

보조 스위치를 이용한 3상 ZCS 인버터에 관한 연구

배진용*, 김용*, 백수현*, 최근수*
*동국대학교, **디지아이

A Study on the Three Phase Inverter using Auxiliary Switches

Jin-Yong Bae*, Yong Kim*, Soo-Hyun Baek*, Geun-Soo Choi**
*Dongguk University, **DGI

Abstract - This paper proposes a soft-transition control strategy for a three phase ZCS(Zero Current Switching) inverter circuit. Each phase leg of inverter circuit consists of an LC resonant tank, two main switches, and two auxiliary switches. This paper presents design consideration via a study example of a three phase prototype inverter for motor drives. A simple device tester with zero current switching capability is proposed to select eligible auxiliary switches. The principle of operation, feature and design consideration is illustrated and verified through the experiment with a 2.2kW 5kHz IGBT based experimental circuit.

1. 서 론

본 논문에서는 전기자동차 및 전기철도 등 대용량 구동 시스템에 응용 가능한 3상 ZCS(Zero Current Switching) 인버터에 관하여 논하였다.[1-4] 모터 제어를 위한 인버터 분야(DC-AC)의 경우 속도, 위치 및 토크 특성 개선을 위한 제어가 주로 연구되었으나, 효율 향상에 대한 연구는 미비한 실정이다. 본 연구에서는 기존의 컨버터 분야(DC-DC, AC-DC)에 적용하였던 소프트 스위칭 기법을 인버터 분야(DC-AC)에 적용하여 유도 전동기 구동을 위한 인버터 시스템의 효율 향상을 도모하고자 한다.[1-8] 인버터 시스템에 주로 이용되는 IGBT는 턴오프시 꼬리(tail)전류가 생기는 문제로 인하여 스위칭 주파수의 제한, 턴오프 손실의 증대 및 전체 시스템 효율 감소라는 문제가 발생되었다. 제안된 ZCS 인버터는 보조 스위치와 공진 회로를 이용하여 주 스위치의 영전류 턴오프 스위칭(ZCS)을 통하여 꼬리(tail)전류의 제거 및 인버터 시스템의 효율 향상을 할 수 있다.[1-4]

본 논문에서는 제안된 인버터의 동작원리, 해석 및 특성에 대하여 논하였으며, 고성능 마이크로프로세서인 DSPchip(TMS320F240)을 사용하여 입력 DC 150V, 출력 3HP(2.2kW) 2극 모터 구동을 위한 인버터 시스템을 제작 및 실험하였다.

2. 본 론

2.1 제안된 ZCS 인버터

일반적으로 3상 AC모터의 구동을 위한 인버터는 DC 전압을 입력으로 사용하며, 6개의 스위치로 구성되어 있다. 제안된 3상 인버터는 6개의 스위치와 6개의 보조 스위치, 그리고 LC 공진 소자들로 구성되어 있다. 그림 1은 제안된 3상 ZCS 인버터 회로를 나타낸다.[1-2]

2.2 제안된 ZCS 인버터의 모드별 동작해석

그림 2는 제안된 ZCS 인버터의 한상에 대한 레그(leg) 회로를 나타내며, 그림 3과 그림 4는 ZCS 인버터의 모드별 동작 파형과 등가 회로를 나타낸다.[1-2]

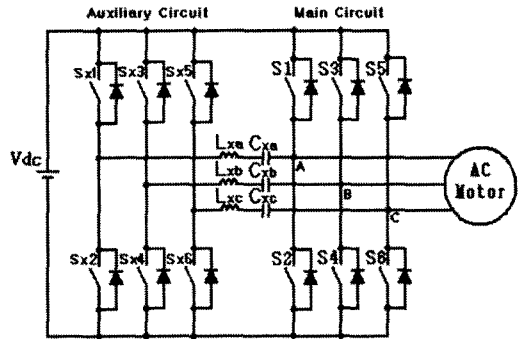


그림 1. 제안된 3상 ZCS 인버터 회로

모드별 정상상태 해석을 위해서 다음과 같이 가정한다.

