

# 공진회로를 이용한 유도가열용 PWM 사이크로컨버터에 대한 고찰

김 현 중\*, 김 영 석  
인하대학교 전기공학과

## A Consideration of the PWM Cycloconverter with a Resonant Circuit for Induction Heating

Kim Hyun-jung\* and Kim Young-seok  
Dept. of Electrical Eng., INHA Univ.

### Abstract

Cycloconverters can be classified into two types by the main circuit configuration. One is the non-circulating current type required the dead time, the other is circulating current type which has the circulating current reactors. The switching devices were highly stressed by the load voltages during dead time on non-circulating current type operation and the circulating currents on circulating current type operation. To overcome those problems, this paper proposes the switching patterns for the partial and the non circulating current type. The PWM methods, which are saw wave comparing method and load current integrating value comparing method, are presented.

### 1. 서론

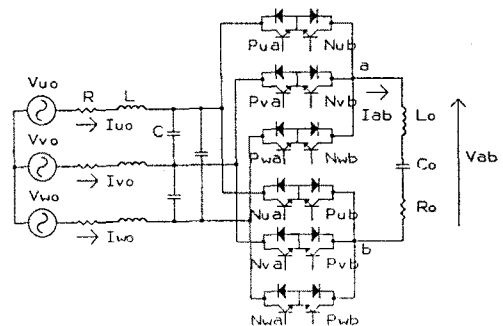
PWM 제어형 사이크로컨버터는 AC-AC 직접변환을 행하는 전력변환기이고 스위칭 리플을 제거하기 위한 입력측의 AC 필터부 이외에는 에너지 축적요소를 가지지 않고 있다. 그러므로 기존의 컨버터-인버터 변환방식에 비해 소형화, 고효율화 등이 가능한 장점을 가지고 있으므로 많은 연구가 행해져 왔다. 그 중에서 PWM 스위칭패턴에 관한 연구는 컨버터-인버터변환신호를 각각 구분하여 발생한 후 다시 합성하는 간접주파수변환방식과 좌표변환을 이용하는 직접주파수 변환방식 두가지의 형태로 행해져 왔으며<sup>[1-4]</sup> 필자들도 유도가열용 사이크로컨버터의 PWM 제어법에 관한 연구를 행한바 있다. 유도가열용 사이크로컨버터 주회로의 구성은 크게 비순환전류형과 순환전류형으로 구분할 수 있으며 그 동작형태에 따라 비순환전류형 동작, 순환전류형 동작 그리고 부분순환전류형 동작으로 구분할 수 있다. 비순환전류형에서는 부하측에 고주파의 공진전류가 흐르고 있으므로 정공컨버터와 부공컨버터가 교대로 고주파의 스위칭을 행하여야 할 필요가 있다. 그러나 출력전류의 극성질환시 주회로 단락의 위험성이 있으므로 휴지기간이 필요하게 된다. 그러므로 본 논문에서는 휴지기간없이 출력전류의 극성질환을 안정하게 시킬 수 있는 스위칭 패턴을 제안한다. 그리고 순환전류형에서는 그 동작원리상 휴지기간없이 안정한 극성질환을 시킬 수 있는 장점을 가지고 있으나 부하전류크기의 약 1/2을 갖는 순환전류성분이 양 컨버터 사이를 흐르므로 소자의 부담이 증가하게 되고 손실도 발생한다. 그러므로 이를 보

완하기 위해 출력전류의 극성질환시에만 순환전류형으로 동작하고 그 이외의 기간에는 비순환전류형으로 동작하는 부분순환전류형을 이용하여 손실을 경감시킬 수 있다.<sup>[5]</sup>

