전력전자학술대회 논문집 2002. 7. 3 ~ 7. 6

DSP를 이용한 전류제어형 인버터의 ZVT-PRT 알고리즘의 구현

이성룡, 전칠환, 김상수
군산대학교 전자정보공학부

Implementation of a ZVT-PRT Algorithm for Current Controlled Inverters using a Digital Signal Processor

S.R. Lee, C.H. Jeon, S.S. Kim
School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

In this paper, a single-phase inverter using a diode bridge-type resonant circuit to implement ZVT(Zero Voltage Transition) switching is presented. 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

산업 사회의 발전은 높은 정밀도를 가지는 전자 장비들의 생산을 요구하게 되었으며, 이들 고성능 전자제품들은 정전이나 순시전압강하 등 전원상태가 불량한 경우에 매우 민감한 반응을 보이기 때문에 전력계통의 안정 및 고품질화에 대한 요구가 증대되기 시작하였다. 지구환경변화에 대응하기 위하여 여러 가지 대체에너지원을 이용한 저녁을 생산하고 있는데, 이러한 대체에너지원과 계통을 연계하여 전력을 효율적으로 사용하기 위한 계통연계시스템에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 또한, 대체에너지원을 이용한 계통연계시스템은 아직까지 대체에너지 변환효율이 극히 낮기 때문에 인버터의 효율 향상은 전체 시스템의 효율 향상에 필수조건이다. 따라서, 계통연계시스템의 효율향상을 위해서 최근 인버터에 소프트-스위칭 기법을 적용하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. 계통연계시스템에서 사용하는 인버터는 부하나 계통의 변동에 따른 빠른 응답 및 제어를 위하여 계통의 전류를 직접 제어할 수 있는 전류제어형 인버터를 주로 사용하고 있다. 지금까지 제시되어진 전류제어기법중 대표적인 방법으로 히스테리시스(Hysteresis)전류제어방법이 있다. 이 방법은 단순히 기준 전류의 상한 값과 하한 값을 설정하고 이를 비교하여 추종 전류가 이들 값 사이에 있도록 스위칭 시키는 방법으로 매우 간단하고 부하조건에 상관없이 강인하고 안정성을 가지고 있기 때문에 널리 이용되고 있다. 그러나 이 방식은 계통과 부하변동에 따라 스위칭 주파수가 아주 민감하게 변동하기 때문에 스위칭 소자 사용에 한계가 있고, 출력피러 설계의 어려움 등의 단점과 스위칭 시간을 예측할 수 없기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용하기가 매우 어렵다. 이의 해결을 위해 PRT(Polarized Ramptime)전류제어기법이 제안되었는데 이 전류제어기법은 현재의 기울기 정보를 가지고 다음주기의 스위칭 시퀀스를 결정하는 알고리즘으로 히스테리시스 전류기법의 좋은 특성은 유지하면서 단점인 가변스위칭 주파수 문제를 해결할 수 있으며 다음 스위칭 시간을 예측할 수 있기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있는 장점을 가진다.[1],[2]

그러므로, 본 논문에서는 계통연계시스템을 고효율화하기 위해서 필요한 소프트-스위칭 기법의 적용이 가능한 CR-PWM(Current Regulated Pulse Width Modulation) 인버터에 관하여 논의하였으며, 소프트-스위칭이 가능한 전류제어알고리즘에 대하여 이론적으로 해석하고, 이를 PSIM과 Pspice를 이용한 시뮬레이션과 DSP(Digital Signal Processor)를 사용하여 실험하였다.

2. ZVT-PRT 전류제어형 인버터

기존의 ZVT 토폴로지들은 공통적으로 주 전력 스위칭 디바이스의 ZVT 조건을 만족하기 위하여 필요한 보조공진 회로 부분에 과도한 컴포넌트를 추가 사용함으로써 원가 상승 및 제어가 복잡해지는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 스위치 컴포넌트를 최소화하기 위해서 제안된 다이오드 브릿지-타입 셀을 이용하여 보조 스위치 하나만을 사용하는 그림 1의 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터를 시스템에 적용하고자 한다.[3]

