

# 단상 AC/DC 병렬 컨버터 제어 알고리즘의 비교, 분석

원준희, 이강희, 김윤호  
 중앙대학교 전기공학과

## Comparison and analysis of control algorithms of single-phase AC/DC parallel converters

June-Hee Won, Kang-Hee Lee, Yoon-Ho Kim  
 Department of electrical engineering, Chung-ang University

### ABSTRACT

In this paper, the algorithm which controls output voltage and power factor independently and the algorithm which controls output voltage with fixed unity power factor are compared and analyzed. These algorithms are applied to single-phase AC/DC parallel converters for a high speed train system. The control characteristic of the algorithms are compared and analyzed with respect to the output voltage and input power factor when system parameters vary.

### 1. 서론

컨버터 제어 방식은 강제 전류가 가능한 GTO와 같은 스위칭 소자의 개발에 힘입어 위상 제어 방식에서 PWM 방식으로 변환되어지고 있다. [1][2] 위상 제어 방식의 단점을 해소할 수 있는 PWM 제어 방식은 단위 역률 제어, 회생 운전의 용이, 입력 전류의 고조파 저감 등의 장점을 지니고 있다.

컨버터 병렬 운전은 용량 증대 뿐만 아니라 적절한 스위칭 위상차에 의한 병렬 운전을 통해 변압기 1차측의 입력 전류에 포함된 고조파를 한층 더 저감시키게 한다. 그리고 변압기 누설 인덕턴스를 승압 인덕턴스로 사용하면 컨버터 시스템의 중량과 크기를 감소시킬 수 있다. [3]

본 논문에서는 단상 AC/DC 병렬 컨버터 제어 알고리즘 중 출력전압과 역률을 독립적으로 제어하는 제어 알고리즘과 단위 역률 설정하에 출력전압을 제어하는 제어 알고리즘 [4]을 비교, 분석하고자 한다. 전자는 입력 전류의 무효분을 센싱하여 이 값이 0이 되도록 제어하여 역률 제어를 하기 때문에 능동적으로 역률 제어를 할 수 있으나 이로 인

해 컨버터 입력단 전압을, 매 주기에 보상해야만 하는 단점을 지니고 있다. 이에 반해 후자는 실시간으로 컨버터 입력단 전압을 보상하여 컨버터 제어를 할 수 있으나 변압기 및 리액터 등 시스템 파라미터의 변화에 따라 제어동작이 영향을 받는 단점을 지니고 있다.