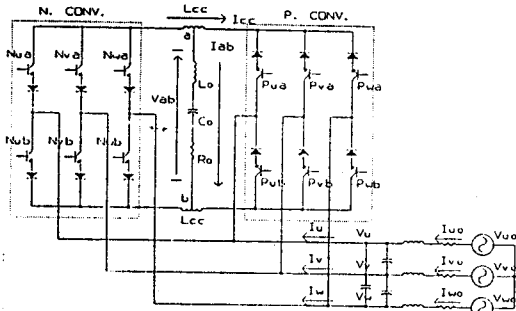
필자들이 이미 보고한 문헌에서 유도가열용 사이크로컨버터를 PWM제어에 의해 입력역률을 1에 가까운 입력역률을 얻을 수 있었다.<sup>[3-6]</sup> 이 PWM신호를 발생하기 위한 방법은 톱니파 비교방식과 부하전류적분치 비교방식이다. 톱니파 비교방식에서는 입력상전압의 크기에 비례하여 스위치의 온 기간을 결정하는 방법으로 그 구현방법이 간단하다는 장점이 있으나 출력측의 공진전류를 직접적으로 고려하지 못하였으므로 입력전류의 찌그러짐이 발생하였다. 이에 반해 부하전류적분치 비교방식은 출력전류를 직접적으로 고려하여 각 상의 스위칭 동작을 행하므로 입력전류를 보다 정현파에 가깝게 제어할 수 있어서 우수한 입력역률을 얻을 수 있다.

### 2. 주회로구성

그림 1에 유도가열용 사이크로컨버터의 주회로 구성을 보인다. 그림 1의 (a)는 비순환전류형의 주회로도이고 그림 1의 (b)는 순환전류형 및 부분순환전류형의 주회로도이다. 입력필터부측은 R, L, C로 구성되어있고 부하측은 유도가열부하  $R_o$ ,  $L_o$ 와 역률개선용 커패시터  $C_o$ 로 구성되어 있다. 순환전류형에서는 부하양단에 순환전류형 리액터  $L_{cc}$ 가 접속되어 순환전류  $I_{cc}$ 를 억제해주는 역할을 하고 있다. 그리고 역전압으로부터 소자를 보호하기 위해 직렬로 FRD를 연결하였다.



(a) 비순환전류형



(b) 순환전류형 및 부분순환전류형  
 그림 1. 유도가열용 사이크로컨버터의 주회로도

3. PWM신호 발생법

기존에 제안한 2상 스위칭방식의 제어함수는 U상의 입력전압이 최대인 모드 1에서 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{ab} = a_1 \times V_{uw} + a_2 \times V_{uv} + a_0 \times V_{uu} \quad (1)$$

이 때  $a_1, a_2$ 는 각 선간전압이 출력하는 시간이고  $a_0$ 는 환류기간이다. 이 기간의 결정으로 사이크로컨버터를 제어하여 입력역률을 제어할 수 있다. 이 제어함수에 의한 PWM신호 발생방법은 다음과 같다.

3-1. 톱니파비교방식

식 (1)로 부터 출력전압  $V_{ab}$ 를 기준으로 제어함수  $a_1, a_2$ 는 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$a_1 = \frac{V_{ab} \times (V_{vw} - V_{wu})}{V_{uv}^2 + V_{vw}^2 + V_{wu}^2} \quad (2)$$

$$a_2 = \frac{V_{ab} \times (V_{uv} - V_{vw})}{V_{uv}^2 + V_{vw}^2 + V_{wu}^2} \quad (3)$$

이 함수에 의해 구현한 PWM신호는 그림2와 같이 얻어진다.

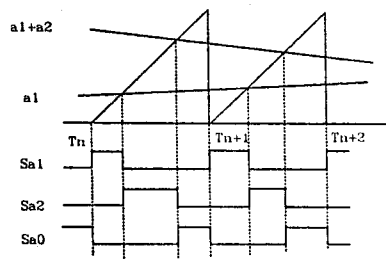


그림 2. 톱니파 비교방식에 의한 PWM신호

그림에서 알 수 있는 바와 같이 톱니파의 기울기에 따라 출력전압이 결정된다. 기울기가 커지면 제어함수  $a_1, a_2$ 기간이 짧아지게 되고 환류동작 시간이 커지게 되어 출력전압평균치는 작아진다. 반대로 기울기가 작아지면 출력전압평균치는 커지게 된다. 그리고 제어함수  $a_1, a_2$ 의 결정에 의하여 샘플링 시간내에서 입력상전압의 크기에 비례하도록 각 상의 스위치의 온 시간을 결정함으로써 입력기

본파력역률을 거의 1에 가깝게 할 수 있었으며 정현파에 가까운 입력전류파형을 얻을 수 있었다. 그러나 부하측에는 정현파의 고주파 공진전류가 흐르기 때문에 입력측에 나타나는 전류는 입력상전압의 크기에 다소 비례하지 못하여 그림 3의 실험결과와 같이 입력전류파형이 찌그러지는 현상이 발생한다.