- 1) 모든 소자는 이상적이다.
- 2) 스위치 양단의 전압 리플은 무시한다.
- 3) 부하측의 인덕터는 공진 인덕터보다 충분히 커서 스위칭 구간내에서 일정 전류원으로 가정한다.
- 4) 입력 전원을 스위칭 구간내에서 일정 전압원으로 가정한다.

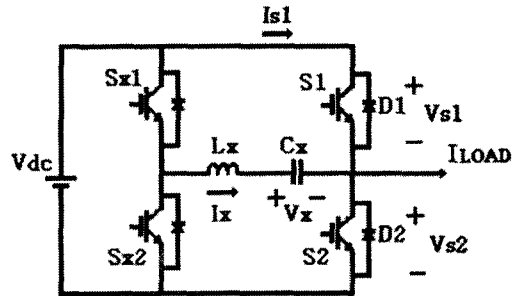


그림 2. 제안된 ZCS 인버터 한상에 대한 레그(leg) 회로

1) 모드 I : $t_0 \leq t \leq t_1$
모드 I는 주 스위치 S1과 S2의 데드타임으로 보조 스위치 Sx1만 턴온하는 구간이다. 이 구간동안 보조 회로는 동작하지 않으며, 전류는 주 스위치 S1의 역병렬 다이오드를 통하여 전원으로 환류되고 있다.

2) 모드 II : $t_1 \leq t \leq t_2$
보조 스위치 Sx1이 턴온된 상태에서 주 스위치 S2가 턴온되면, 보조 회로는 공진을 일으키기 시작하며, $t=t_2$ 의 시간에서 I_x 는 최대이고, 스위치 S1의 역병렬 다이오드 D1에 흐르는 전류는 0으로 된다. 이 구간에서 주 스위치 S2에 흐르는 전류는 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$I_x = V_{dc} \sqrt{\frac{C_x}{L_x}} \sin(\omega_1 t) \quad (1)$$

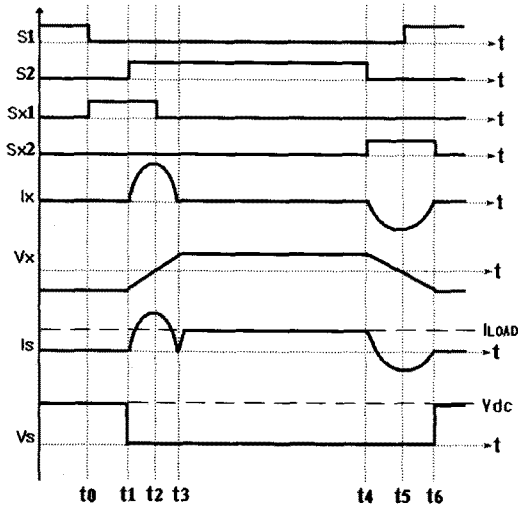
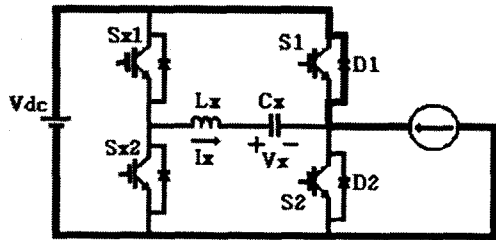
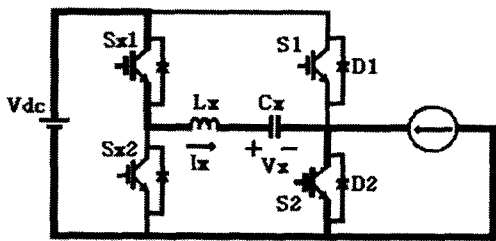


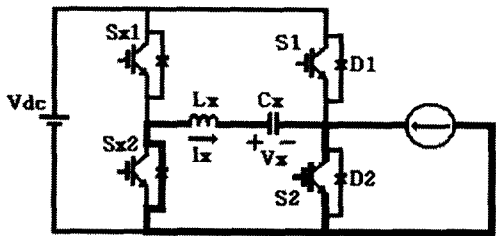
그림 3. 제안된 ZCS 인버터의 이론적인 동작파형



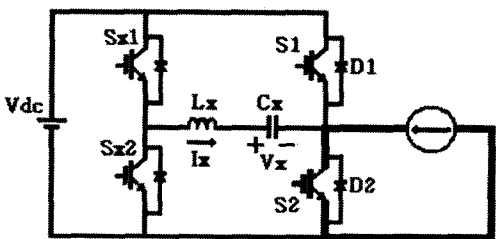
MODE I ($t_0 \sim t_1$)