### 2. 병렬 컨버터 구성 및 각 제어 알고리즘의 동작원리

#### 2.1 병렬 컨버터 구성

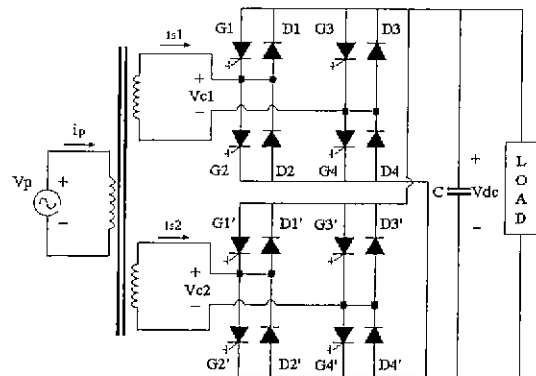


그림 1. 단상 AC/DC 병렬 컨버터 구성

Fig 1. Circuit diagram of single-phase AC/DC parallel converters

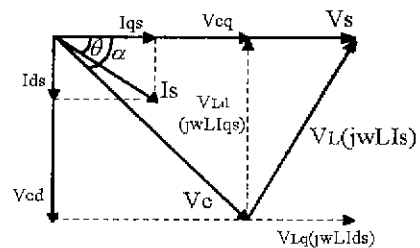
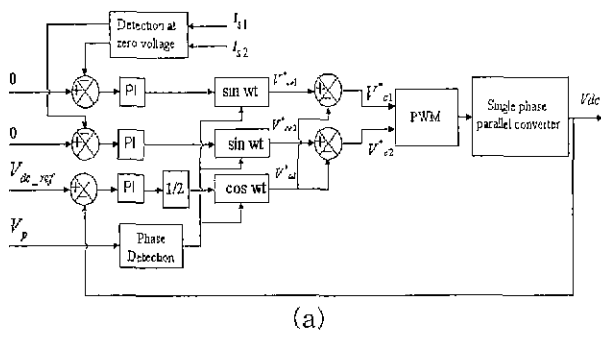
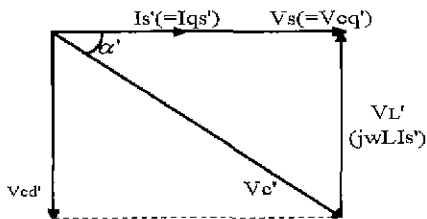


그림 2. 컨버터 입력단 전압의 벡터도

Fig 2. Vector diagram of converter input voltage



(a)



(b)

그림 3. 독립 제어 알고리즘

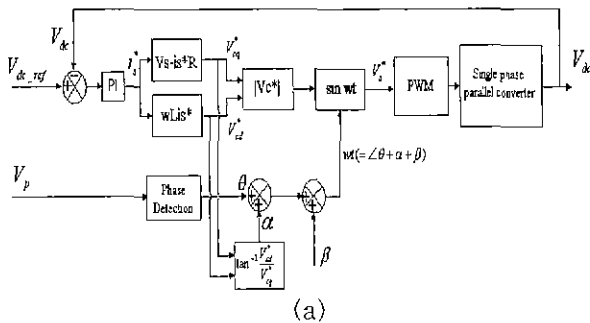
(a) 제어 블록도

(b) 보상된 후의 컨버터 입력단 전압의 벡터도

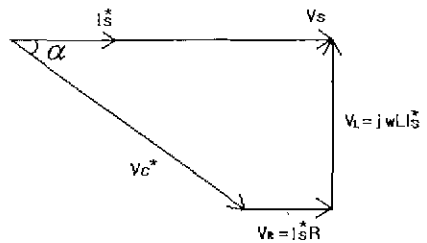
Fig 3. Independent control algorithm

(a) Control block diagram

(b) Vector diagram of converter input voltage after compensation



(a)



(b)

그림 4. 단위 역률 설정 제어 알고리즘

(a) 제어 블록도

(b) 컨버터 입력단 전압의 벡터도

Fig 4. Control algorithm with fixed unity power factor

(a) Control block diagram

(b) Vector diagram of converter input voltage

## 2.2 각 제어 알고리즘의 동작원리

단상 AC/DC 컨버터의 제어는 궁극적으로 컨버터 입력단 기준전압의 제어라 할 수 있다. 즉, 그림 2에서 보는 것처럼 직류 출력전압과 역률을 보상하는 입력 전류의 유효분(\$I\_{qs}\$)과 무효분(\$I\_{ds}\$)은 각각 컨버터 입력단 전압의 무효분(\$V\_{cd}\$)과 유효분(\$V\_{cq}\$)에 비례관계에 있다는 것을 확인할 수 있다.

### 2.2.1 출력전압과 역률의 독립 제어 알고리즘

이 제어 알고리즘에서 컨버터 입력단 기준전압의 생성은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_c^* &= V_{cq}^* + V_{cd}^* \\ &= |V_{cq}^*| \sin \omega_s t - |V_{cd}^*| \cos \omega_s t \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 \$V\_c^\*\$ 컨버터 입력단 기준 전압, \$|V\_{cq}^\*|\$ 입력전압이 영점일 때 센싱한 입력 전류의 무효분을 0이 되도록 PI 제어기를 통해 보정한 컨버터 입력단 유효분, 그리고 \$|V\_{cd}^\*|\$는 출력전압의 검출치와 직류 전압의 기준치의 오차를 PI 제어기를 통해 보정한 컨버터 입력단 무효분을 각각 나타낸다.

