

ZVT 스위칭 되는 전류제어형 양방향 인버터의 구현

이 성룡, 고 성훈, 김 성우*
 군산대학교 전자정보공학부

An Implementation of a Current Controlled Bi-directional Inverter with ZVT Switching

S.R. Lee, S.H. Ko, and S.W. Kim

School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

A single-phase bi-directional inverter using a diode bridge-type resonant circuit to implement ZVT(Zero Voltage Transition) switching is presented. It is shown that the ZACE(Zero Average Current Error) algorithm based polarized ramp-time current control can provide a suitable interface between diode bridge-type resonant circuit DC link and the inverter. The current control algorithm is analyzed about how to design the circuit with auxiliary switch which can ZVT operation for the main power switch. The simulation and experimental results would be shown to verify the proposed current algorithm, because the main power switch is turn on with ZVT and the bi-directional inverter is operated.

1. 서 론

최근에 산업이 발전함에 따라 전력계통의 안정 및 고품질화에 대한 요구가 증대되기 시작하였고, 이에 따라 향상된 전력변환기술과 대체에너지원을 이용하여 계통을 제어하기 위한 계통연계형 시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

계통 연계형 시스템은 그 기능에 따라 크게 무정전전원공급장치(Uninterruptible Power Supply), Power Conditioner, DSM(Demand Side Management)으로 구분할 수 있다.

무정전 전원공급장치와 Power Conditioner는 계통에 상관없이 상시 운전해야 하기 때문에 인버터의 효율은 매우 중요하고, DSM의 경우는 분산전원으로 대체에너지를 사용하고 있는데, 지금까지 대체에너지 변환효율이 극히 낮기 때문에 인버터의 효율은 전체 시스템 효율향상에 필수조건이다. 한편, 제어방식으로는 계통에 흐르는 전류를 직접 제어할 수 있는 전류제어방식을 주로 사용하는데 대표적인 전류제어방식으로 간단하고 안정성이

뛰어난 히스테리시스(Hysteresis)전류제어기법을 주로 사용한다. 이 방식은 계통과 부하변동에 따라 스위칭 주파수가 아주 민감하게 변동하기 때문에 스위치 소자 사용에 한계가 있고, 출력필터 설계의 어려움 등의 단점과 스위칭시간을 예측할 수 없기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용하기가 매우 어렵다^[2].

그러므로, 본 논문에서는 계통연계시스템을 고 효율화하기 위해서 필요한 소프트-스위칭 기법의 적용이 가능한 CR-PWM(Current Regulated Pulse Width Modulation) 인버터를 제안하고자 한다. 이를 위해 PRT(Polarized Ramp-time)전류제어기법을 적용하는데, 이 전류제어기법은 현재의 기울기 정보를 가지고 다음주기의 스위칭 시퀀스를 결정하는 알고리즘으로 히스테리시스 전류기법의 좋은 특성은 유지하면서 단점인 가변스위칭 주파수문제를 해결할 수 있으며 다음 스위칭 시퀀스를 예측할 수 있기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있는 장점을 가진다^[1,3].

따라서, 본 연구에서는 제안된 전류제어 알고리즘과 ZVT동작원리를 이론적으로 해석하고 ZVT 동작을 위한 보조공진회로 적정설계방법에 대하여 논의하였다. 또한, PSIM과Pspice를 이용한 시뮬레이션과 DSP를 이용하여 3kw급 시작품을 제작 실험하였다. 시뮬레이션과 실험을 통하여 주 전력 스위치가 스위칭시 ZVT로 스위칭하며 CR-PWM 인버터로 운전되고 있음을 보임으로써 제안된 인버터의 유용성을 입증하였다.

2. 소프트-스위칭 인버터

최근의 전력용 반도체 스위치의 급격한 발전과 더불어 전력변환장치의 소형경량화 및 성능향상을 위해 스위칭 주파수를 높게 제어하는 경향이 있는데, 기존의 하드스위칭 방식으로는 전력손실 및 스위칭 스트레스등 여러 문제점이 발생하게 된다. 또한, 본 연구의 적용대상이 대체에너지를 이용하는 시스템이기 때문에 전력변환효율이 중요하다. 따라서 인버터의 성능향상을 위해서 소프트-스위칭 기법을 적용할 필요가 있다. 여러 가지 소프트-스위칭 인버터가 연구되었지만 본 연구에서는 스위칭

컴포넌트를 최소화하기 위해서 제안된 다이오드 브릿지-타입 셀을 이용하여 보조 스위치 하나만을 사용하는 그림 2.1의 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 시스템에 적용하고자 한다[4].

