

# 불평형부하 시 데드타임 보상기법을 적용한 독립형 인버터 전압제어기 해석 및 실험

정진용, 배상훈, 차한주  
충남대학교 전기공학과

## Analysis and Experiment of Stand-alone Inverter Voltage Control Using a Dead Time Compensation Under Unbalanced Load

Jinyong Jeong, Sanghoon Bae, Hanju Cha  
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

### ABSTRACT

3상 독립형 인버터의 비대칭 출력 전압은 부하의 불평형에 의하여 야기되며 압 단락을 방지하기 위한 데드타임은 출력 전압에 비선형적인 특성을 발생시킨다. 인버터가 불평형부하 구동 시 3상 출력전압은 불평형의 홀수배 고조파를, 동기좌표계 상에서 dq전압은 서로 크기가 다른 짝수배 고조파를 발생시킨다. 본 논문에서는 불평형부하에 따른 불평형 출력 전압을 평형으로 유지하는 동시에 공진제어를 이용하여 데드타임에 의한 불평형 고조파를 보상하는 전압제어기를 제안하였으며 10kW 용량의 독립형 인버터를 제작하여 제안한 제어기법의 타당성을 입증하였다. 실험을 통해 출력 전압의 THD는 4.3%에서 1.5%로, 불평형율은 4.3%에서 1.1%로 감소함을 확인하였다.

### 1. 서 론

마이크로그리드는 다수의 분산전원 및 에너지 저장장치를 이용하여 수요지에 전력을 공급하는 소규모의 에너지공급 시스템이다. 독립형 마이크로그리드 시스템은 주로 계통이 공급되지 않는 지역에 설치되어 안정적인 전원을 부하에 공급하는 역할을 수행한다. 그러나 불평형부하와 비선형부하 조건, 인버터의 데드타임과 같은 특성은 인버터 출력 전압을 왜곡시키므로 양질의 전력을 공급할 수 있는 제어 알고리즘이 필요하다. 불평형부하에 의한 불평형 전압을 대칭성분으로 분해하여 정상분, 역상분을 각각 서로 반대 방향으로 회전하는 두 종류의 동기좌표계로 변환할 경우 각 대칭성분은 직류량으로 표현되므로 PI제어기의 이득을 크게 증가시키지 않아도 전압을 평형으로 제어할 수 있다<sup>[1]</sup>. 이 때 데드타임은 출력 전압에 불평형의 저차 고조파를 발생시키며 인버터가 비선형부하 구동 시 발생하는 전압왜곡은 보다 심각한 형태로 왜곡된다. 이 전압왜곡을 보상하기 위해 공진제어를 이용하여 고조파를 선택적으로 제거하는 기법<sup>[2]</sup>은 효과적이며 비교적 쉽게 구현 가능한 방법으로 알려져 있다. 기존에 발표된 데드타임 보상방법은 동기좌표계 상에서 6고조파를 보상하여 전력 품질을 향상시킬 수 있었으나 이는 평형부하에서 효과적이지만 불평형부하 시 발생하는 고조파를 보상하는 방법으로 적절하지 않다. 본 논문에서는 인버터가 불평형부하 구동 시 발생하는 고조파를 해석하여 이를 기반으로 전압왜곡을 보상할 수 있는 전압제어기를 제안하였다.

## 2. 불평형부하 시 독립형 인버터 전압제어

### 2.1 3상 독립형 마이크로그리드용 인버터 구조

그림 1은 3상 독립형 마이크로그리드용 인버터의 구조로서 DC/AC 인버터와 LC필터, 불평형부하로 구성되며 인버터 각 부의 파라미터를 표 1에 나타낸다.

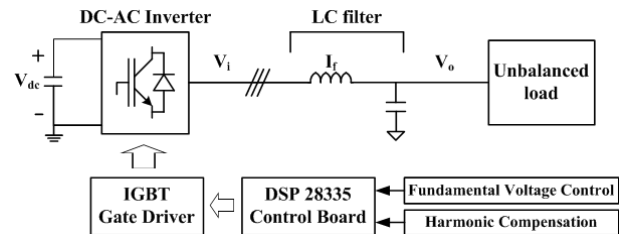


그림 1 3상 독립형 마이크로그리드용 인버터 구조  
fig. 1 Three phase stand-alone microgrid inverter system

표 1 3상 독립형 인버터의 정격 및 파라미터  
Table 1 Parameter and rating of the stand-alone inverter

Circuit element	Value
DC link voltage $V_{dc}$	400 V
Switching frequency $f_{sw}$	10 kHz
Filter inductor $L_f$	1.1 mH
Filter capacitor $C_f$	150 $\mu$ F
Output voltage $V_o$	220 $V_{LL}$
Output power P	10 kW