그림 3 (a)에 이 제어 알고리즘의 제어 블록도를 나타내었다. (b)는 그림 2와 같이 지상 역률과 기준값 보다 작은 출력전압이 발생되고 있을 때 이를 보정한 컨버터 입력단 기준전압의 벡터도를 나타내고 있다.

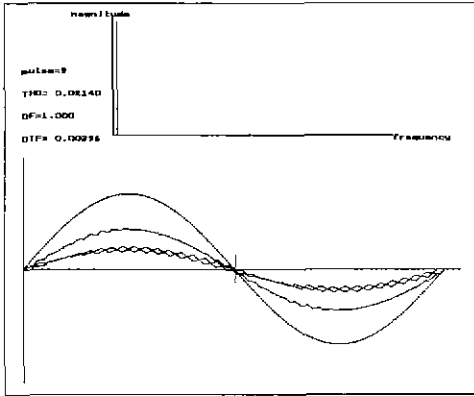
### 2.2.2 단위 역률 설정 하에 출력전압을 보상하는 제어 알고리즘<sup>[4]</sup>

이 제어 알고리즘에서 컨버터 입력단 기준전압의 생성은 다음과 같다.

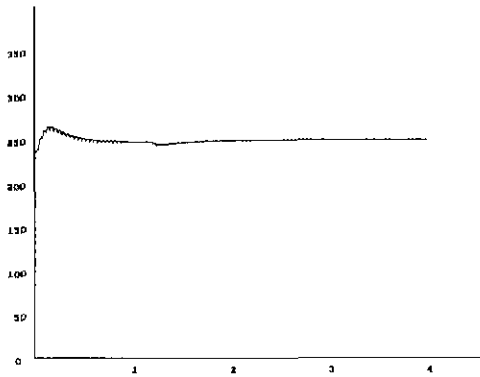
$$\begin{aligned} V_c^* &= |V_c^*| \angle \theta + \alpha + \beta \\ |V_c| &= \sqrt{(V_{cq}^*)^2 + (V_{cd}^*)^2} \\ &= \sqrt{(V_s - I_s^* R)^2 + (\omega L I_s^*)^2} \\ \alpha &= \tan^{-1} \left( -\frac{V_{cd}^*}{V_{cq}^*} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 \$V\_c^\*\$는 보상된 컨버터 입력단 기준 전압, \$I\_s^\*\$는 출력전압의 검출치와 직류 전압의 기준치의 오차를 PI 제어기를 통해 보정한 입력 전류의 유효분 보상값, R은 단위 역률로 추종케하는 컨버터 입력단 기준 전압을 생성키 위한 변압기 저항값, 그리고 \$\theta, \alpha, \beta\$는 입력 전압의 위상, 컨버터 입력단 전압의 위상, \$\beta\$는 제어기에 의한 지연을 보상한 위상각을 각각 나타낸다.

이 제어 알고리즘은 식 (2)에서 보는 것처럼 단위 역률로 컨버터가 추종케 하는 컨버터 입력단 기



(a)



(b)

그림 5. 무부하->정격부하 변화시의 입, 출력 파형 (독립 제어 알고리즘)

(a) 정격 부하시의 전원 전압, 1 차측 전류, 컨버터 입력전류

(b) 부하 변화시의 출력전압

Fig 5. Input and output waveforms with variation from no-load to full-load (Independent control algorithm)

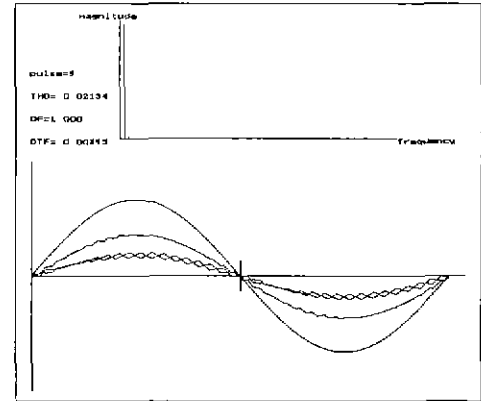
(a) Source voltage, primary current, and converter input currents with full-load