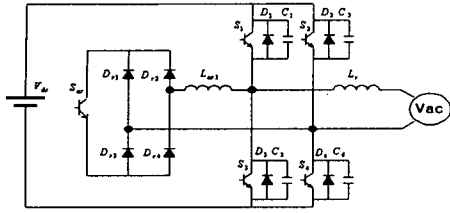


그림 2.1 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터

다이오드 브릿지-타입 ZVT 토폴로지는 일반적인 단상 풀-브릿지 인버터에 다이오드 브릿지-타입의 보조공진 회로를 출력 단에 연결한 형태로 보조스위치를 하나만을 사용함으로써 원가절감 및 제어의 용이성의 장점을 가진다.

이 토폴로지의 동작원리는 주 스위치가 턴-온하기 전에 보조공진 회로를 먼저 활성화 시켜 공진 인덕터를 충전한다. 충전된 인덕터 에너지와 스너버 캐패시터는 데드타임 구간에 공진 하여 주 전력 스위치의 양단간의 전압은 "0" 상태가 되도록 에너지 전환을 하게 되고, 그 후 주 전력 스위치는 ZVT 조건으로 스위칭을 하게 된다. 전류가 양의 방향으로 흐르고 있을 때의 각 모드별 동작원리를 그림 2.2에 보였다.

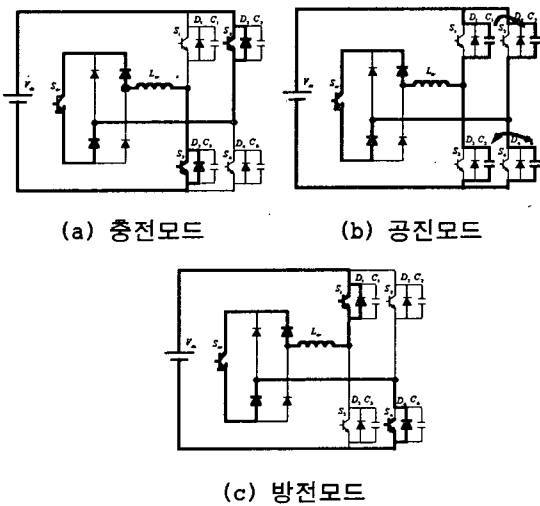


그림 2.2 ZVT 모드별 동작회로

본 연구에서 적용한 ZVT 스위칭 기법은 스위칭 시퀀스 미리 예측하고 보조공진회로를 동작시켜야 한다. 따라서 ZVT 스위칭기법을 적용하기 위해서는 스위칭 시간을 미리 알아야 하기 때문에 기존의 PWM 알고리즘을 적용할 수 없어 modified SVM(Space Vector Modulation)기법을 사용하는 등의 노력이 필요하였다. 특히, 전류제어형의 경우 스위칭 시간을 미리 예측하기가 매우 어렵기 때문에 현재까지 ZVT 스위칭기법을 적

용하지 못하는 실정이다. 그러므로 본 논문에서는 앞 절의 전류 제어기법 중 히스테리시스 기법의 일종인 PRT(Polarized Ramp Time) 전류제어기법에 주목하고 있다. PRT전류제어기법은 현재의 Ramp time을 다음주기의 그 시간으로 결정하는 알고리즘이기 때문에 히스테리시스 전류제어기법의 단점인 가변 스위칭 주파수문제를 해결할 수 있을 뿐 아니라 스위칭 시간을 예측할 수 있기 때문에 ZVT 스위칭기법 적용이 가능하고, 본 논문의 적용 대상이 대체에너지를 이용하는 시스템이기 때문에 전력 변환기의 효율 향상을 기대할 수 있다.

3. PRT 전류제어 인버터

전류제어 알고리즘 중 가장 이상적인 방법으로 ZACE (Zero Average Current Error) 기법이 제시되었으며 이를 보완한 많은 알고리즘이 제안되었다. ZACE type의 전류제어기법을 이용한 AC-DC PWM Inverter의 장점으로서는 제어가 용이하고, 빠른 응답을 가지며 DC 링크 전압에 관계없이 독립적으로 AC 전류를 제어할 수 있다. 그러나 스위칭 주파수가 가변 되는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 PRT전류제어기법이 제시되었다. 이 기법은 이전의 전류 에러 시그널을 이용하여 다음주기의 스위칭 시그널을 결정한다.

