 전력 스위치의 스위칭 시 발생하는 과전압 및 과전류를 제거 또는 감소가 가능하다. 또한 기존의 ZVT-인버터의 입력전원으로 사용된 콘덴서 입력형 다이오드 정류기를 소프트-스위칭 PFC로 대체하면서 인버터 입력 전압의 파형을 개선할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 입증할 수 있었다. 앞으로 설계된 ZVT-PFC를 제작된 ZVT-인버터에 연결하여 전체 PFC-인버터의 효율 향상 및 THD를 저감할 수 있음을 실험을 통하여 검증하고, 본 시스템을 유도 전동기등에 적용하여 실제 효율개선 효과 등을 검증하는 연구가 계속 되어야 할 것이다.

[참고 문헌]

[1] 고성훈, 송인석, 이성룡 "유도전동기 구동용 다이오드 브릿-타입 ZVT 인버터" 대한전력전자학회 논문집 Vol. 4, No. 6, 1999, pp561-569  
 [2] C. Cuadros, D. Borojevic, 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.  
 [3] M.M Jovanovic, C. Zhou, P. Liao, "Evaluation of active and passive snubber technique for applications in PFC boost converter" Sixth International Conference on Power Semiconductors and Their Applications (Electronic '92) Munich, Germany, Nov. 11, 1992  
 [4] G. Hua, C.S Leu, F.C. Lee, "novel zero voltage transition PWM converter," IEEE Power Electronics Specialist Conference Record, pp.55-61, 1992  
 [5] 문상필, 서기영, 이현우, 김영문, "역률개선회로를 갖는 에어컨용 전력변환장치", 대한전기학회논문지 49권 5호, pp345-351