(b) Output voltage with load variation

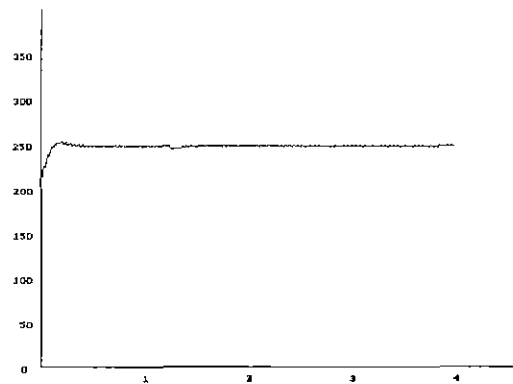
준 전압을 생성하기 위해서 단위 역률이 되게 하는 정확한 R 값을 알아내야만 한다. 따라서 이 제어 알고리즘은 시스템이 변화할 경우 단위 역률로 추종해 하는 R 값을 또다시 수동적으로 tuning하여 알아내야만 한다. 그림 4에 단위 역률 설정 하에 출력전압을 보상하는 제어 알고리즘의 제어 블록도와 컨버터 입력단 전압의 벡터도를 나타내었다.

### 3. 시뮬레이션에 의한 비교, 검토

각 제어 알고리즘의 제어 응답 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션에 사용한 시스템 상수는 표 1과 같다. 스위칭 주파수는 540 Hz로 하였다.



(a)



(b)

그림 6. 무부하->정격부하 변화시의 입, 출력 파형 (단위 역률 설정하의 제어 알고리즘)

(a) 정격 부하시의 전원 전압, 1 차측 전류, 컨버터 입력전류

(b) 부하 변화시의 출력전압

Fig 6. Input and output waveforms with variation from no-load to full-load (Control algorithm of fixed unity power factor)

(a) Source voltage, primary current, and converter input currents with full-load

(b) Output voltage with load variation

표 1. 시스템 상수

Table 1. System parameters

|          |                    |          |
|----------|--------------------|----------|
| 변압기      | $L_m'$             | 300 [mH] |
|          | $L_p'$             | 1.5 [mH] |
|          | $L_{ls1}, L_{ls1}$ | 1.5 [mH] |
| 출력 전압    | DC 250 [V]         |          |
| 출력단 커패시터 | 16000 [uF]         |          |

#### 3.1 출력 전압과 역률의 독립 제어 알고리즘

그림 5는 무부하에서 정격 부하로 가변하였을 때

의 각부 파형을 나타내고 있다. 스위칭 위상차에 의한 병렬 운전으로 (a)에서 보는 것처럼 각 컨버터 입력 전류의 리플이 서로 상쇄되어 변압기 1 차측 입력전류에는 리플이 상당히 저감되어졌음을 파형을 통해 살펴볼 수 있다. 그리고 입력전압과 입력 전류가 동상으로 단위 역률로 제어되고 있음을 알 수 있다. (b)는 무부하에서 정격 부하로 가변시의 출력 전압 파형을 나타낸 것으로 빠르고 안정되게 응답하고 있음을 확인할 수 있다.

### 3.2 단위역률 설정하에 출력전압 만을 제어하는 제어 알고리즘

그림 6은 무부하에서 정격 부하로 가변시의 각부 파형을 나타내고 있다. 그림 6의 (a)는 독립 제어 알고리즘과 마찬가지로 단위 역률로 제어되고 있음을 보여주고 있다. (b)는 출력 전압을 나타낸 것으로 독립 제어 알고리즘에 비해 다소 오버슈트 적다는 것을 파형을 통해 살펴볼 수 있다.

