

ZVT 스위칭 되는 새로운 전류제어형 인버터

이 성룡, 고 성훈, 김 성우*
 군산대학교 전자정보공학부

A New Current Controlled Inverter with ZVT Switching

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

School of Electronic and Information Engineering, Kunsan National University

ABSTRACT

In this paper, the proposed current control algorithm is analyzed and discussed about how to design the auxiliary circuit with auxiliary switch which can apply ZVT operation for the main switch.

The simulation 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

최근 산업이 다양화하고 복잡해짐에 따라 전력계통의 안정 및 고품질화에 대한 요구가 증대되기 시작하였다. 또한 전 세계적으로 지구환경 변화에 대응하기 위하여 깨끗한 대체에너지원 개발에 관심을 집중하고 있으며 여러 종류의 대체 에너지원 중에서 태양광 발전방식은 가장 실용화에 가까운 발전방식으로 주목받고 있다. 이에 따라 향상된 전력 변환 기술과 대체에너지원을 이용하여 계통을 제어하기 위한 계통연계형 시스템에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 계통 연계형 시스템은 크게 UPS(Uninterruptible Power Supply), Power Conditioner 그리고 DSM(Demand Side Management)으로 나누어지며, 이들 계통연계 시스템은 양방향 제어가 가능한 전류제어형 인버터가 필요하다.

이러한 인버터의 대표적인 전류제어 방식으로 Hysteresis Current Control기법이 있는데, 이는 계통과 부하 변동에 따라 스위칭 주파수가 아주 민감하게 변동하기 때문에 스위칭소자 사용에 한계가 있고, 출력 필터 설계의 어려움 등의 단점이 있다. 이를 개선하기 위하여 최근에 Digital Current

Mode Control, Sliding Mode Control 등의 알고리즘이 제안되었는데 이들은 각각 전류추정과 이의 디지털처리과정에서 생기는 스위칭 지연에 의하여 위상지연이 생기거나 시스템 안정성을 확보하기 위한 mathematical approach 때문에 연산시간 확보 등의 어려움을 해결해야만 한다.

한편, 온라인 UPS 또는 Power conditioner의 경우 계통의 상태에 상관없이 상시 운전해야 하기 때문에 인버터의 효율은 매우 중요하며, 또한 DSM의 경우는 분산전원으로 대체에너지를 사용하고 있는데, 에너지 변환효율이 극히 낮기 때문에 이 경우의 인버터 효율은 전체 시스템 효율향상에 필수 조건이다. 그러나, 지금까지 제시된 전류제어 기법 중 가장 간단하고 안정성이 뛰어나서 주로 사용되는 Hysteresis current control기법은 스위칭 시간을 예측할 수 없기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용하기가 매우 어렵다.

그러므로, 본 논문에서는 계통연계시스템을 고효율화·고 기능화하기 위해서 필요한 전류제어형 인버터를 속응성을 가지면서 고효율화가 가능하도록 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있는 전류제어 기법을 제안한다. 이 전류제어기법은 현재의 ramp time을 다음주기의 그 시간으로 결정하는 알고리즘으로 Hysteresis current control기법의 단점인 가변 스위칭주파수문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 다음 스위칭을 예측할 수 있기 때문에 소프트-스위칭 기법을 적용할 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 제안된 전류제어 알고리즘을 이론적으로 해석하고 ZVT 동작을 위한 보조 공진회로 적정설계방법에 대하여 논의하였다. 또한, PSIM 과 PSpice를 이용한 시뮬레이션을 통하여 주 전력 스위치가 스위칭시 ZVT로 스위칭하며 양방향 인버터로 운전되고 있음을 보임으로써 제안된 전류제어 알고리즘의 유용성을 입증하였다.

2. 전류제어 알고리즘

계통 연계형 시스템에서의 인버터는 UPS 기능이 요구되어지기 때문에 배터리 에너지를 사용해야 하고, 이를 DC Bus측 캐패시터와 연결해야 하기 때문에 VSI(Voltage Source Inverter)를 사용한다.[3] 또한, 무효전력보상 및 고조파 저감 기능을 수행하고, 다목적 시스템으로 운전하기 위해서 전류를 직접제어 할 수 있는 Grid-interactive 기능을 갖는 전류제어형 인버터를 사용해야 한다.

계통연계형 인버터의 전류제어 원리를 해석하기 위하여 등가모형을 그리면 그림 1과 같다.