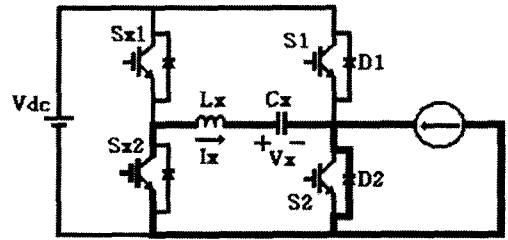
MODE II ($t_1 \sim t_2$)



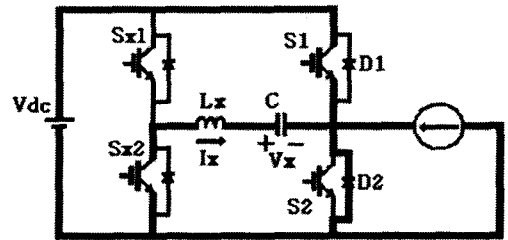
MODE III ($t_2 \sim t_3$)



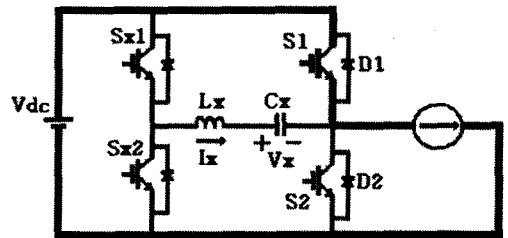
MODE IV ($t_3 \sim t_4$)



MODE V ($t_4 \sim t_5$)



MODE VI ($t_5 \sim t_6$)



AFTER MODE VI ($t_6 \sim$)

그림 4. 제안된 회로의 모드별 동작

여기서, $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_x C_x}}$

3) 모드 III : $t_2 \leq t \leq t_3$

보조 회로의 공진 전류가 보조 스위치 Sx2의 역병렬 다이오드를 통하여 흐르는 구간이며, $t=t_3$ 에서 공진이 완료되면 이 모드는 종료된다. 이 모드에서 주 스위치 전류는 공진을 일으킨다.

4) 모드 IV : $t_3 \leq t \leq t_4$

모드 III에서 V_x 가 입력전압 V_{dc} 와 같아지면, 보조 스위치 Sx2의 역병렬 다이오드는 자연스럽게 턴오프하며, 주 스위치 S2를 통하여 부하에 전력이 공급되는 구간이다.

5) 모드 V : $t_4 \leq t \leq t_5$

주 스위치 S2가 턴오프되면서 동시에 보조 스위치 Sx2가 턴온되는 모드이다. 이 구간에서 공진회로를 통하여 C_x 는 방전되는 구간이며, 주 스위치의 역병렬 다이오드 D2는 도통하게 되고, 동시에 주스위치는 영전류(ZCS) 턴오프 한다. 기존의 인버터에서는 IGBT의 꼬리(tail)전류에 의한 손실이 크게 문제가 되지만, 제안된 인버터는 보조 회로의 공진을 이용함으로써 이러한 문제점을 해결하여 효율 향상을 도모 할 수 있다.

보조 회로를 통해서 주 스위치 S2에 흐르는 전류는 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$I_x = V_{dc} \left\{ 1 - \sqrt{\frac{C_x}{L_x}} \sin(\omega_1 t) \right\} \quad (2)$$

여기서, $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_x C_x}}$

6) 모드 VI : $t_5 \leq t \leq t_6$

모드 V에서 주 스위치 S1이 턴온되면, 주 스위치 S1과 보조 스위치 S2를 통하여, 공진 인덕터 L_x , 공진 커패시터 C_x 는 계속적으로 공진을 일으키는 구간이다. $t=t_5$ 의 시간에서 I_x 는 최대이고, 스위치 S2의 역병렬 다이오드 D1에 흐르는 전류는 줄어든다.