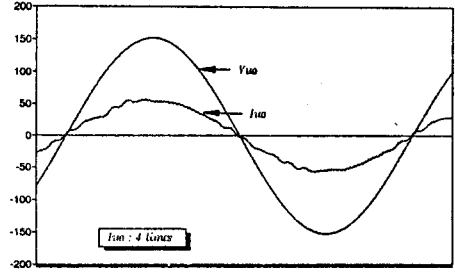


그림 3. 톱니파 비교방식에 의한 입력전류(모의실험결과)

3-2. 부하전류적분치 비교방식

톱니파비교방식에서 발생하는 문제점을 해결하기 위하여 부하전류를 직접적으로 고려하여 매 샘플링 시간내에서 부하전류적분치가 각 상의 입력전류지령치와 일치하도록 스위치의 온 시간을 결정하는 방법을 제안한다.

샘플링 시작점을  $T_n$ 이라 하고 출력공진전류  $i_{ab}$ 의 직분값과 샘플링시간 시작점에서 입력상전압의 크기와 비례 관계에 있는 입력전류지령치  $i_{uo}^*, i_{vo}^*, i_{wo}^*$ 를 이용하여 제어함수를 구하면 다음과 같다.

$$a_1 = \frac{1}{\omega_o} \cos^{-1} \left( 1 + \frac{\omega_o T_s}{I_{ab}} \overline{i_{wo}^*} |_{T_n} \right) \quad (4)$$

$$a_2 = \frac{1}{\omega_o} \cos^{-1} \left( 1 - \frac{\omega_o T_s}{I_{ab}} \overline{i_{uo}^*} |_{T_n} \right) - a_1 \quad (5)$$

( $\omega_o$  : 출력측 주파수,  $T_s$  : 샘플링 주기)

이와 같이 순서적으로 부하전류의 적분치와 입력전류지령치를 각각 비교하여 Sa1신호와 Sa2신호를 출력하고 다음 샘플링이 시작될 때까지 환류동작을 하는 Sa0신호를 발생한다. PWM신호 발생방법은 그림 4와 같다.

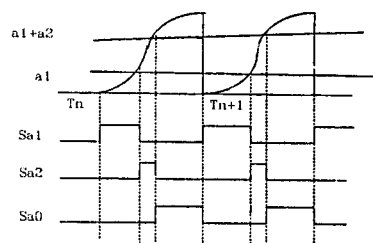


그림 4. 부하전류적분치 비교방식에 의한 PWM신호

이 방법에 의하여 나타난 입력전류는 그림 5와 같다. 그림 3에 보인 톱니파 비교방법보다 각 모드에서 정현파에 가까운 결과를 보이고 있다. 입력전압과 입력전류의 위상이 일치하고 거의 정현파인 입력전류를 보이고 있으므로 우수한 입력역률을 얻을 수 있다.

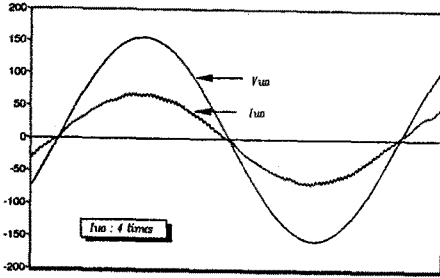


그림 5. 부하전류적분치 비교방식에 의한 입력전류 (모의실험결과)

#### 4. 주회로의 스위칭 패턴

##### 4-1. 비순환전류형 사이크로컨버터

일반적으로 비순환전류형 사이크로컨버터는 회로의 단락위험성이 있으므로 출력전류의 극성전환시 반드시 휴지기간을 가져야 하나 본 사이크로컨버터는 휴지기간동안 부하측의 전압이 소자에 스트레스를 주게 된다. 그러므로 이를 개선하기 위하여 다음과 같은 스위칭 패턴을 제안한다.

