

# Analysis of Voltage Control of Stand-Alone Microgrid for High Quality Power Supply

## 고품질 전력공급을 위한 독립형 마이크로그리드의 전압제어 해석

Jongmin Jo\*, Hakju Lee\*\*, Chang-hoon Shin\*\*, Hanju Cha\*†  
조종민\*, 이학주\*\*, 신창훈\*\*, 차한주\*†

\* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, 99 Daehak-ro, Yuseong-gu, Daejeon, 34134, Korea

\*\* KEPCO Research Institute, Korea Electric Power Corporation, 105 Munji-ro Yuseong-gu, Daejeon 34056, Korea

† hjcha@cnu.ac.kr

### Abstract

This paper analyzes voltage control method in order to supply high-quality power for stand-alone microgrid. Stand-alone microgrid is composed of battery bank, stand-alone PCS and controllable loads. The main role of stand-alone PCS is to supply high-quality power to loads as main source by using stable voltage method regardless of load conditions. In particularly, output voltage of stand-alone PCS gets severely unbalanced voltage under unbalanced loads. Fundamental positive and negative sequences are transformed by two coordinates transformation which are rotated in each opposite direction, respectively. Each fundamental d-q voltage is regulated by each fundamental PI control. In addition, low-order harmonics are compensated through resonant controllers. Performance of stand-alone microgrid is tested for feasibility, and it is verified that output voltage of THD is improved to 1% from 2.2% under 50 kW balanced load, and is improved to 1.1% from 2.6% under 50 kW unbalanced load.

*Keywords : Stand-alone microgrid, PCS(Power Conditioning System), voltage control, unbalanced load*

### I. 서론

지구 온난화와 온실가스 배출의 증가에 따른 환경 오염 문제가 전 세계적으로 대두되면서, 현재 풍력, 태양광 등 친환경 에너지원으로 주목받는 신재생 에너지와 배터리 에너지 저장장치를 결합한 마이크로그리드 시스템에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 특히, 기존 계통 전력망과 별도로 분리되어 운용 가능한 독립형 마이크로그리드는 장거리 전력전송을 필요로 하는 도서지역에 적합한 시스템으로 주목받고 있다 [1]. 일반적으로 도서지역에 전력을 공급하기 위해 디젤발전기를 이용한 자체적인 발전을 통해 전력을 생산하거나, 장거리 전송 선로를 설치하여 기존 전력망으로부터 수요지에서 요구하는 전력을 공급하고 있다. 그러나, 디젤발전기의 낮은 효율성과 장거리 전송선로의 높은 설치비용은 도서지역에 전력을 공급하는데 커다란 단점으로 부각되고 있다 [2]. 따라서, 이러한 단점을 보완할 수 있는 대안으로 독립형 마이크로그리드를 이용한 전력공급 시스템의 연구가 활발히 진행 중이다. 독립형 마이크로그리드는 배터리에 저장된 에너지를 전력변환을 통해 수요지에서 요구하는 전력을 공급해야 하는 중요한 역할을 수행하는 것이 주 목적이다 [3]. 3상 부하가 불평형인 경우 불평형의 전류가 흐르게 되고, LC 필터 양단에서 불평형의 전

압강하가 발생하기 때문에 부하 측 전압은 평형상태를 유지하지 못하고 불평형의 전압으로 나타난다 [4]. 또한, PCS 각 폴의 상단과 하단 스위치 간에 단락 방지를 위해 삽입된 데드타임의 비선형적 특성으로 인해 저차 고조파 성분이 발생하며, PCS의 출력전압을 왜곡시키는 원인이 된다 [5]. 따라서, 배터리 에너지 저장장치를 기반으로 하는 3상 PCS는 고정 주파수를 갖는 정전압원의 역할을 위해 부하조건에 관계없이 안정한 전압제어 기법이 적용되어야 한다. PCS 출력전압의 기본과 제어는 동기좌표계 축에서 PI 제어를 통해 제어 될 수 있다. 특히, 불평형 부하에 의해 발생하는 불평형 전압은 기본과 정상분과 더불어 기본과 역상분 전압을 제어함으로써 안정한 평형 3상 전압으로 제어가 가능하다 [6]. 또한, PCS 데드타임에 의해 전압을 왜곡시키는 주요 저차 고조파 전압 성분들은 선택적 고조파 보상 특성을 갖는 공진제어를 통해 각 고조파 성분을 증폭, 추출하여 보상할 수 있다 [7].