7) 모드 VI 이후

공진 커패시터 전압 V_x 와 입력전압 V_{dc} 가 같아지면 보조 회로에 전력의 흐름이 없으며, 전류는 주 스위치 S1을 통하여 부하에 전력을 공급된다.

2.3 설계시 고려사항

제안된 3상 ZCS 인버터에서 공진소자(L_x, C_x)의 적절한 선정은 필수적이며, 공진회로의 임피던스와 공진주기를 통하여 결정한다.[1-2]

공진회로의 임피던스 Z_0 는 식(3)으로 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_x}{C_x}} \quad (3)$$

공진 주기 T_0 는 식(4)와 같다.

$$T_0 = 2\pi\sqrt{L_x C_x} \quad (4)$$

출력 전류의 최대치 I_{max} 와 공진 전류 I_{xpk} 의 최대치의 비를 K 라고 정의하며, 식(5)로 나타낼 수 있다.[1-2]

$$K = \frac{I_{xpk}}{I_{max}} \quad (5)$$

따라서 K 의 크기를 고려하여 식(3)을 식(6)으로 나타낼 수 있다.

$$Z_0 = \frac{V_{dc}}{K \times I_{max}} \quad (6)$$

식(6)을 통하여 공진소자(L_x, C_x)의 설계는 식(7), (8)로 나타낼 수 있다.[1-2]

$$L_x = Z_0 \frac{T_0}{2\pi} \quad (7)$$

$$C_x = \frac{L_x}{Z_0^2} \quad (8)$$

제안된 인버터는 5kHz의 스위칭 주파수를 지니며, IGBT의 소자 정격을 고려하여 $K = 1.1 \sim 1.3$, $T_0 = 3 \sim 8[\mu s]$ 으로 설계하였다. 위의 설계 조건을 고려하여 $L_x = 25[\mu H]$, $C_x = 47[nF]$ 으로 선정하였다.

2.4 실험 결과 및 효율비교

제안된 방식의 타당성을 검증하기 위해 2.2kW 범용 유도전동기 구동을 위한 인버터 시스템을 제작하여 실험하였다. 표 1은 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터 값을 나타낸다.

그림 5는 제안된 ZCS PWM 인버터의 주 게이트 신호와 보조 게이트 신호 파형을 나타내며, 보조 게이트 신호는 3 μs 이며, 주 게이트 신호와 동기화 되어서 발생함을 알 수 있다. 그림 6, 7은 기존의 PWM 인버터의 주 스위치 전압·전류 파형을 나타내며, 기존의 인버터 시스템에서는 턴온·오프시 스위칭 손실이 발생함을 알 수 있다. 그림 8, 9는 제안된 ZCS PWM 인버터의 주 스위치 전압·전류 파형을 나타낸다.

표 1. 하드웨어 제작에 사용된 소자와 회로 파라미터

입력전압 (V_{dc})	DC 150 V
주 스위치 (S)	FM2G50US60, FAIRCHILD IGBT, 600V/ 50A
보조 스위치 (S_x)	FM2G50US60, FAIRCHILD IGBT, 600V/ 50A
공진 커패시터 (C_x)	47 nF
공진 인덕터 (L_x)	25 μ H
입력단 커패시터 (C_{in})	1880 μ F
유도전동기	2.2kW, 2극, 3588rpm
DSP	TMS320F240
제어방식	SPWM
스위칭 주파수 (f)	5 kHz

