

공진형 인버터의 효율 향상에 관한 연구

조규민*, 유완식**, 김남정**, 김희준***
 유한대학*, 특허청**, 한양대학교***

A Study on Efficiency Improvement of Resonant Inverters

Kyu-Min Cho*, Wan-Sik You**, Nam-Jeung Kim**, Hee-Jun Kim***
 Yuhan College*, KIPO**, Hanyang University***

Abstract - Usually, in many applications, high frequency resonant inverters are used and the ZVS(Zero Voltage Switching) or ZCS(Zero Current Switching) techniques are used to improve the efficiency of resonant inverters.

In this paper, a new switching scheme is proposed to improve the efficiency of resonant inverters which is based on the plan to keep the unity output displacement factor under the variable resonant frequency. The detail algorithm of the proposed switching scheme and the simulation results are presented.

1. 서론

유도가열, 전자식 안정기, 초음파모터 구동전원 등 고주파 교류전원이 필요한 요소에 공진형 인버터가 사용된다. 이들 공진형 인버터의 경우, 출력 주파수에 비례한 스위칭 주파수로 스위칭을 행하기 때문에 스위칭 손실이 전체 시스템의 효율에 큰 영향을 미친다. 따라서 시스템 효율 향상과 스위칭 소자의 스트레스를 줄이기 위하여 하여 ZVS, ZCS 기법이 이용되고 있으며, 또한 인버터 출력 전압의 고조파 발생을 줄이기 위하여 Phase Shift 스위칭 기법이 적용되고 있다. 그리고, 출력 전력을 제어하는데 있어서는 인버터 출력 주파수를 조정하는 PFM(Pulse Frequency Modulation)을 대부분 적용하고 있다.^[1-4]

한편, 공진형 인버터의 경우 인버터 출력단은 공진을 위하여 삽입한 공진 요소 및 부하로 이루어져 있으므로 부하의 상태에 따라 인버터 출력단의 등가 고유 공진 주파수는 변동을 하게 된다. 결국 고유 공진 주파수가 변화하는 시스템의 전력을 주파수 조정으로써 가장 효율적으로 제어하는 방법은 인버터 출력 주파수를 시스템의 고유 공진 주파수에 추종시키는 방법이 된다. 기존의 PFM의 경우에 있어서는 대부분 시스템의 유, 무효전력을 적절히 제어하는 것으로써 부하의 전력 제어를 수행하므로 경우에 따라서는 매우 나쁜 역률로 시스템을 운전하는 경우도 발생한다. 따라서 전체 시스템의 효율 저하를 가져올 수도 있게 된다.

본 연구에서는 공진형 인버터의 효율 향상에 관한 연구로써, 인버터 출력단의 기본파 역률을 항시 1로 운전시키는 방법을 제안하고자 하였다. 이는 결국 인버터 출력 주파수를 항시 시스템의 고유 공진 주파수에 동조시키는 방법으로, 이를 효율 향상의 한 방편으로 고려하고자 한 것이다.

본 논문에서는 직렬 공진의 공진형 인버터의 출력단 전압을 항시 공진 전류의 중앙에서 발생시킴과 동시에 출력 전압의 PWM(Pulse Width Modulation)에 의하여 출력 전력을 제어하는 알고리즘을 제안하고, 스위칭 소자의 온 오프 시간 지연까지도 보상할 수 있는 디지털 하드웨어를 제시하였으며, 모의 실험 결과를 통하여 제안한 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 본론

그림 1에 풀브리지 공진형 인버터를 RLC로 등가화된 부하단과 함께 나타내었다. 일례로써, 유도가열의 경우에는 Work-coil의 인덕턴스와 등가 부하저항은 부하의 위치와 량 및 용융상태에 따라서 가변된다. 따라서 부하의 공진 주파수는 시각에 따라서 변함을 알 수 있다.