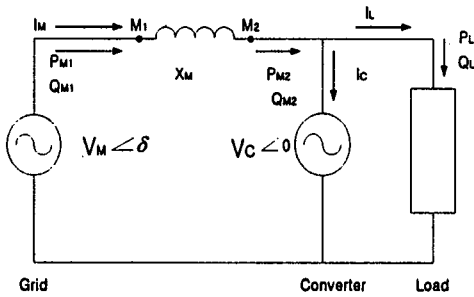


그림 1 계통연계형 인버터의 등가회로

그림에서처럼 Grid의 입력전압은 제어가 불가능하며 단지, 인버터의 리액티브 파워를 제어함으로써 부하변동에 대응하는 계통전력의 제어가 가능하며 그에 따른 전류제어루프를 가지는 인버터 제어 블록선도를 그림 2에 보았다.

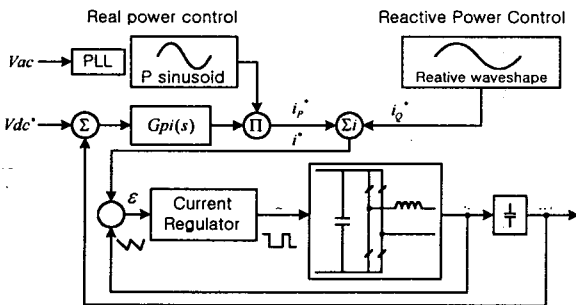


그림 2 전류제어루프를 갖는 인버터 제어 블록선도

전류제어 알고리즘 중 가장 이상적인 방법으로 ZACE (Zero Average Current Error) 기법이 제시되었으며 이를 보완한 많은 알고리즘이 제안되었다.[2] ZACE type의 전류제어기법을 이용한 AC-DC PWM Inverter의 장점으로는 제어가 용이하고, 빠른 응답을 가지며 DC link 전압에 관계없이 독립적으로 AC 전류를 제어할 수 있다. 그러나 스위칭 주파수가 가변 되는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 PRT(Polarized

Ramp Time) current control 기법이 제시되었다.[1]

PRT 기법은 ZACE의 스위칭 주파수를 고정시키기 위해서 발전하였다.

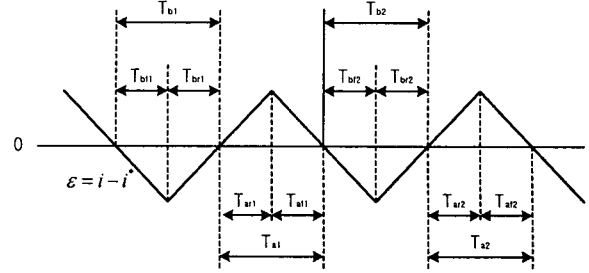


그림 3 Current error Signal

그림 3은 인덕턴스의 전류와 reference와의 error 신호를 보여준다. 그림 4에서 T_a는 i_e가 zero 보다 위에 있을 때의 주기를 나타내고 T_b는 i_e가 zero보다 아래쪽에 있을 때의 주기를 나타낸다. 여기서 Zero 위의 면적과 아래의 면적이 같다면 즉, T_a와 T_b가 같다면 식 1과 같이 스위칭 주파수를 고정시킬 수 있다.

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

*: 목표값

PRT 기법의 스위칭은 최근의 Zero crossing에서 일어나는 전류 error 신호에 의하여 결정되며 이를 식 2, 3과 같이 표현할 수 있다.

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

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

^: 측정된 값

#: 계산에 의한 값

PRT 전류제어 알고리즘은 그림 4와 같다.

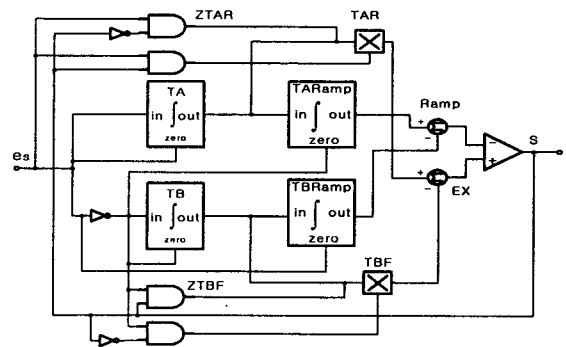


그림 4 PRT 전류제어 알고리즘

그림 4에서 맨 위의 파형은 측정된 리플 인덕터 전류와 reference를 비교하는 파형이고, e_s 는 비교한 error signal ε 이 positive이면 high이고, negative이면 low를 나타내는 binary signal이다. 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 switching signal S를 결정할 수 있다.

전류제어의 모드별 동작 파형은 그림 5와 같다.