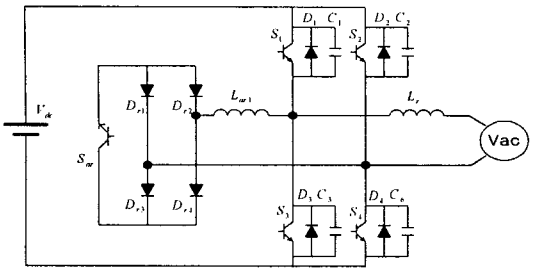

그림 1. 다이오드 브릿지-타입 ZVT 인버터

이 인버터의 동작원리는 주스위치가 턴-온 하기 전에 보조공진 회로를 먼저 활성화 시켜 주 전력 스위치의 양단간의 전압를 "0" 상태가 되도록 에너지 전환을 하게 된다. 그러므로서 주전력 스위치는 ZVT 조건으로 스위칭을 하게 된다. 여기서 주전력스위치가 턴-온 하기 전에 먼저 보조공진 스위치를 턴-온 시켜야 하기 때문에 주전력 스위치의 스위칭 패턴을 예측이 가능해야한다. 그러므로 본 논문에서는 전류 제어 기법 중 히스테리시스 기법의 일종인 PRT(Polarized Ramp Time) 전류제어기법에 사용하였다. PRT전류제어기법은 이전의 전류 에러 시그널을 이용하여 다음 주기의 스위칭 시그널을 결정하는 알고리즘이기 때문에 히스테리시스 전류제어기법의 단점인 가변 스위칭 주파수문제를 해결할 수 있어 ZVT 스위칭기법 적용이 가능하다.[4]

그림 2는 인덕터에 흐르는 전류 i와 지령치 전류 i^*와의 오차 신호를 보여주며 Ta는 ie가 Zero 보다 위에 있을 때의 주기를 나타내고 Tb는 i_e가 Zero보다 아래쪽에 있을 때의 주기를 나타낸다. 여기서 Zero 위의 면적과 아래의 면적이 같다면 즉, Ta 와 Tb가 같다면 식 1과 같이 스위칭 주파수를 고정시킬 수 있다.

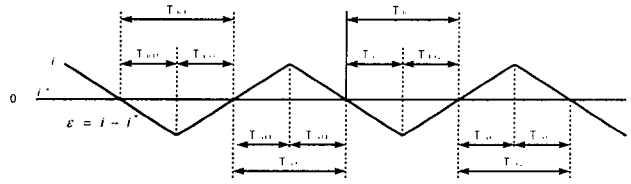

그림 2 전류 에러 시그널

$$T^*_a = T^*_b = \frac{T^*_{sw}}{2} \quad (1)$$

*: 목표값

PRT 기법의 스위칭은 최근의 "0" 교차점에서 일어나는 전류 오차 신호에 의하여 결정되며 이를 식 (2)와 (3)으로 표현할 수 있다.

$$T^{\#}_{br2} = \left[\frac{\hat{T}_{br1}}{\hat{T}_{b1}}\right]\left[\frac{T^*_{sw}}{2}\right] \quad (2)$$

$$T^{\#}_{af2} = \left[\frac{\hat{T}_{af1}}{\hat{T}_{a1}}\right]\left[\frac{T^*_{sw}}{2}\right] \quad (3)$$

^ : 측정된 값 # : 계산에 의한 값

PRT-ZVT 전류제어 알고리즘의 블록선도는 그림 3과 같고, 모드별 동작 파형은 그림 4와 같다.

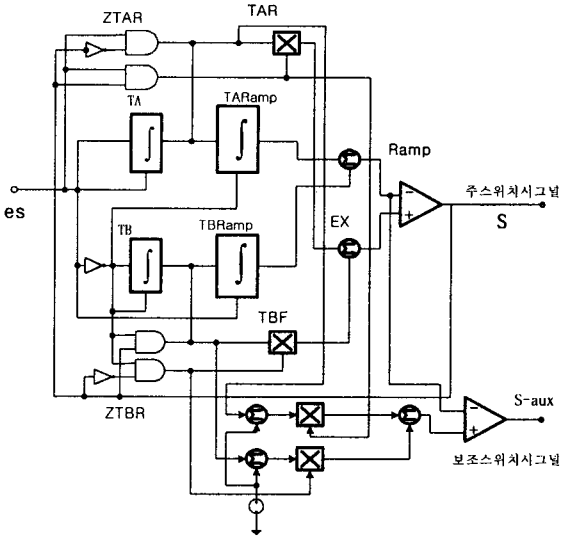

그림 3 PRT-ZVT 전류제어 블럭선도

*TA : Ta를 측정하기 위해 적분한 값.
*TB : Tb를 측정하기 위해 적분한 값.
*TARamp : Ta의 기울기를 갖는 ramp를 생성한 값.
*TNRamp : Tb의 기울기를 갖는 ramp를 생성한 값.