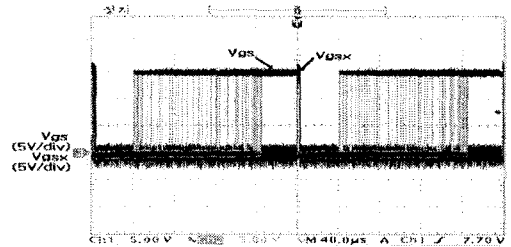


그림 5. 주 게이트 신호와 보조 게이트 신호 파형

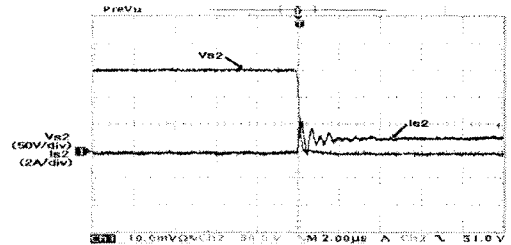


그림 6. 기존의 인버터의 주 스위치 턴온시 전압·전류 파형

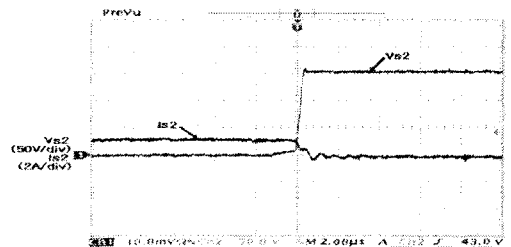


그림 7. 기존의 인버터의 주 스위치 턴오프시 전압·전류 파형

그림 8에서 주 스위치는 하드 턴온하며, 보조 회로의 LC 공진소자에 의해 턴온시 공진 전류가 발생하나 입력단 커패시터 C_{in} 의 전압 변동에 의해서 공진전류가 약간 찌그러지는 현상이 발생함을 알 수 있다. 그림 9에서는 주 스위치 턴오프시 전압·전류 파형으로, 안정적인 영전류 스위칭(ZCS)이 일어남으로 턴 오프시 꼬리(tail)전류 저감 및 전체 시스템의 효율 개선을 이룰 수 있다.

그림 10은 제안된 인버터의 주 스위치 전압 전류 파형을 나타내며, 스위치 온·오프시 공진을 이용함을 알 수 있다. 그림 11은 제안된 인버터 보조 스위치의 전압·전류 파형으로 보조 스위치는 주 스위치의 소프트스위칭을 일으키는 주된 역할을 하게됨을 알 수 있다. 그림 12는 공진 커패시터 전압 및 공진 인덕터 전류 파형을 나타내며, 공진 커패시터의 충·방전 전압의 크기는 입력 전압

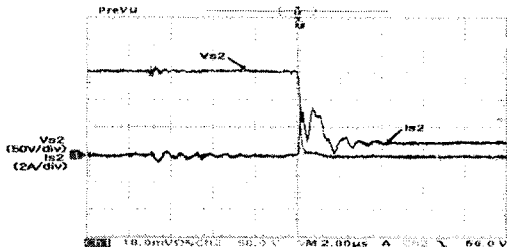


그림 8. 제안된 인버터의 주 스위치 턴온시 전압·전류 파형

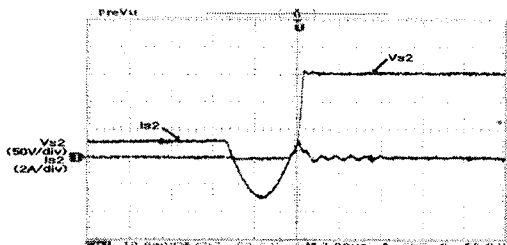


그림 9. 제안된 인버터의 주 스위치 턴오프시 전압·전류 파형

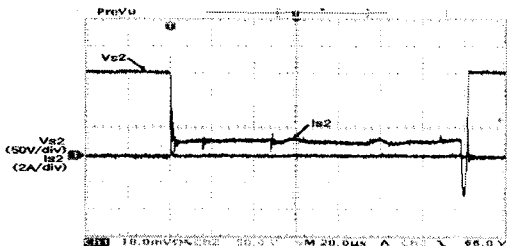


그림 10. 제안된 인버터의 주스위치 전압·전류 파형

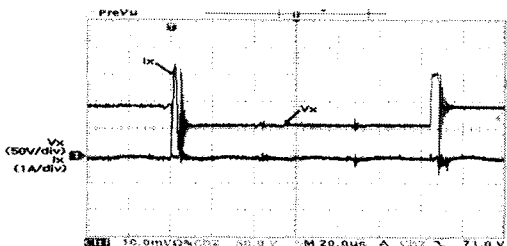


그림 11. 제안된 인버터의 보조 스위치 전압·전류 파형

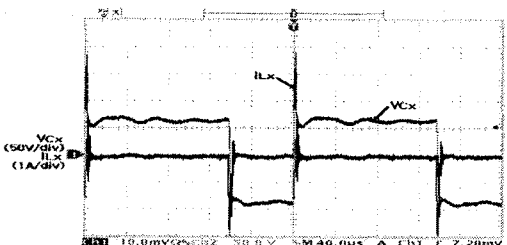


그림 12. 공진 커패시터 전압 및 공진 인덕터 전류 파형

과 같음을 알 수 있다.