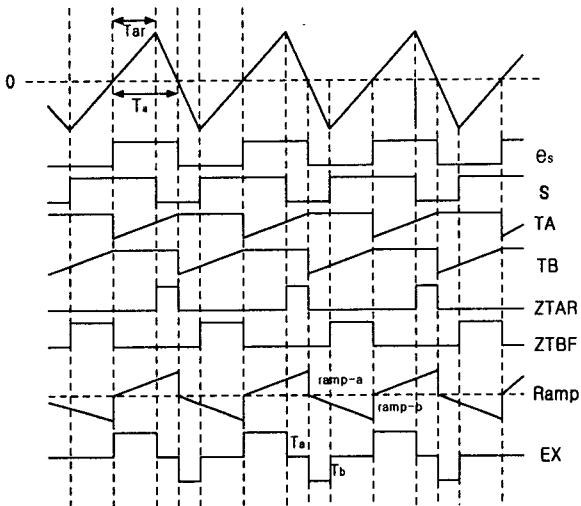


그림 5 PRT 전류제어 동작 파형

3. ZVT 인버터

본 연구의 적용대상이 대체에너지를 이용하는 시스템이기 때문에 전력변환효율이 중요하다. 이를 위해 그림 6과 같은 보조공진 회로를 이용한 ZVT 인버터를 제안하였다.[4]

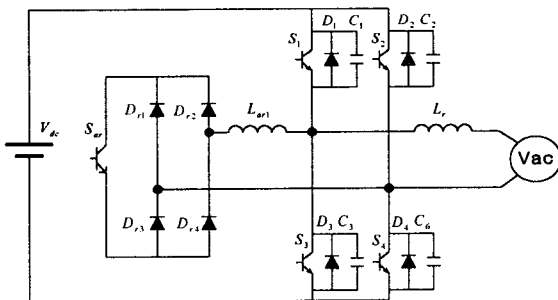


그림 6 제안된 ZVT 인버터

제안된 ZVT 토폴로지는 일반적인 단상 풀브릿지 인버터에 다이오드 브릿지-타입의 보조공진 회로를 출력 단에 연결한 형태로 보조스위치를 하나

만을 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 캐패시터(C_1, C_4 or C_3, C_4)는 데드타임 구간에 공진 하여 주 전력 스위치(S_1, S_4 or S_2, S_3)의 양단간의 전압은 "0" 상태가 되도록 에너지 전환을 하게 되고 그 후 주 전력 스위칭은 ZVT 조건으로 스위칭을 하게 된다.

여기서 주 전력 스위치의 전압은 턴-오프 시 스너버 캐패시터에 의해 dv/dt 가 제한되고, 턴-온 시는 공진 인덕터의 공진 에너지에 의해 dv/dt 가 제한되고, 주 전력 스위치의 전류는 턴-온 시에 공진 인덕터에 의해 di/dt 가 제한됨으로써 효과적으로 ZVT 조건을 만들어 주게 된다.

보조공진회로 설계에 가장 유의할 점은 부하전류에 의해 공진 조건 등의 영향을 받기 때문에 설계와 운전시 부하전류를 고려해야한다. 공진을 위한 스너버 캐패시터와 공진 인덕터는 먼저 부하 전류 범위를 결정하고 이에 따라 적정할 설계를 해야 한다. 또한 공진 구간동안 완전히 에너지 전환을 하기 위해서는 공진용 인덕터의 에너지가 스너버 캐패시터의 에너지보다 충분히 커야 ZVT 조건을 만족할 수 있으며 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{1}{2} L_r I_{toff}^2 \geq C_R (V_s - 2V_{drop})^2 \quad (4)$$

여기서, $I_{toff} = I_{Lr} - I_o$

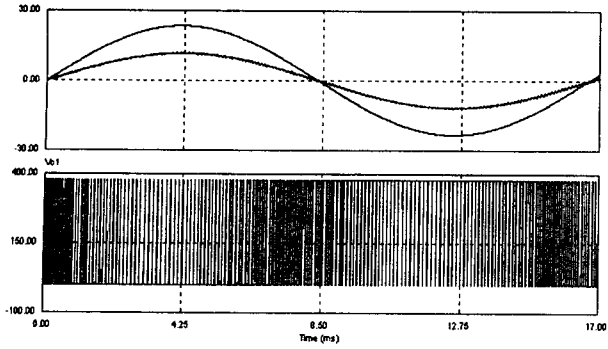
4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