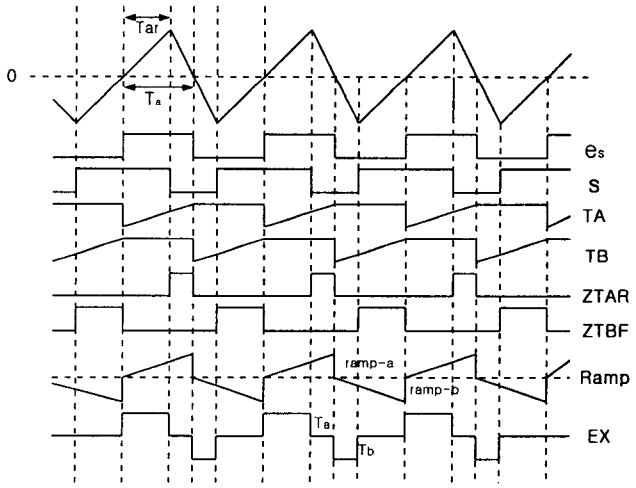

그림 4 PRT 전류제어 동작 파형

그림 4는 위의 파형은 측정된 리플 인덕터 전류와 기준전류를 비교하는 파형이고, e_s는 비교한 ε이 양의 방향이면 high이고, 음의 방향이면 low를 나타내는 디지털 시그널이다. TA와 TB는 e_s의 양의 방향과 음의 방향일 때의 시간을 계산하여 Ramp를 만들어낸다. ZTAR은 TA에서 Tar을 뺀 나머지 시간을 표현하고, ZTB는 TB에서 Tbr를 뺀 나머지 시간을 나타낸다. 즉 Ramp 와 EX를 비교하여 다음 단계의 시그널 S를 결정하게 된다. 여기서 만들어 진 S로 주전력 스위치스위치를 턴-온 시키지 않고 먼저 보조공진 스위치 S-aux를 턴온시킴으로써 제안된 인버터는 ZVT로 스위칭하게 된다.

3. 전체 시스템의 구성

본 논문에서 구현한 ZVT-PRT인버터의 전체 시스템의 구성도는 다음과 같다.

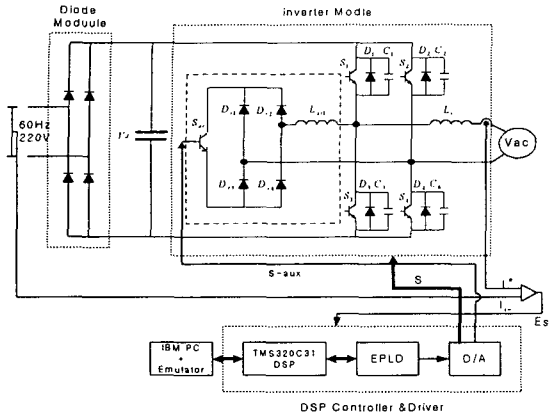

그림 5 ZVT-PRT 인버터 시스템의 전체 구성도

그림 6과 같이 하드웨어부분은 크게 전력변환부, 디지탈제어부로 구분 된다. 시스템의 기능은 최대한 디지탈화 또는 소프트웨어화한다. 이와 같이 함으로써 시스템의 신뢰성이 향상되고 제어 알고리즘에 융통성을 가질 수 있으며, 환경변화에 둔감해지고 외부와의 연결도 우수해진다.

3.1 전력변환부

전력변환부는 마이크로프로세서인 DSP의 지시를 받아 상용전원으로부터 공급되는 교류 전원을 직류로 변환하였다가 계통에 적합한 가변주파수 및 가변전압(또는 가변전류)의 교류전원으로 변환하는 부분으로서 앞에서 제시한 다이오드-브릿지 타입 ZVT인버터이다.

3.2 디지탈제어부

마이크로프로세서부는 전체 시스템의 두뇌에 해당하는 부분으로 PRT알고리즘의 연산을 수행하고 연산결과에 따라 인버터에 제어 신호를 출력한다. 본 논문에서는 마이크로프로세서부로 TI사의 저가형 DSP인 TMS320C31 DSP(digital signal Processer)를 사용하였다. TMS320C31은 고성능 32비트 부동소숫점 방식의 범용 Programmable DSP로서 40MHz의 동작클럭을 가지고 있으며, 일반적인 명령은 1개의 동작사이클(2클럭 주기)에 1개가 실행되므로 20MIPS가 되지만, 연산명령은 1개의 동작사이클에 2개가 실행될 수 있으므로 최대 40MFLOPS로 된다.[2] 인터페이스부는 마이크로프로세서와 전력변환부 사이에 동작지령이나 검출신호 등을 상호 전달하고, 콘트롤러가 외부에 상태를 표시하거나 외부에서 콘트롤러에게 각종 지시를 내릴 수 있는 입출력 기능을 수행하는 부분으로 매우 복잡한 디지털 및 아날로그 회로로 구성된다.[5]