그림 13은 기존의 하드 스위칭 인버터와 ZCS PWM 인버터에 대해 효율을 비교한 결과로, 부하 토크는 Magtrol사 DSP6000을 사용하며, 효율측정은 Voltech사 전력 분석계 PM3000A로 인버터 입·출력 전압 및 전류를 실측하여 계산한 결과로서, 2500rpm에 대하여 각각 효율 측정을 하였다. 제안된 ZCS 인버터는 기존의 방식에 비하여 전부하 범위에 걸쳐서 비교적 우수한 효율

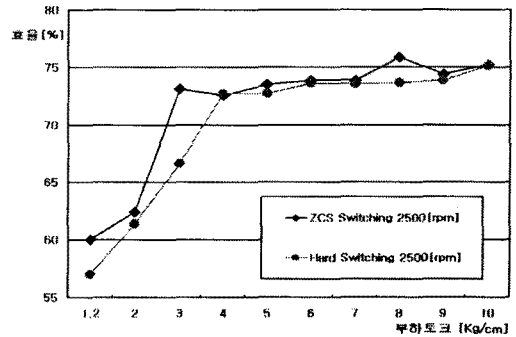


그림 13. 각 방식에 대한 효율비교

특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 3상 유도전동기 인버터 시스템의 효율 향상을 위해 ZCS 인버터를 제안했다. 제안된 인버터는 각 레그(leg)마다 공진소자와 보조 스위치를 추가한 인버터 구조를 지니며, 스위치 온·오프시 손실을 저감시키기 위하여 보조 스위치 게이트 신호를 주 스위치 게이트 신호와 동기시켜서 스위치 온·오프시 손실의 직접적인 저감을 통하여 3상 인버터 시스템의 효율 향상을 도모하였다. 제안된 시스템은 전기자동차 및 전기철도 등 구동 시스템에 응용 가능하리라 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1]Y. Li, F. C. Lee, J. S. Lai, and D. Boroyevich, "A low-cost three-phase zero-current-transition inverter with three auxiliary switches", in Proc. IEEE-PESC 2000, pp. 527~532.
- [2]Y. Li, F. C. Lee, and D. Boroyevich, " A three-phase soft-transition inverter with a novel control strategy for zero-current and near-zero-voltage switching", IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 16, no. 5, pp. 710~723, March 1999.
- [3]Y. Li, and F. C. Lee, "Three-phase zero-current-transition inverter and rectifiers with three auxiliary switches", U. S. Patent, No. 6337801.
- [4]Y. Li, and F. C. Lee, "A comparative study of a family of zero-current-transition schemes for three-phase inverter applications", in Proc. IEEE APEC 2001, pp. 1158~1164, 2001.
- [5]M. Bellar, T. Wu, A. Tchamdjou, J. Mahdavi, and M. Ehasni, "A review of soft-switched DC-AC converter", IEEE Trans. Ind. Applicat., vol.34-4, pp. 847~860, July/Aug. 1998.
- [6]V. Pickert and C. M. Johnson, "Three-phase soft-switching voltage source converter for motor drives-part I : overview and analysis, "in IEE Proc.-Electr. Power Appt., vol. 146, no. 2, pp. 147~154, March 1999.
- [7]K. Wang, F. C. Lee, G. Hau, and D. Boroyevich, "A comparative study of switching loss of IGBTs under hard-switching, zero-voltage-switching and zero-current-switching conditions", in Proc IEEE-PESC, pp. 1196~1204, 1994.
- [8]A. Kunia, H. Cherradi and D. M. Divan, "Impact of IGBT behavior on design optimization of soft-switching inverter topologies", in Proc. IEEE-IAS Annu. Meeting, pp. 807~813, 1993.