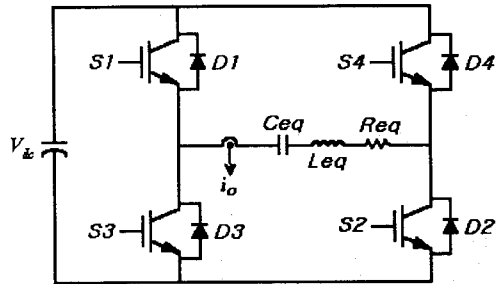


그림 1 풀 브리지 직렬 공진형 인버터

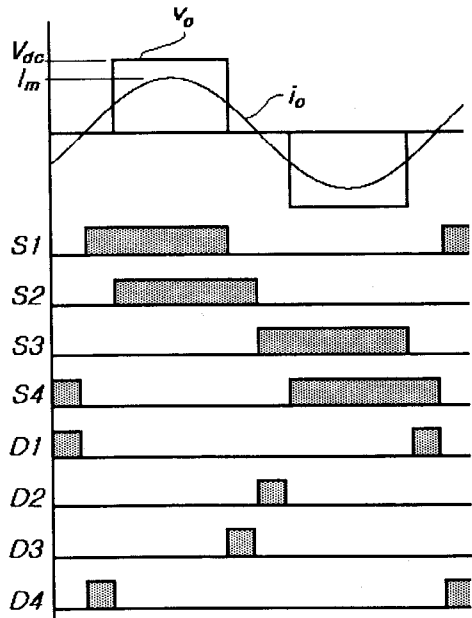


그림 2 스위치 도통구간 및 출력 전압, 전류 파형

본 연구에서는 그림 2에 나타난 것과 같이 출력전압을 출력전류에 동기시켜 부하의 고유공진 주파수를 추종함과 동시에 PWM을 적용하여 인버터 출력을 제어할

수 있는 알고리즘을 제시하고자 하였다.

한편, 그림 2와 같이 스위칭을 행하면 스위치 S_1 , S_3 은 각각 이들과 역병렬로 접속된 D_1 , D_3 가 도통되다가 턴은 되므로 영전류 턴오프를 이룰 수 있으며, 스위치 S_2 와 S_4 는 이들 소자를 통하여 흐르는 전류의 극성이 절 환되어 이들과 역병렬로 접속된 D_2 , D_4 를 통하여 흐르 게 되므로 영전류 턴오프를 이루게 된다. 따라서 스위 칭 손실의 발생도 억제됨을 알 수 있다.

이제, 출력 전류의 반 주기를 샘플링 구간 T_s 라 하 고, 듀티에 해당하는 반주기간의 전압 출력 구간을 T_d 이라 하면 PWM 듀티 D 는 식 (1)로 표시된다.

$$D = \frac{T_d}{T_s} \quad (1)$$

식 (1)을 사용하여 출력 전압 v_o 의 기본파분 실효치 V_1 을 나타내면 다음과 같다.

$$V_1 = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} DV_{dc} \quad (2)$$

이 때, V_{dc} 는 인버터의 직류단 전압이다.

한편, 그림 2에서와 같이 출력 전류 i_o 를 정현파로 가 정하여 이의 최대치 I_m 을 사용하여 인버터 출력단의 유효전력 P 를 구하면 식 (3)과 같다.

$$P = \frac{2}{\pi} V_{dc} I_m D \quad (3)$$

식 (3)으로부터 출력 전류의 최대값에 따라서 듀티 D 의 가변하면 부하의 출력 전력의 제어가 가능함을 알 수 있다.