### 2.2 데드타임으로 인한 출력전압 왜곡

이상적인 경우의 인버터 출력 전압과, 데드타임과 스위칭 소자의 전압강하를 고려한 출력 전압간의 오차는 인덕터 전류의 부호에 따라 결정된다. 평형부하 시 3상 인덕터 전류의 zero crossing이 120°의 위상간격마다 발생하여 3상 오차 전압에 포함된 각각의 고조파는 크기가 동일하고 120°의 위상차를 가진다. 그러므로 출력 선간전압에서 3배수 고조파는 제거되고 오차는  $6n\pm 1$  고조파로 나타난다. 그러나 불평형부하 시 3상 인덕터 전류의 zero crossing은 120°의 위상 간격을 이루지 못하여 각 상의 오차 전압은 서로 다른 형태로 발생한다. 즉, 각 상의 오차에 포함된 고조파가 서로 불평형을 이루고 3배수 고조파가 상쇄되지 못하여 출력 선간전압은 불평형의 홀수배 고조파를 발생시킨다. 이 불평형 고조파의 해석은 지면 관계상 생략하며 해석에 기반한 전압제어 전략을 2.3절에 나타내었다.

### 2.3 제안된 전압 제어기

그림 2는 불평형부하 시 데드타임에 의한 전압왜곡을 보상하는 전압제어 구조를 나타낸다. 표 2의 기본과 정, 역상분 전

압은 서로 반대방향으로 회전하는 동기좌표계상에서 직류량으로 표현되며 이를 제어하는 PI제어기 출력은 feed forward로 표시하였다. 표 3과 표 4는 출력 전압에 포함된 불평형 고조파의 제어 전략을 보여준다. 데드타임 때문에 발생한 저차 고조파는 동기좌표계와 정지좌표계상에서 각각 표 3과 표 4와 같이 표현되며 공진제어를 통해 선택적으로 보상할 수 있다.

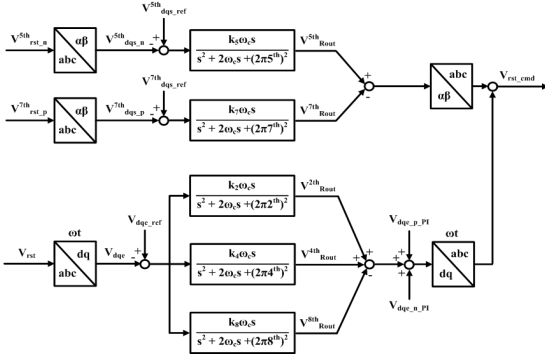


그림 2 PI제어기 및 공진제어기를 이용한 전압제어 구조  
fig. 2 Distorted voltage control scheme using PI and resonant controller

표 2 동기좌표계상에서 PI제어기를 이용한 기본파 전압 제어  
Table 2 Fundamental voltage control strategy using PI controller at synchronous frame

abc components	Synchronous frame dqe	Control
$V_{rst\_p}^f$	At positive SRF(+ $\omega t$ ), $V_{dq\_p}^f = DC\ component$	PI control
$V_{rst\_n}^f$	At negative SRF( $\omega t$ ), $V_{dq\_n}^f = DC\ component$	PI control

표 3 동기좌표계상에서 공진제어기를 이용한 고조파 보상  
Table 3 Harmonic control strategy using resonant controller at synchronous frame

abc components	Positive SRF(+ $\omega t$ ) dqe	Control
$V_{rst\_p}^{3rd}$	$V_{dc\_p}^{3rd} = V_3 \sin(2\omega t + \phi_3)$ $V_{qc\_p}^{3rd} = -V_3 \cos(2\omega t + \phi_3)$	2 <sup>th</sup> harmonic R control
$V_{rst\_n}^{3rd}$	$V_{dc\_n}^{3rd} = V_{-3} \sin(4\omega t + \phi_{-3})$ $V_{qc\_n}^{3rd} = -V_{-3} \cos(4\omega t + \phi_{-3})$	4 <sup>th</sup> harmonic R control
$V_{rst\_p}^{5th}$	$V_{dc\_p}^{5th} = V_5 \sin(4\omega t + \phi_5)$ $V_{qc\_p}^{5th} = -V_5 \cos(4\omega t + \phi_5)$	8 <sup>th</sup> harmonic R control
$V_{rst\_n}^{7th}$	$V_{dc\_n}^{7th} = V_{-7} \sin(8\omega t + \phi_{-7})$ $V_{qc\_n}^{7th} = -V_{-7} \cos(8\omega t + \phi_{-7})$	8 <sup>th</sup> harmonic R control
$V_{rst\_p}^{9th}$	$V_{dc\_p}^{9th} = V_9 \sin(8\omega t + \phi_9)$ $V_{qc\_p}^{9th} = -V_9 \cos(8\omega t + \phi_9)$	8 <sup>th</sup> harmonic R control