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드에서 부하에 고품질의 전력을 공급하기 위한 전압제어 기법을 분석하고, 50 kW 3상 평형 및 불평형 부하를 고려한 독립형 마이크로그리드에 적용하여 안정한 전압제어의 특성을 검증하였다.

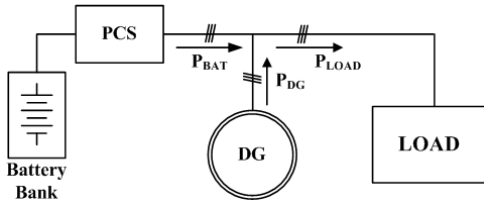


Fig. 1. Configuration of stand-alone microgrid.

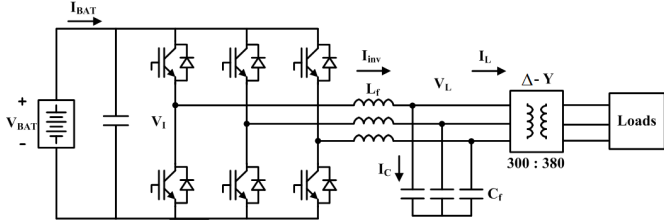


Fig. 2. Configuration of stand-alone PCS.

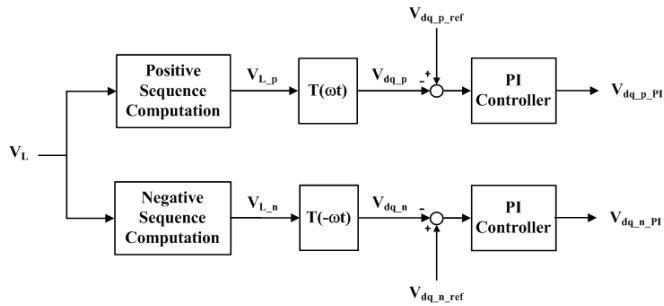


Fig. 3. Fundamental sequence voltage control of stand-alone PCS.

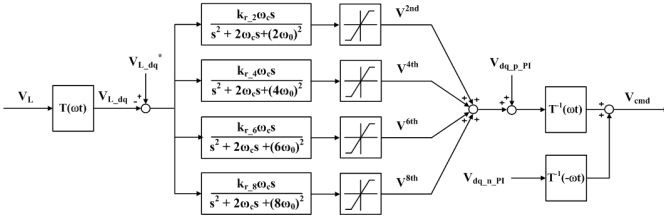


Fig. 4. Harmonic sequences compensation method using resonant controller.

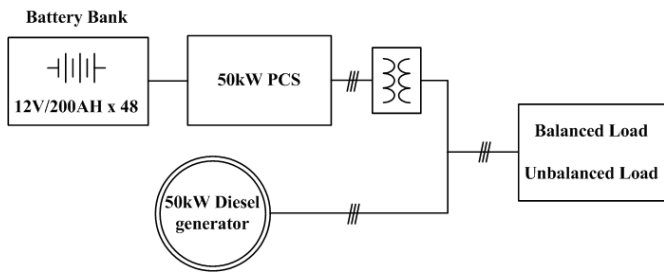


Fig. 5. Configuration of demonstration site for 50 kW stand-alone microgrid.