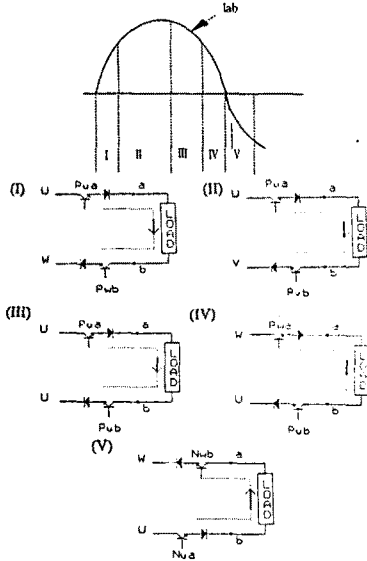


그림 6. 비순환전류형의 출력패턴

그림 6에서 보인바와 같이 [I] [II] [III]모드는 기존의 방법과 마찬가지로 Sa1, Sa2, Sa0신호에 의해 동작을 하나 [IV]모드에서는 다음 샘플링이 시작 모드인 [V]에서 이용되는 스위치들의 반대방향 스위치를 동작시킨다. 이 때 입력전압은 부하에 영향을 미치지 못하고 부하측은 환류동작을 계속적으로 진행한다. 스위치들의 동작지연이 발생하여 다음 [V]모드의 스위치들과 동시에 동작해도 같은 상의 스위치이므로 회로의 단락이 발생하지 않고 안정한 극성전환을 시킬 수 있다. 이와 같은 방법으로 전 모드에 적용하면 휴지기간없이 안정된 극성전환동작을 시킬 수 있다.

##### 4-2. 부분순환전류형 사이크로컨버터

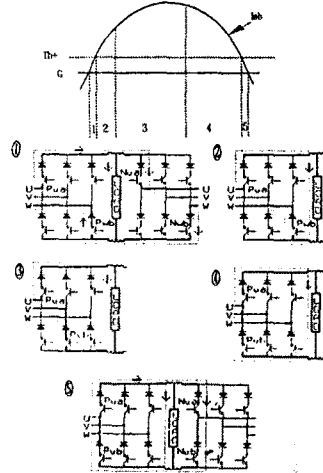


그림 7. 부분순환전류형의 출력패턴

부분순환전류형 사이크로컨버터에서의 동작은 그림 7에서와 같이 부하전류와 임의의 값  $Th+$ 와 비교하여 영점부근에서 모드(1), (5)와 같이 정준컨버터 및 부준컨버터가 동시에 동작하여 순환전류형동작을 행하고 다른 (2),(3),(4) 모드에서는 한쪽 컨버터만이 동작하여 비순환전류형 동작을 행한다.

#### 5. 결론

본 연구에서는 유도가열용 사이크로컨버터의 PWM발생 방법으로 2가지를 제안, 고찰하였으며 시뮬레이션 결과의 비교에 의하여 그 제어성능을 각각 확인하였다. 그 결과에서는 출력전류를 직접적으로 고려한 부하전류적분치 비교방식이 톨니파 비교방식보다 정현파에 가까운 입력전류를 얻으므로 우수한 입력종합역률을 얻을 수 있었다. 그리고 사이크로컨버터의 주회로구성을 각각 고려하여 비순환전류형에서는 휴지기간 없이 연속적인 출력전류파형을 얻을 수 있는 새로운 스위칭패턴을 제안하였으며 부분순환전류형에서는 순환전류로 인한 손실을 최대한 억제할 수 있는 패턴을 보였다. 따라서 본 연구에서 제안한 방법들을 유도 가열용 PWM 사이크로컨버터에 적용하면 우수한 제어성능을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

#### 6. 참고문헌

- [1] A. Ishiguro et al, "A Novel Control Method for Forced Commutated Cycloconverters Using Instantaneous Values of Input Line-to-Line Voltages", IEEE Trans. IE, Vol.38, No.3, pp.166-172 (1991)
- [2] A. R. Daniels et al, "Application of Power Transistor to Polyphase Regenerative Power Converters", IEE Proc., Vol.125, pp.643-649 (1978)
- [3] 김영석 외 1인, "유도가열용 PWM제어형 사이크로컨버터에 관한 연구", 인하대학교 산업과학기술연구소 논문집, Vol. 20, pp.155-161 (1992)
- [4] 김영석 외 1인, "공진회로를 이용한 유도 가열용 부분순환전류형 PWM제어 사이크로컨버터", 대한전기학회논문지, Vol.42, No.10, pp.19-28 (1993)
- [5] R. Pelly, "Thyristor Phase-Controlled Converters and Cycloconverters", Wiley (1970)