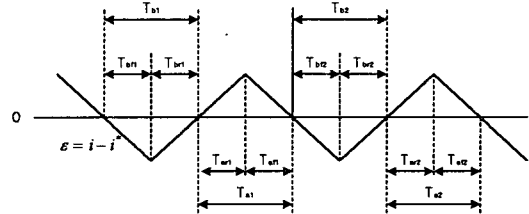


그림 3.1 지령치와 실제전류의 에러 신호

그림 3.1은 인덕턴스에 흐르는 전류와 지령치와의 에러 신호를 보여준다. 그림 3.1에서 지령치를 "0"으로 했을 때 Ta는 전류가 "0"보다 위에 있을 때의 주기를 나타내고 Tb는 전류가 "0"보다 아래쪽에 있을 때의 주기를 나타낸다. 여기서 "0"의 위의 면적과 아래의 면적이 같다면 즉, Ta와 Tb가 같다면 식 2와 같이 스위칭 주파수를 고정시킬 수 있다.

$$T_a^* = T_b^* = \frac{T_{sw}^*}{2} \quad (1)$$

*: 목표값

PRT 기법의 스위칭은 최근의 "0" 교차점에서 일어나는 전류 에러 신호에 의하여 결정되며 이를 식 3과 4로 표현할 수 있다.

$$T_{b/2}^{\#} = \left[\frac{T_{b/1}}{T_{b/1}} \right] \left[\frac{T_{sw}^*}{2} \right] \quad (2)$$

$$T_{a/2}^{\#} = \left[\frac{T_{a/1}}{T_{a/1}} \right] \left[\frac{T_{sw}^*}{2} \right] \quad (3)$$

: 측정된 값 # : 계산에 의한 값

PRT-ZVT 전류제어 알고리즘 블록선도는 그림 3.2와 같고 동작파형은 그림 3.3과 같다.

그림 3.3에서 맨 위의 파형은 측정된 인덕터 전류와 지령치를 비교하는 파형이고, 여기서 e_s 는 비교한 에러신호 ϵ 가 (+)이면 high이고, (-)이면 low를 나타내는 디지털 신호이다. TA와 TB는 e_s 의 (+)와 (-)일 때의 면적을 각각 적분하여 기울기를 만들어낸다. ZTAR은 TA에서 T_{ar} 을 뺀 나머지 시간을 표현하고, ZTBF는 TB에서 T_{br} 을 뺀 나머지 시간을 나타낸다. 따라서 연산된 4가지 파형을 이용하여 다음 단계의 스위칭 신호 S를 결정할 수 있다. 따라서 예측된 스위칭 신호를 이용하여 ZVT 스위치 시퀀스를 결정할 수 있다.

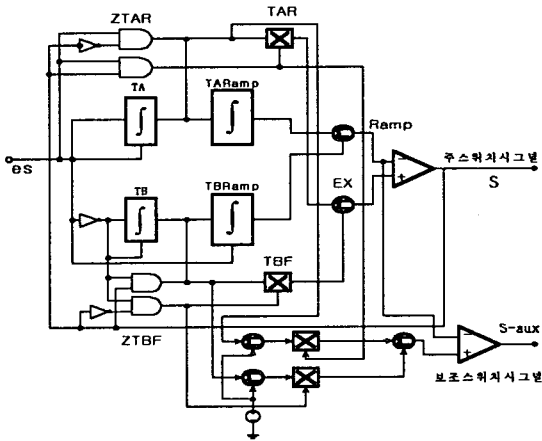


그림 3.2 PRT-ZVT 전류제어 알고리즘

- *TA : T_a 를 측정하기 위한 counter나 적분기.
- *TB : T_b 를 측정하기 위한 counter나 적분기.
- *TARamp : T_a 에 비례한 기울기를 갖는 ramp를 만드는 적분기.
- *TBRamp : T_b 에 비례한 기울기를 갖는 ramp를 만드는 적분기.

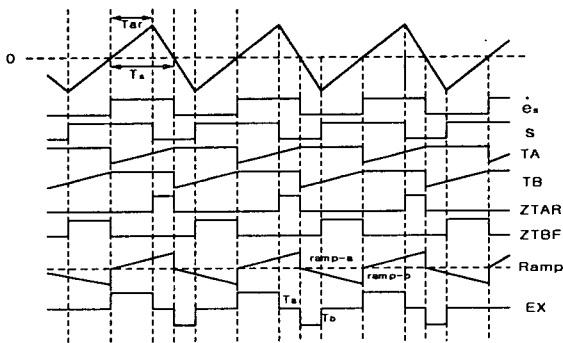


그림 3.3 PRT-ZVT 전류제어 동작 파형

그림 3.3에서 맨 위의 파형은 측정된 리플 인덕터 전류와 기준전류를 비교하는 파형이고, e_s 는 비교한 에러 신호 ϵ 가 positive이면 high이고, negative이면 low를 나타내는 2진수 신호이다. TA와 TB는 e_s 의 positive와 negative일 때의 면적을 각각