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

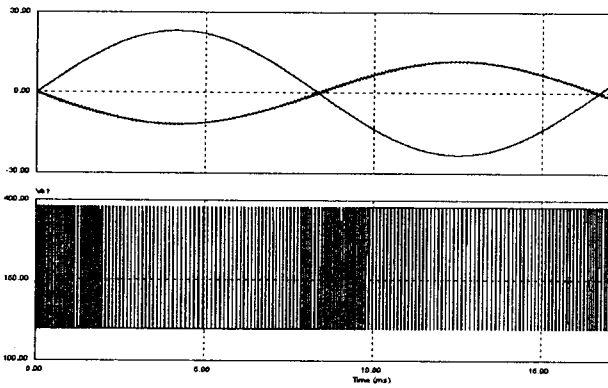
표 1 시뮬레이션 조건

Parameter	Value	Parameter	Value
V_{an}	220V	f_i^*	60Hz
V_{dc}	380V	L_r	20mH
I_a	15A	L_{ar}	20 μ H
f_{sw}^*	20KHz	C_r	0.015 μ F

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



(a) 전압과 전류의 동위상 파형



(b) 전압과 전류의 180도 위상차 파형

그림 7 양방향 인버터 동작 시뮬레이션 파형

그림 7 (a),(b)에서 위 시뮬레이션 파형은 전원전압 V_{an} 과 인버터 출력 단의 리플 인덕터 전류이고 아래 파형은 주 전력 스위치 V_{s1} 의 양단간의 전압이다. 그림 7(a)에서 전압과 전류가 동위상으로 이때는 인버터 모드로 동작하여 부하에 전력을 공급하고 있음을 알 수 있다. 그림(b)에서 전압과 전류가 180도 위상 차를 가짐으로써 이때는 컨버터 모드로 동작하여 배터리 충전을 할 수 있음을 알 수 있다. 또한 위상차와 크기를 조정함으로써 무효 전력을 보상할 수 있음을 알 수 있다. 그림 8은 인덕터 전류의 주파수 스펙트럼으로 PRT 기법을 사용함으로써 고조파 저감 및 스위칭 주파수가 고정됨을 알 수 있다.

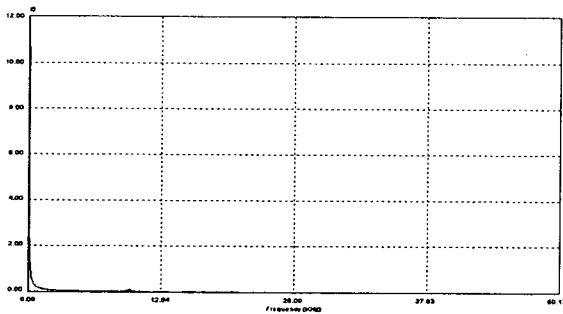


그림 8 Fourier transform current harmonic spectrums

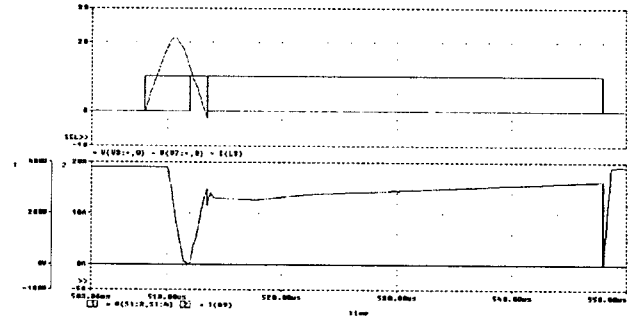


그림 9 제안된 인버터의 ZVT 동작 파형

그림 9는 제안된 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.

5. 결 론

본 논문에서는 새로운 전류 알고리즘을 적용한 ZVT 인버터를 제안하였고, 시뮬레이션 결과를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 양방향 전류제어가 가능함으로써 계통연계형 인버터로 적합함을 알 수 있다.
2. 스위칭 주파수가 고정됨으로써 출력필터설계의 어려움을 해소할 수 있다.
3. ZVT 스위칭의 가능한 전류제어 알고리즘을 제시 함으로써 인버터 효율의 향상이 가능하다.

이상으로 본 연구에서 제안한 전류제어형 ZVT 인버터가 유용함을 확인하였고, ZVT를 위한 보조공진 스위치가 1개만으로 충분하기 때문에 기존의 인버터와 비교하여도 가격경쟁력을 있을 것으로 생각된다.

이 논문은 군산대학교 BK21 사업단의 연구비 지원에 의하여 연구되었습.

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 P. 561~569 1999년 12월.