본 논문에서 교육용 DSP보드인 옴사의 TMS-31 키트를 사용하였다. 이 DSP보드에는 인터페이스의 복잡한 회로를 Altera사의 EPLD를 사용하였다. I/O창치로서 8255를 사용하고 있는데 8255 경우 입출력 제어시 3μs이상의 프로그램지연이 생기게 되므로 프로그램 지연이 짧은 D/A변환기 출력으로서 처리하였다. 또한 Es의 입력으로는 INT1과 INT2를 사용하였다. INT1핀과 INT2핀은 falling edge시 인터럽트 flag resister가 set며 그 시간은 50ns정도의 빠른 시간으로서 외부소자에 의한 시간지연을 최소화 하고자 하였다. INT1은 es가 high에서 low로 될 때로 Tb구간을 INT2는 low에서 high로 될 때로 Ta의 구간을 변수로서 저장하고 메인루틴에서 연산되게된다. S는 단지 출력만을 D/A변환기(AD664)로 출력하며, 입력은 프로그램내부에서 입력으로 받게 된다. 프로그램의 순서도를 그림 7에 나타내었다.

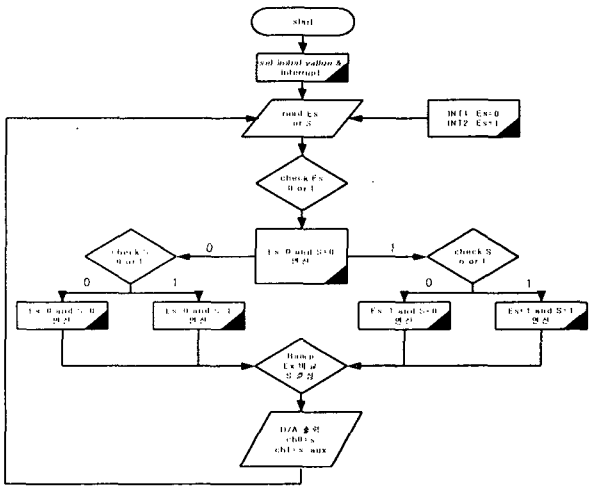

그림 6 ZVT-PRT 인버터의 프로그램 순서도

Main루틴은 DSP내부의 레지스터와 프로그램에서 사용하는 변수들을 초기화한다. 다음 인터럽트 루틴에 의해 Es가 입력되며 S는 프로그램 내부에서 입력으로 받는다. Es와 S의 상태에 따라 미리 지정된 함수를 호출 실행하게 된다. Es의 상태에 따라 TA와 TB의 카운터를 써서 시간을 계산하였다. 이 카운터는 Es의 상태에 따라 두 개로 나뉘게 되며 하나의 카운터가 증가하면 다른 카운터는 리셋되고, S상태에 따라 다른 변수에 그 값을 지정함으로서 Ex의 크기를 결정하게 된다. 이렇게 측정된 값들은 두 카운터가 만드는 Ramp 와 S의 상태에 따라 그 값이 결정되는 Ex와의 비교로서 다음의 S를 결정하게 되고, 이는 AD664를 통해 인버터의 스위칭드라이버에 전달된다. 보조 스위칭은 Ramp 값에서 일정한 값을 빼고 Ex와 비교함으로서 주스위치 S가 on, off 되기전에 보조스위치를 on시킬 수 있다. 또한 보조스위치는 S가 0인 루프에서 다시 리셋함으로서 인버터가 ZVT로 동작할 수 있게 한다.

4. 시뮬레이션 및 실험파형

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

그림 7과 그림 8은 ZVT-PRT인버터의 시뮬레이션파형과 인덕터 전류의 주파수 스펙트럼으로 PRT 기법을 사용함으로써 고조파 저감 및 스위칭 주파수가 고정됨을 알 수 있다.