적분하여 ramp를 만들어낸다. ZTAR은 TA에서 T_{ar} 을 뺀 나머지 시간을 표현하고, ZTBF는 TB에서 T_{br} 을 뺀 나머지 시간을 나타낸다. 따라서 연산된 4가지 파형을 이용하여 다음 단계의 스위칭 신호 S를 결정할 수 있다.

그림 3.4와 같이 본 논문에서 적용한 전류제어형 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터는 크게 3부분으로 나누어지는데, 기존의 PWM 인버터와 같은 주 전력회로, ZVT 동작을 위한 다이오드 브릿지-타입 보조공진회로 그리고 이들의 제어를 위한 제어회로로 구성된다. 본 논문에서 적용한 인버터가 ZVT인버터로 소프트-스위칭하기 위해서는 스너버 캐패시터와 공진용 인덕터 그리고 이들을 제어하기 위한 제어회로로 구성된다.

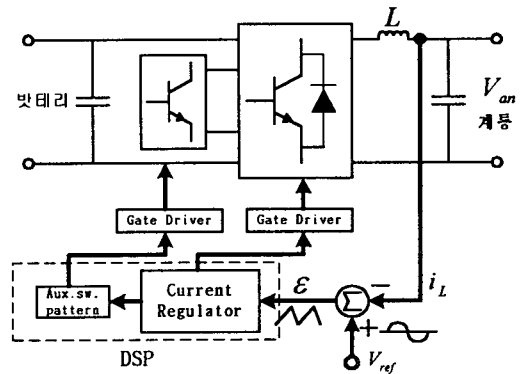


그림 3.4 전류제어형 인버터 시스템 블록선도

4. 실험 및 시뮬레이션 결과 및 고찰

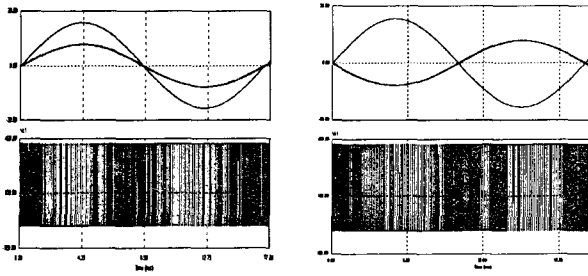
본 연구에서 제안한 전류제어형 ZVT 인버터의 유용성을 확인하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였고 조건은 다음 표 1과 같다.

표 1 시뮬레이션 조건

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{an}	220V	f_i	60Hz
V_{dc}	380V	L_r	20mH
I_a	15A	L_{ar}	20uH
f_{sw}	20kHz	C_r	15nF

먼저 제안된 ZVT 인버터가 계통연계형에 적합한지 확인하기 위하여 양방향으로 동작하는 시뮬레이션을 하였다.

그림 4.1 (a),(b)에서 위 시뮬레이션 파형은 전원 전압 과 인버터 출력 단의 인덕터 전류이고 아래 파형은 주 전력 스위치 S1의 양단간의 전압이다. 그림 4.1(a)에서 전압과 전류는 동위상으로 이때는 인버터 모드로 동작하여 부하에 전력을 공급하고 있음을 알 수 있다. 그림(b)에서 전압과 전류는 180도 위상 차를 가짐으로써 이때는 컨버터 모드로 동작하여 배터리 충전을 할 수 있음을 알 수 있다.



(a) 등위상 파형 (b) 180도 위상차 파형
그림 4.1 양방향 인버터 동작 시뮬레이션 파형

그림 4.2는 인덕터 전류의 주파수 스펙트럼으로 PRT 기법을 사용함으로써 고조파 저감 및 스위칭 주파수가 고정됨을 알 수 있다.