## II. 독립형 마이크로그리드 구성

### A. 독립형 마이크로그리드 구성

Fig. 1은 PCS, 디젤발전기와 부하로 구성된 독립형 마이크로그리드의 블록도이다. PCS는 배터리 뱅크와 연결되며, 부하에서 요구하는 전력을 공급하기 위해 부하 조건에 관계없이 안정한 전압제어를 수행함으로써 고품

Table 1. Parameters of stand-alone microgrid

	Parameter	Value
Battery Bank	Capacity	115kWh
	Voltage range	500~650V
	Rated power	50kW
	Rated voltage	380V
PCS	Switching frequency	10kHz
	Filter inductor	1.04mH
	Filter capacitor	32uF
	Controllable load	Three-phase balanced load Three-phase unbalanced load

질의 전력을 공급하는 역할을 수행한다. 부하는 조건에 따라 평형부하, 불평형부하 또는 비선형부하로 구성된다. 디젤발전기는 독립형 마이크로그리드에서 보조 전원의 역할을 수행할 수 있으며, PCS와 병렬운전을 통해 부하에서 요구하는 전력을 분담하여 공급할 수 있다. PCS와 디젤발전기가 부하를 분담하는 경우, PCS가 전압제어를 통해 선로전압을 유지하므로, 디젤발전기는 부하용량의 일부를 공급하기 위해 유효전력 및 무효전력 제어를 수행함으로써 부하를 분담하는 기능을 수행한다.

### B. 독립형 3상 PCS 구조

Fig. 2는 독립형 3상 PCS의 구조를 나타내는 블록도이며, 독립형 PCS에 연결된 직류단 측 배터리 뱅크는 12V/200 AH 납축 배터리 48개가 직렬구조로 구성되어 115 kWh 배터리 용량을 갖는다. 3상 3선식 인버터로 6개 IGBT 스위치를 포함하고 있으며, LC 필터와 Δ-Y 변압기로 구성되어 부하에 연결된다. Table 1은 독립형 마이크로그리드 시스템의 각 부 파라미터이며, 3상 독립형 PCS의 정격용량은 50 kW, 선간전압은 380 V이다.

## III. 독립형 PCS 전압제어 알고리즘

### A. 기본과 전압제어 알고리즘

Fig. 3은 3상 PCS의 기본과 전압제어 블록도이다. 독립형 마이크로그리드에서 3상 PCS는 부하조건에 관계없이 안정한 3상 평형 전압을 제어함으로써 부하에 고품질의 전력을 공급하는 것이 목적이다. 평형부하 조건에서는 3상 부하상전압은 기본과 정상분 전압만을 포함하기 때문에, Eq. 1에 표현된 좌표변환을 수행하면 동기좌표계 축에서 직류량으로 변환될 수 있다. 따라서, 평형부하의 경우에는 동기좌표계 PI 제어기를 통해 안정한 전압제어를 수행할 수 있다. 그러나, 부하가 불평형 부하조건인 경우에는 평형부하 조건에서와 달리, Eq. 2와 같이 3상 부하상전압에는 기본과 정상분 전압뿐만 아니라 기본과 역상분 전압을 포함하게 된다. 기본과 역상분 전압은 Eq. 1에 표현된 기본과 정상분의 상 회전 방향으로 회전하는 좌표변환을 수행하면 동기좌표계 상에서 2차 고조파 성분으로 변환된다. 따라서, 대역폭의 한계를 갖는 동기좌표계 PI 제어기는 시변함수로 존재하는 2차 고조파 성분을 제어하는 것이 어렵다. 따라서, 기본과 역상분 전압을 Eq. 3에 표현된 좌표변환을 수행하면 동