표 4 정지좌표계상에서 공진제어기를 이용한 고조파 보상  
Table 4 Harmonic control strategy using resonant controller at stationary frame

abc components	Stationary frame dqs	Controller
$V_{rst\_n}^{5th}$	$V_{ds\_n}^{5th} = V_{-5} \sin(5\omega t + \phi_{-5})$ $V_{qs\_n}^{5th} = -V_{-5} \cos(5\omega t + \phi_{-5})$	5 <sup>th</sup> harmonic R control
$V_{rst\_p}^{7th}$	$V_{ds\_p}^{7th} = V_7 \sin(7\omega t + \phi_7)$ $V_{qs\_p}^{7th} = -V_7 \cos(7\omega t + \phi_7)$	7 <sup>th</sup> harmonic R control

## 2.4 실험 결과

그림 3는 인버터가 표 1의 파라미터로 불평형부하 구동 시 출력 선간전압 파형과 전압에 포함된 고조파를 보여주고 있다. (a)는 기존의 동기좌표계 전압제어 기법을 적용한 경우의 실험 파형으로 3상 전압은 불평형이며 3.3 $\mu$ s의 데드타임으로 인하여 왜곡된 전압이 발생한다. (b)는 제안된 전압제어 기법을 적용한 실험파형으로 전압왜곡이 보상된 결과를 나타낸다. 출력 전압에 포함된 저차 고조파가 보상되어 THD가 4.3%에서 1.5%로 감소하였다. 또한 식 1과 2로 계산되는 선간전압의 불평형을  $VUF_2$ 가 4.3%에서 1.1%로 감소하여 3상 전압이 평형으로 제어됨을 확인하였다.

$$VUF_2 = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \times 100 [\%] \quad (1)$$

$$\beta = \frac{|V_{rs}|^4 + |V_{st}|^4 + |V_{tr}|^4}{(|V_{rs}|^2 + |V_{st}|^2 + |V_{tr}|^2)^2} \quad (2)$$

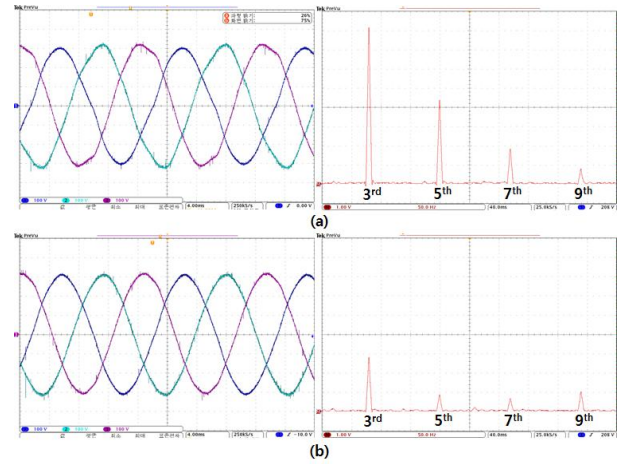


그림 3 출력 선간전압 실험 파형 비교 (a) 기존의 동기좌표계 전압제어기 적용 (b) 제안된 전압제어기 적용  
fig. 3 Output line to line voltage waveform comparison  
(a) Conventional synchronous frame voltage control (b) Proposed voltage control

## 3. 결론

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드용 인버터가 불평형부하 구동 시 데드타임에 의한 전압왜곡을 분석하였고 이를 보상할 수 있는 전압제어기를 제안하였다. 제안된 제어기를 통하여 출력전압의 THD가 4.3%에서 1.5%로, 불평형율이 4.3%에서 1.1%로 개선되어 제안된 기법의 타당성을 입증하였다.

## 참고 문헌

- [1] 김경환, 현동석, "3상 무정전 전원장치에 적합한 새로운 구조의 동기좌표계 전압제어기", 전력전자학회논문지, 제10권 제5호, 508-517, 2005-10
- [2] 한상협, 박종형, 김홍근, 차헌영, 전태원, 노의철, "공진제어를 이용한 계통 연계형 인버터의 데드타임 보상", 전력전자학회 논문지, 제16권 제6호, 569-576, 2011-12