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}	20μH
f_{sw}^*	10KHz	C_r	0.015μF

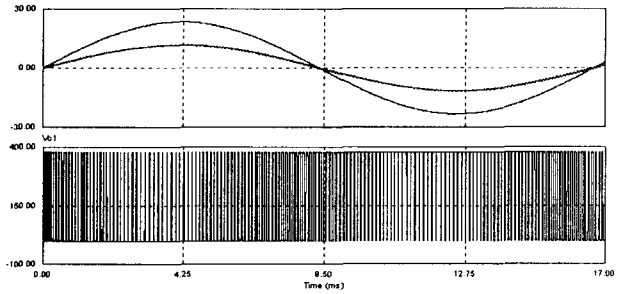

그림 7 시뮬레이션의 전압 및 전류 파형

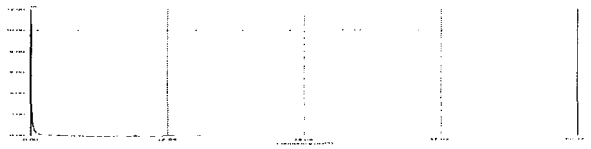

그림 8 전류 스펙트럼

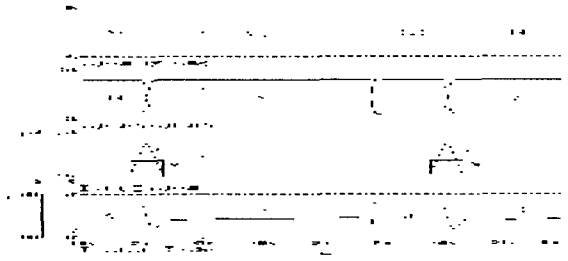

그림 9. 인버터의 ZVT 스위칭 동작 파형

그림 9는 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 스위칭됨을 알 수 있다. 이상과 같이 PRT 전류 제어알고리즘을 적용한 ZVT 인버터를 시뮬레이션을 통하여 스위칭 주파수가 고정됨으로서 ZVT스위칭이 가능함을 알 수 있다.

이상 시뮬레이션을 통하여 확인한 제안된 토폴로지의 유용성을 실제실험을 통하여 입증하기 위하여 확인하기 위하여 ZVT 인버터를 제작하여 실험하였다.

그림 11은 입력교류전압과 인버터의 전압 및 전류의 출력 파형이다.

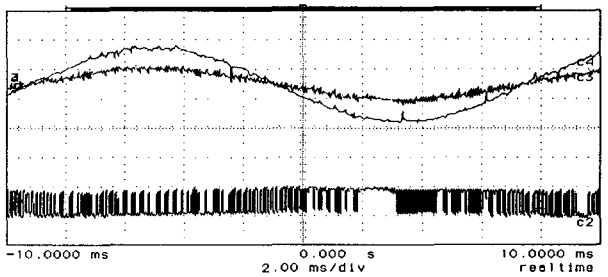

그림 10. 인버터의 전압 및 전류 실험 파형

5. 결 론

본 논문에서는 인버터를 고효율화 하기위한 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있는 PRT알고리즘을 PSIM과 PSpice를 이용한 시뮬레이션과 DSP로 구현하였다. 이 실험을 통하여 다음을 알 수 있었다.

PRT알고리즘으로 구현한 인버터의 스위칭 주기를 예측함으로 ZVT 조건으로 인버터가 운용되며 이는 스위칭 손실의 감소함을 알 수 있었다. 이로서 인버터의 효율을 향상시킬 수 있었다.

또한 시스템의 제어부를 복잡한 아날로그회로를 DSP를 이용한 디지털회로 구현함으로써 신뢰성을 향상시킬 수 있으며 소프트웨어의 설정치를 변경함으로서 시스템의 유연성을 확인할 수 있었다.

이 논문은 2002년도 군산대학교 두뇌한국21 사업에 의하여 일부 지원되었슴.

참 고 문 헌

[1] L. J Borle and C. V. Nayar, " Zero Average Current Error" Controlled Power Flow for AC-DC Power Electronics, Nov 1995.Texas Instruments,

[2] D. M. Baker, V. G Agelidis and C. V. Nayar, "A NEW Zero Average Current Error Control Algorithm for Inverter". Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC) 1997 with Institution of Engineers Australia Electronic Energy Conference(EECON)1997, vol. 1, PP67-72.

[3] 이성룡, 고성훈, 송인석 "유도전동기 구동용 다이오드 브릿지-타입 ZVT인버터" 전력전자학회 논문지 Vol.4 No6, P561-569 1999년 12월.

[4] 이성룡, 고성훈, 김성우 "ZVT 스위칭되는 새로운 전류제어형 인버터" 전력전자학회 논문지 Vol.7 No2 P129-136 2002 4월.