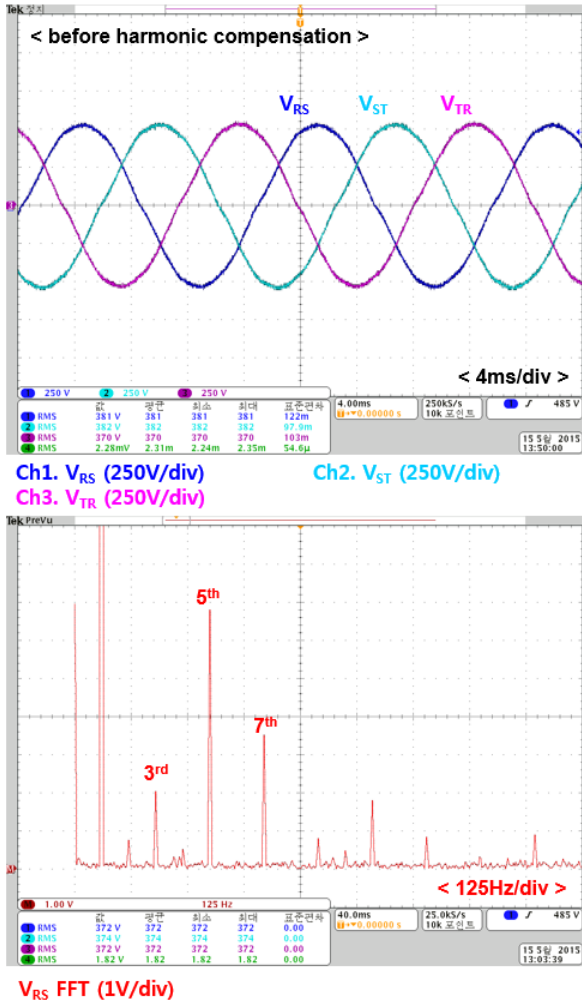


Fig. 6. Experimental results of fundamental control under 50 kW balanced load.

기좌표계 상에서 기본과 정상분 전압과 동일하게 직류량으로 변환된다. 따라서, 부하상전압으로부터 기본과 정상분과 역상분 전압을 추출하고, 추출된 기본과 정상분 전압은 Eq. 1로, 기본과 역상분 전압은 Eq. 2를 통해 좌표변환을 수행하여 지령치와의 오차를 각각의 기본과 PI 제어를 통해 제어를 수행함으로써 안정한 전압제어를 수행할 수 있다. 따라서, 불평형 전압을 야기시키는 불평형 부하조건에서도 안정한 평형상태의 전압을 공급할 수 있다.

$$T(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 120^\circ) & \cos(\omega t + 120^\circ) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 120^\circ) & -\sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Lr} \\ V_{Ls} \\ V_{Lt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{Lrp} \\ V_{Lsp} \\ V_{Ltp} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{Lrn} \\ V_{Lsn} \\ V_{Ltn} \end{bmatrix} = V_1 \begin{bmatrix} \sin \omega t \\ \sin(\omega t - 120^\circ) \\ \sin(\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} + V_{-1} \begin{bmatrix} \sin(\omega t + \phi) \\ \sin(\omega t + 120^\circ + \phi) \\ \sin(\omega t - 120^\circ + \phi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T(-\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t) & \cos(-\omega t - 120^\circ) & \cos(-\omega t + 120^\circ) \\ -\sin(-\omega t) & -\sin(-\omega t - 120^\circ) & -\sin(-\omega t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (3)$$