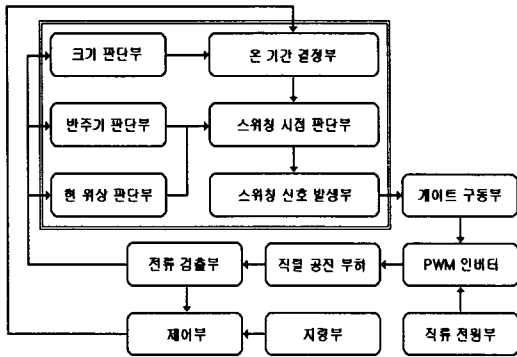


그림 3 시스템 제어 블록도

그림 3에 전체 시스템 제어 블록도를 나타내었다. 그림 2에 제시한 바와 같이 스위칭을 행하기 위하여는 출력 전압의 듀티 뿐만이 아니라 출력 전류의 주기, 위상 및 크기에 대한 검출이 필수적이다. 따라서 출력전류를 검출하는 전류검출부와 이로부터 출력전류의 주기, 위상 및 크기를 판단하고, 제어부에서 입력된 제어입력의 크기에 따라서 출력 전압의 듀티를 결정한다 다음 각 스위칭 소자의 온 오프 시점을 결정하여 스위칭 신호를 발생하도록 구성이 되어 있다. 비교기와 선형 연산 회로를 이용하여서도 그 구현이 가능하나, 출력 주파수가 높을 경우 스위칭 소자의 온오프 지연 시간이나 연산시간 지연 등을 보상할 수는 없다. 이를 위하여는 프로세서를 사용하면 되나, 출력 주파수가 수십 kHz 이상일 경우에는 DSP급의 고속 프로세서가 소요되어 비 경제적이 된다. 따라서 본 논문에서는 전류 영점을 검출하는 부분에는 선형 비교기를 사용하고, 그 이외의 요소는 모두 카운터 등의 디스크리트 디지털 하드웨어를 사용하여 이를 구현하는 방법을 제안한다.

먼저, 그림 4에 본 논문에서 제안하는 하드웨어의 블럭도를 나타 내었다. 하드웨어 알고리즘의 원리를 간단 하게 기술하기 위하여 모든 상황을 이상적인 것으로 가

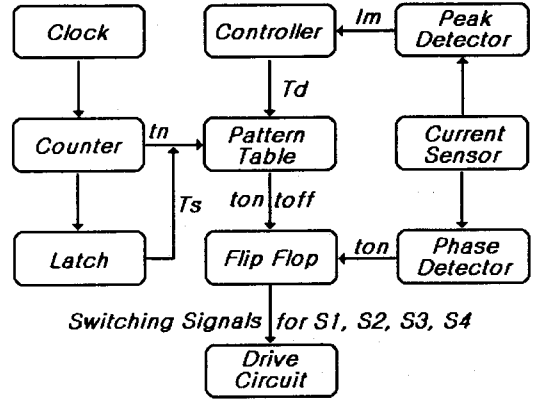


그림 4 제안 하드웨어 블록도

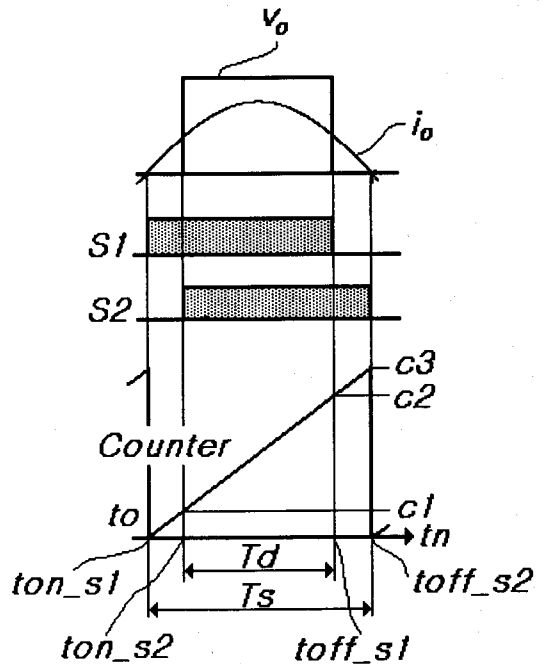


그림 5 스위칭 신호 발생 타이밍도

정하고, 그림 5에 나타낸 것과 같이 양의 반주기간의 스위칭 신호 발생 타이밍도를 참고하여 스위치 S_1 , S_2 의 스위칭 신호를 발생하는 방법을 순차적으로 기술하면 다음과 같다..