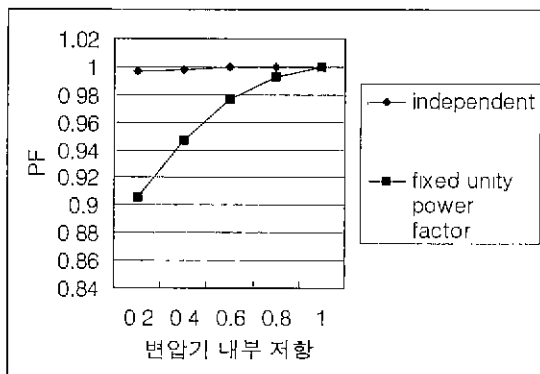
## 4. 시스템 상수 변화에 따른 응답특성 비교

변압기 내부 저항의 값을 1 [p.u]를 중심으로 변화를 주었을 때 각 제어 알고리즘의 역률 크기의 변화를 구하여 표 2에 나타내었다.

표 2. 변압기 저항 변화에 따른 각 제어 알고리즘의 역률 변화

Table 2. Power factor change of each algorithm with change of transformer's internal resistance

| R[p.u] | Independent | fixed unit power factor |
|--------|-------------|-------------------------|
| 0.2    | 0.997       | 0.905                   |
| 0.4    | 0.998       | 0.947                   |
| 0.6    | 1.0         | 0.977                   |
| 0.8    | 1.0         | 0.993                   |
| 1      | 1.0         | 1.0                     |



## 5. 결론

본 논문에서는 출력전압과 역률을 독립적으로 제어하는 제어 알고리즘과 단위 역률 설정하에 출력 전압을 제어하는 제어 알고리즘을 비교, 분석하였다. 두 제어 알고리즘 모두 출력 전압과 역률 제어에서 안정되고 빠른 제어 응답 특성을 지니고 있음을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

두 제어 알고리즘의 주된 차이점은 역률 제어 방식에 있었고 독립 제어 알고리즘은 입력 전류의 무효분을 센싱해 직접적으로 역률 제어를 하기 때문에 시스템 상수에 별로 영향을 받지 않지만 센서가 여러 개 필요하고 매 주기마다 컨버터 입력단 전압을 보상하는 단점을 지니고 있었다. 이에 반해 단위 역률 설정하에 출력 전압을 제어하는 제어 알고리즘은 매 주기가 아닌 실시간으로 컨버터 입력단 전압을 보상해 컨버터를 제어하고 필요한 센서의 수량이 감소하나 변압기 권선 저항이나 리액터 등의 파라미터 변화에 제어 동작이 영향을 받는다는 단점을 지니고 있었다. 그리고 변압기 등의 시스템 변화시에는 단위 역률 상태의 컨버터 입력단 기준전압을 생성하기 위해 또다시 단위 역률 제어가 이루어지도록 하는 제어 변수 R을 수동적으로 tuning하여 찾아내야만 하는 어려움이 있다.

변압기 내부 저항의 변화가 있을 때 독립 제어 알고리즘은 역률 제어가 원만히 단위 역률로 제어가 되었으나 단위 역률 설정하의 제어 알고리즘의 경우에는 역률 값에 변화를 미칠 수 있었으며 시스템의 안정성에도 영향을 미칠 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] G.D. Marques, "Improvement on a three phase GTO converter with PWM by an asymmetrical pulse pattern", Conf. Rec. European Conference on Power Electronics and Application, pp.437-440, 1987
- [2] T. Ohnishi, and H. Okitsu, "A novel PWM technique for three phase inverter/converter", IPEC, Tokyo, pp.384-395, 1983
- [3] D. C. Lee, J. W. Choi, and S. K. Sul, "Decoupling Control of Paralleled Single-Phase GTO PWM Converters for Electric Traction Drives", IPEC, Yokohama, pp.1169-1173, 1995
- [4] 이현원, 장성영, 김연준, 이광주, "IGCT를 이용한 단상 PWM정류기 병렬운전", 전력전자학회 논문지, Vol. 5. No. 1, pp. 11-18, 2000, 2.