B. 고조파 전압제어 알고리즘

3상 PCS는 스위치의 암 단락을 방지하기 위해 적용된 데드타임 때문에 부하상전압은 고조파 전압 성분을

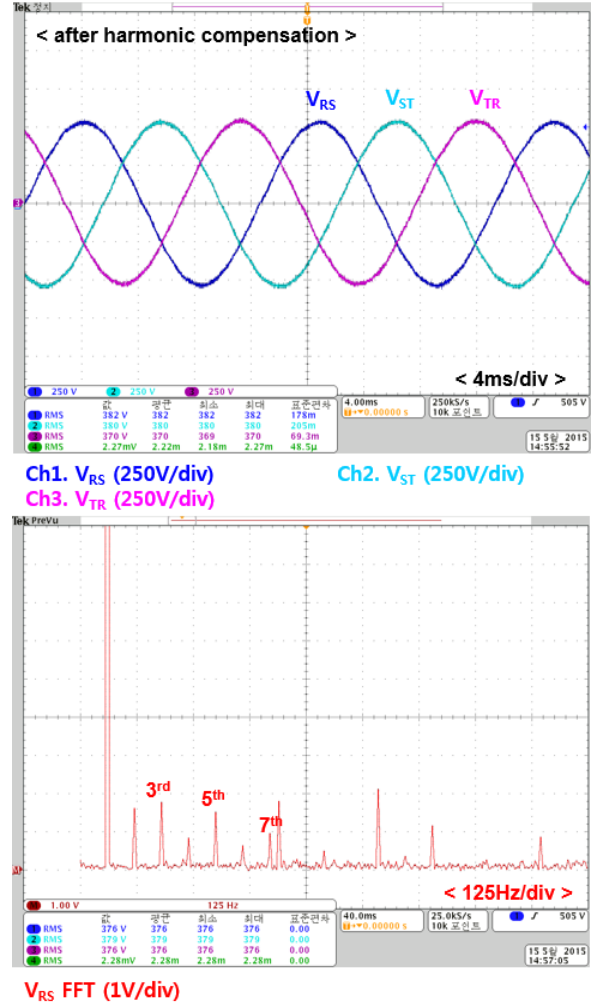


Fig. 7. Experimental results of fundamental and harmonic control under 50 kW balanced load.

포함하는 왜곡된 전압으로 존재하게 된다. 특히, 부하조건이 불평형인 경우 3상 부하상전압에는 홀수배의 고조파 전압 성분을 포함하게 되며, 좌표변환을 수행함에 따라 동기좌표계 상에서 2n차 고조파 성분으로 변환된다. 동기좌표계 측에 존재하는 고조파 성분은 PI 제어를 통해 정상상태의 오차를 제거할 수 없기 때문에 선택적 고조파 보상특성을 갖는 공진제어를 이용하여 보상할 수 있다. Fig. 4는 PCS 부하상전압에 포함된 고조파 전압을 보상하는 제어 알고리즘 블록도이다. 동기좌표계 측에서 발생하는 2n차 고조파 성분 중 전압 왜곡에 큰 영향을 미치는 저차 고조파 성분을 보상하기 위해 2, 4, 6, 8차 공진제어를 적용하였으며, 각 공진제어기는 병렬구조로 연결된다. 각 공진제어기는 해당 고조파 성분만을 증폭하여 추출하고 제어기 최종 출력 단에서 기본과 PI 제어기 출력과 더해진다. Eq. 5는 병렬구조로 연결된 2, 4, 6, 8차 공진제어기의 전달함수를 나타낸다.

$$G_R(s) = \frac{k_{r_2} \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (2\omega_0)^2} + \frac{k_{r_4} \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (4\omega_0)^2} + \frac{k_{r_6} \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (6\omega_0)^2} + \frac{k_{r_8} \omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (8\omega_0)^2} \quad (4)$$

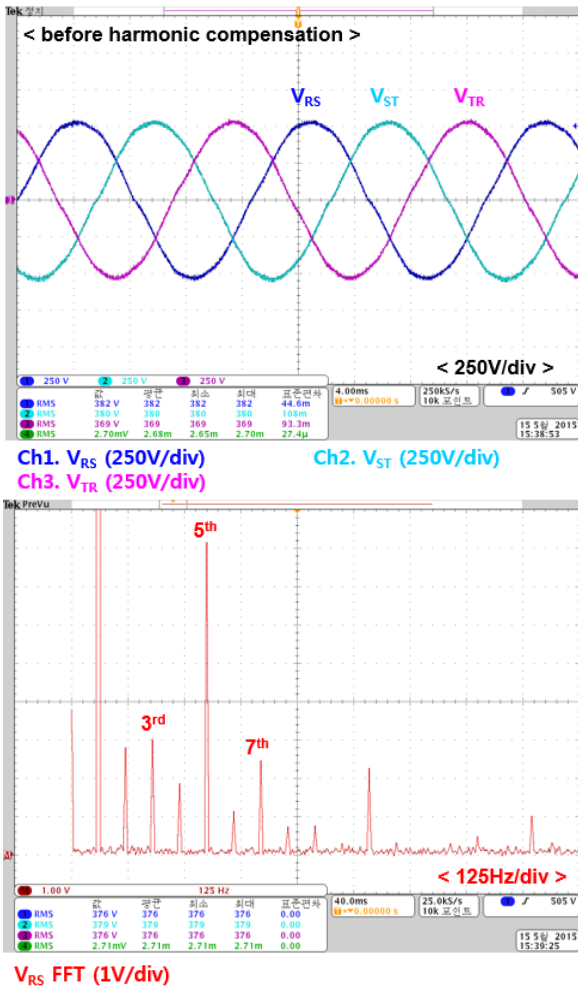


Fig. 8. Experimental results of fundamental control under 50 kW unbalanced load.