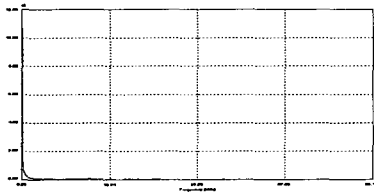


그림 4.2 전류 스펙트럼

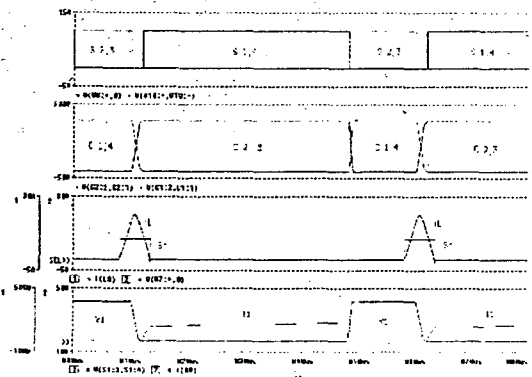


그림 4.3 인버터의 ZVT 스위칭 파형

그림 4.3은 인버터의 ZVT 동작 파형으로 위 파형은 주 전력 스위치 S1 및 보조공진 스위치 Sr의 스위칭 신호와 그때 흐르는 공진 인덕터 전류이며, 아래 파형은 S1의 양단간의 전압과 흐르는 전류이다. S1의 양단간의 전압이 "0" 상태에서 ZVT로 스위칭 됨을 알 수 있다. 이상과 같이 새로운 전류 제어알고리즘을 적용한 ZVT 인버터를 시뮬레이션을 통하여 양방향 전류제어가 가능하고, 스위칭 주파수가 고정됨으로서 ZVT스위칭이 가능함을 알 수 있다.

이상 시뮬레이션을 통하여 확인한 제안된 토폴로지의 유용성을 실제실험을 통하여 입증하기 위하여 확인하기 위하여 3kw급 실험용 ZVT 인버터를 제작 실험하였다. 이때 시스템 파라미터는 시뮬레이션 조건과 동일하며 주전력 및 보조스위치는 IGBT 모듈 (2MB50L-60)을 사용하였고, 제어용 프로세서는 DSP(TMS320C50)을 사용하여 실험하였다.

그림 4.4는 입력교류전압(110V)과 인버터의 전압 및 전류(5A)의 출력파형으로 동위상으로 작동하여 부하에 전력을 공급하고 있음을 알 수 있으며 스위치 주파수가 고정되지 못하고 있음을 알 수 있는데 이는 측정된 전류와 지령치와의 비교기에서 발생하는 시간지연과 사용한 DSP가 교육용이기 때문에 비교적 저속인 입출력장치로 인한 시간지연으로 생기는 문제점으로 사료된다.

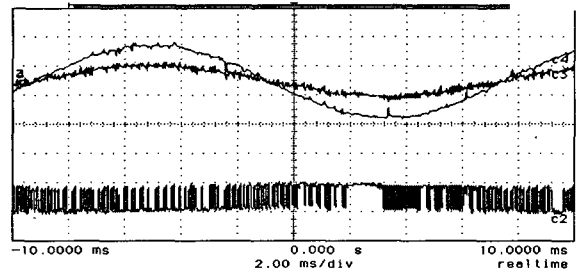


그림 4.4 PRT-ZVT 인버터의 전압 전류 실험파형

5. 결 론

본 논문에서는 계통연계형 시스템의 고효율화 하기 위해서 필요한 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있는 전류제어 ZVT 인버터를 제안하였고, 소프트-스위칭 가능한 전류제어 알고리즘과 ZVT동작 원리를 이론적으로 해석하였으며 ZVT 동작을 위한 보조공진회로 적정설계방법에 대하여 논의하였다. 또한 PSIM과 PSpice를 통한 시뮬레이션과 DSP를 이용한 실험을 통하여 그 유용성을 입증하였다. 제안된 전류제어 ZVT인버터는 양방향 전류제어가 가능하므로 계통연계형에 적용할 수 있으며, ZVT로 동작하기 때문에 대체에너지 시스템의 효율 향상이 기대 된다. 또한 ZVT 조건을 만족시키기 위한 보조공진 스위치가 1개만으로도 충분하기 때문에 기존의 인버터와 비교하여도 가격경쟁력을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Lawrence J. Borle and Chem V. Nayar "Ramptime Current Control" accepted to the IEEE Conference on Power Electronics, pp. 828~834, 1996.
- [2] L. J. Borle and C. V. Nayar, "Zero Average Current Error' Controlled Power Flow for AC-DC Power Converters", accepted for publication IEEE Trans. Power Electronics, Nov. 1995.
- [3] D. M. Brod and D. W. Novotny, "Current control of VSI-PWM inverters", IEEE Trans. Industry Application, Vol.21, No.4, May/June 1985, pp. 562~570.
- [4] 이성룡, 고성훈, 송인석 "유도전동기 구동용 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터" 전력전자학회 논문지 Vol. 4 No. 6, pp. 61~569 1999년 12월.