- 스위치 S_1 의 턴온 시점 t_{on1} 의 결정

스위치 S_1 은 출력전류가 양으로 절환되는 시점에서 턴온 되어야하므로 영점 비교기로 구성되는 위상 검출기의 신호에 동기시켜 스위치 S_1 의 스위칭 신호용 플립플롭 플립플롭을 세트시킨다.

- 스위치 S_2 의 턴온 시점 t_{on2} 의 결정

매 반주기마다 리셋되는 카운터의 최대값을 래치하여 반주기 T_s 를 구하고, 제어기로부터 결정된 출력 전압의 온 듀티에 해당하는 기간 T_d 로부터 스위치 S_2 의 턴온 시점 t_{on2} 은 식 (4)와 같이 계산된다.

$$t_{on2} = \frac{T_s - T_d}{2} \quad (4)$$

이 시점을 오프라인으로 계산하여 패턴 테이블에 기록하여 두고 이 패턴 테이블을 현 전류의 위상에 해당하는 카운터의 값으로 읽어 $t_n = t_{on2}$ 인 시점에서 스위치 S_2 의 스위칭 신호용 플립플롭을 세트시킨다.

- 스위치 S_1 의 턴오프 시점 t_{off1} 의 결정

스위치 S_2 의 턴온 시점 t_{on2} 의 결정과 동일한 방법으로 식 (5)를 이용하여 $t_n = t_{off1}$ 인 시점에서 스위치 S_1 의 스위칭 신호용 플립플롭을 리세트시킨다.

$$t_{off1} = \frac{T_s + T_d}{2} \quad (5)$$

- 스위치 S_2 의 턴오프 시점 t_{off2} 의 결정

스위치 S_1 의 턴온 시점 t_{on1} 의 결정과 동일한 방법으로, 전류의 극성이 양에서 음으로 바뀌는 순간 스위치 S_2 의 스위칭 신호용 플립플롭을 리세트시킨다.

음의 반주기에 있어서도 상기와 동일한 방법으로 스위치 S_3 , S_4 의 스위칭 신호를 얻어 낼 수 있다. 그러나 실제 구현에 있어서는 플립플롭을 사용하지 않고 모든 스위치들의 스위칭 신호자체를 패턴 테이블에 저장해 두고 이를 카운터에 의하여 스캐닝하면 그대로를 스위칭 신호로 사용할 수 있다.

그림 6에 이를 구현한 실제 제어회로의 일례를 나타내었다. 주기, 듀티, 현위상에 의하여 스위칭 신호 패턴 테이블을 스캐닝할 수 있도록 설계된 것이다. 전체 제어회로의 타이밍을 제어하는 논리 회로가 부가되어 있으며 이들의 지연 요소 및 스위칭 소자의 온오프 지연 시간등을 고려하여 패턴 테이블을 작성하면 이들을 보상할 수 있다.

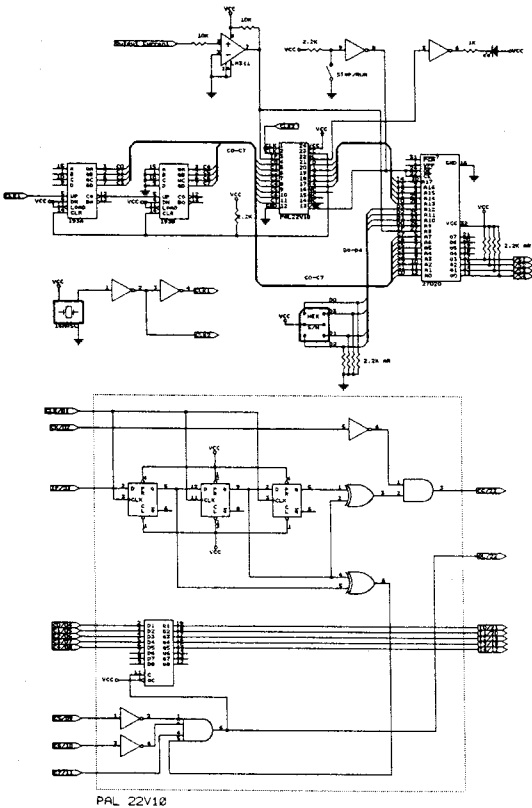


그림 6 구현 회로 일례

또한 그림 6에서는 카운터 IC를 사용하였으나 큰 용량의 PLD(Programmable Logic Device)소자를 이용하면 스위칭 신호 발생부의 전체 하드웨어는 비교기 1개와, PLD 소자 1개, 패턴 테이블용 메모리 1개면 모두 구현할 수 있으므로 경제적인 구성이 가능하게 된다.