#### IV. 실험 결과

Fig. 5는 50 kW 독립형 마이크로그리드의 구성 블록도이며, 배터리 뱅크, 50 kW PCS, 50 kW 디젤발전기 및 선형/비선형 부하로 구성된다. 3상 PCS의 DC 링크 직류 단에는 12V/200 AH 납축 배터리 48개 직렬 구성된 115 kWh 용량을 갖는 배터리 뱅크가 연결되어 있으며, 보조 전원의 역할을 수행하는 50 kW 디젤발전기가 3상 PCS와 부하에 병렬로 연결된 구조를 갖는다.

Fig. 6과 7은 R상 16.6 kW, S상 16.6 kW, T상 16.6 kW의 용량을 갖는 평형 부하에 대한 3상 PCS 전압제어 실험 파형으로 380 V 부하 측 선간전압을 보여준다. Fig. 6은 기본과 전압제어만을 수행한 경우 선간전압 파형으로 3상 전압은 평형전압으로 제어됨을 확인할 수 있으며 전압 THD는 2.2%이다. 우측 선간전압의 FFT 결과 파형으로부터 홀수배에 해당하는 저차 고조파 성분이 선간전압에 포함되어 있음을 알 수 있다. Fig. 7은 기본과 전압제어에 고조파 보상 제어 알고리즘을 추가한 경우 선간전압 파형이다. 기본과 전압제어만 수행한 결과와 동일하게 평형 3상 전압으로 제어되고 있으며, 추가적으로 공진제어기에 의해 고조파 성분이 보상되므로 홀수 배의 저차 고조파 성분들이 크게 감소함을 FFT 측정 결과로부터 확인할 수 있으며, 전압 THD는 2.2%에서 1%

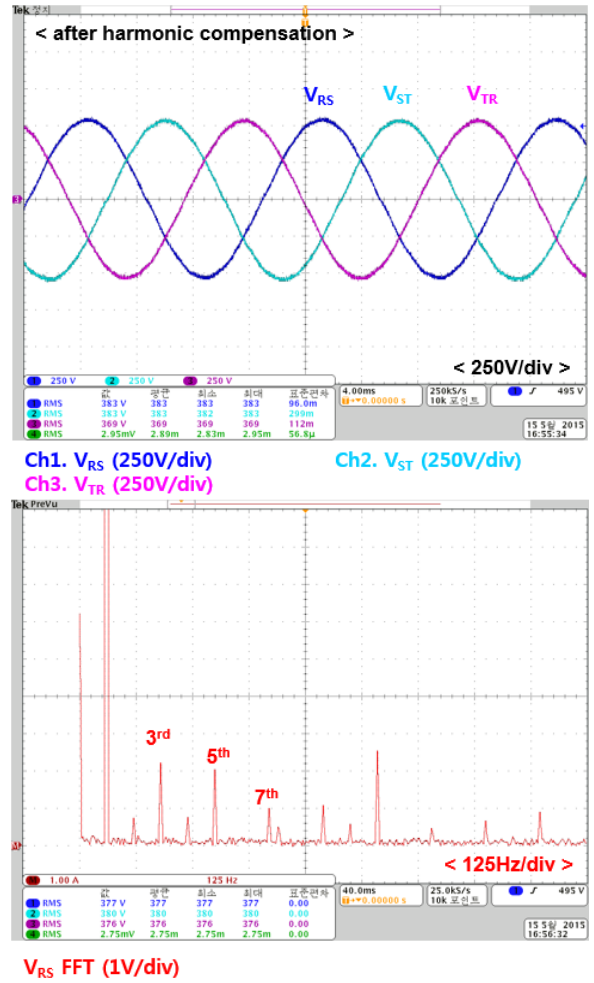


Fig. 9. Experimental results of fundamental and harmonic control under 50 kW unbalanced load

로 감소하였다.

Fig. 8과 9는 R상 15 kW, S상 15 kW, T상 20 kW의 용량을 갖는 3상 PCS 불평형 부하에 대한 전압제어 실험 파형으로 380 V 부하 측 선간전압을 보여준다. Fig. 8은 동기좌표계에서 기본과 전압제어만을 수행한 경우 선간전압 파형으로 불평형 부하조건에서도 기본과 역상분 전압을 제어하기 때문에 3상 전압은 불평형 전압으로 나타나지 않고 평형 전압으로 제어됨을 확인할 수 있다. 우측 선간전압 FFT 결과로부터 선간전압에는 저차고조파 성분이 존재하며, 전압 THD는 2.6%이다. Fig. 9는 공진제어기를 추가한 선간전압 출력파형 결과이다. Fig. 8과 동일하게 기본과 전압제어가 수행되므로 3상 전압은 평형 전압으로 제어되고 있으며, 공진제어기로부터 저차 고조파 전압 성분들이 크게 감소함을 확인할 수 있다. 이 때, 전압 THD는 1.1%이다.

#### V. 결론

본 논문에서는 고품질 전력을 공급하기 위한 독립형 마이크로그리드의 전압제어 기법을 분석하였으며, 50 kW 독립형 마이크로그리드 시스템에 적용하여 전압제

어 기법의 타당성을 검증하였다. 독립형 마이크로그리드는 배터리 뱅크, PCS, 디젤발전기 및 평형/불평형 부하로 구성하였다. 불평형 부하조건에서는 부하 측 전압이 불평형 전압으로 발생하지만, 기본과 정상분 전압과 역상분 전압제어 기법을 통해 평형 전압으로 제어가 가능하며, PCS 데드타임에 의해 발생하는 저차 고조파 성분들은 공진제어기를 통해 보상될 수 있다. 50 kW 평형 부하조건에서 전압 THD는 2.2%에서 1%로 향상되었으며, 50 kW 불평형 부하조건에서는 3상 전압이 기본과 전압제어를 통해 평형 전압으로 안정하게 제어되고, 전압 THD는 2.6%에서 1.1%로 향상되었음을 실험을 통해 검증하였다.

## REFERENCES

- [1] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy Management of Microgrid in Grid-Connected and Stand-Alone Modes," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, Aug. 2013, pp. 3380-3389.
- [2] W. J. Lee, H. J. Lee, and H. J. Cha, "Modeling and Experiment of 50kW Diesel Generator in Grid-connected Mode," *Trans. KIEE*, vol. 63, no. 10, Oct. 2014, pp. 1347-1353.
- [3] J. W. Jung, N. T. T. Vu, D. Q. Dang, T. D. Do, Y. S. Choi, and H. H. Choi, "A Three-Phase Inverter for a Standalone Distributed Generation System: Adaptive Voltage Control Design and Stability Analysis," *IEEE Trans. Energy Convert.*, vol. 29, no. 1, Mar. 2014, pp. 46-56.
- [4] Peng Li, Bai Dan, Kang Yong, and Chen Jian, "Research on Three-phase Inverter with Unbalanced Load", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE, 2004*, pp. 128-133.
- [5] T. K. Vu, S. H. Lee, and H. J. Cha, "A New On-Line Dead-Time Compensator for Single-Phase PV inverter", *Trans. KIPE*, Vol. 17, No. 5, October, 2012, pp. 569-576.
- [6] K. H. Kim, N. J. Park, and D. S. Hyun, "Advanced synchronous reference frame controller for three-phase UPS powering unbalanced and nonlinear loads," *Power Electronics Specialists Conference, PESC '05, IEEE 36th, 2014*, pp. 1699-1704.
- [7] J. Y. Jeong, J. M. Jo, J. W. Lee, W. K. Chae, and H. J. Cha, "Dead Time Compensation of Stand-alone Inverter Under Unbalanced Load," *Trans. KIPE*, vol. 20, no. 2, April. 2015, pp. 115-121.