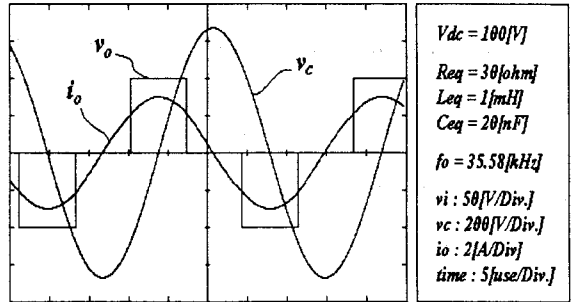


그림 7 모의 실험 결과

그림 7은 본 논문에서 제안한 스위칭 방법을 적용시킨 부하 직렬 공진형 고주파 인버터의 컴퓨터 모의실험 결과로 출력 전압, 전류 파형 및 공진용 캐패시터 양단 전압파형을 보여주는 것이며, 모의실험에 적용한 시스템 주요 정수들은 그림에 나타난 바와 같다. 인버터 출력 전압과 전류의 위상이 완전히 일치되어 동작하고 있음을 확인할 수 있다. 결국 인버터 출력단 기본과 역률을 1로 유지하여 줌으로써 부하의 고유 공진 주파수를 추종할 수 있음을 보여 준다. 그림 7의 경우에 있어서는 인버터 동작 주파수가 약 35.58(kHz)로 계산되었다. 이는 이론적인 고유 공진 주파수와 차이가 없는 것으로 완벽한 공진주파수 추종을 이루고 있는 것으로 평가된다.

3. 결론

본 논문에서는 공진형 인버터의 효율 향상에 대한 연구의 일환으로 고유 공진 주파수 추종 방식의 PWM 제어기를 제안하였다. 인버터 출력단의 기본과 역률을 항상 1로 제어하여 줌에 의하여 부하 상태에 따라서 가변되는 고유 공진 주파수를 추종시키는 알고리즘을 기술하였다. 고주파 무효전력 이외에는 순수 유효전력만을 출력하므로 가장 효율적인 운전을 행할 수 있음과 동시에 소자에 따라서 영전압 스위칭과 영전류 스위칭도 이루어 지므로 효율의 향상의 기대 효과가 큰 것으로 판단된다.

후의 연구과제로써, 제안한 제어기에 의한 실제 적용실험과 전체 시스템 효율 해석등에 관한 연구가 수행될 예정이다.

(참고 문헌)

- [1] J.M. Alonso, M.Rico, C.Bianco and E. Lopez, "A Novel Low-Loss Clamped-Mode LCC Resonant Inverter for HID Lamp Supply", IEEE-PESC Conf. Rec., pp. 736-742, 1995
- [2] L. Grajales, J. A. Sabate and F. C. Lee, "Design of a 10kW, 500kHz Phase-Shifted Controlled Series-Resonant Inverter for Induction Heating", IEEE-IAS Conf. Rec., Vol 2, pp. 843-849, 1993.
- [3] S. Furuya et al., Load-Adaptive Frequency Tracking Control Implementation of Two-Phase Resonant Inverter for Ultrasonic Motor", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 7, No. 3, pp. 542-550, July 1992.
- [4] 권영섭 외, "유도 가열 시스템의 성능과 안정성 향상에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 48-A권 8호, pp. 417-425
- [5] 이선희, "초음파 발생회로의 고효율성과 안정성에 대한 연구", 대한전자공학회 회로 및 시스템연구회/전력전자연구회 합동학술발표회 논문집, pp. 72-78, 1999.