

Droop Control을 이용한 3상 4선식 UPS의 병렬운전

(Parallel Operation of Three-Phase Four wire UPS using Droop Control)

김현섭* · 한정호 · 송중호**

(Hyunseob Kim · Jungho Han · Joong-Ho Song)

Abstract

A new droop control method which can be applied to 3-phase 4-wire uninterruptible power supply is proposed in this paper. The droop control method for parallel operation is very attractive one as UPS parallel operation can be carried out without any data communication devices provided among UPS systems connected, but it reportedly shows a PnP(plug-and-play) problem. A basic reason why a circulating current could flow among parallel-connected UPS systems is clearly investigated as well when droop-controlled-ups systems are operated in the manner of PnP. The proposed algorithm is deduced from the investigated result and is basically structured to keep a balanced frequency and balanced voltage profile against power variation. This paper shows that balanced parallel operation of droop control method can be obtained under unbalanced load as well as balanced load conditions when PnP operation is needed and load change occurs.

Key Words : UPS(Uninterruptible Power Supply), Inverter, Droop Control, Parallel Operation

1. 서 론

최근 정보화, 산업화 사회로 발전함에 따라 컴퓨터 시스템, 의료장비, 통신 장비와 같은 전원에 민감한 부하의 사용이 증가하고 있는 추세이다. 그러나 이런 부하들은 전원의 일시적인 이상현상(과전압, 부족전압, 고조파 등)에도 큰 영향을 받아 시스템 전체가 정지하거나 오동작을 하는 결과를 초래한다. 이에 대한 대책으로써 UPS(Uninterruptible Power Supply)의 사용이 필수적이다[1-2].

최근에 UPS의 용량증대와 신뢰성 향상을 위해 UPS의 병렬 운전이 고려되고 있다. 그 이유는 대용량의 UPS를 단독으로 사용하는 것보다 작은 용량의

* 주저자 : 서울과학기술대학교 철도전문대학원 석사
** 교신저자 : 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수
* Main author : Dept. of Railway Electrical and Signaling Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Candidate of MS
** Corresponding author : Dept. of Electrical and Information Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Professor
Tel : 02-970-6415, Fax : 02-978-2754
E-mail : joongho@seoultech.ac.kr
접수일자 : 2013년 2월 13일
1차심사 : 2013년 2월 16일
심사완료 : 2013년 3월 19일

UPS를 병렬로 운전하는 것이 용량의 확장성, 경제성, 안정성의 측면에서 유리하기 때문이다. 일반적으로 UPS의 병렬운전을 하기 위해서는 각 UPS의 출력전압의 크기, 주파수, 위상이 일치해야 하고 PnP(plug-and-play)운전이 가능해야 한다[3]. 여기서 PnP운전이란 UPS가 부하에 전력을 공급하는 중에 다른 UPS가 투입되었을 때의 운전을 의미한다.

UPS의 병렬운전 기법에는 active load-sharing 기법과 droop control 기법이 있다. active load-sharing 기법에는 centralized control 기법, master-slave control 기법, average load sharing 기법, circular chain control 기법이 있는데 이 방법들은 UPS간의 통신을 이용하기 때문에 신뢰성과 확장성이 떨어지고 노이즈에 취약하다는 단점이 있다[4]. 반면에 droop control 기법은 UPS간의 통신이 불필요하기 때문에 신뢰성과 확장성이 높은 장점이 있으므로 UPS 병렬운전 제어방식으로 적합하다.

본 논문에서는 UPS간의 통신이 불필요한 droop 제어기법을 이용하여 3상 4선식 UPS의 병렬운전 제어 알고리즘을 제안한다. 또한 3상 4선식 부하에서 기존의 droop 제어기를 적용한 UPS의 PnP 운전시 순환전류의 원인을 분석하고, PnP 운전이 가능한 droop 제어기를 제안한다. 그리고 제안된 제어 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 3상 평형 부하, 불평형 부하에 대한 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 3상 4선식 UPS의 droop 병렬운전

2.1 3상 4선식 UPS의 전력계산

3상 4선식 UPS는 그림 1과 같이 크게 정류기부, 인버터부로 구성되어 있다. 정류기부는 DC-link 정전압 제어와 입력전압과 입력전류의 PFC(Power Factor Correction)제어를 하고 인버터부는 상용전원을 출력한다. 일반적으로 정류기부, 인버터부는 서로 독립적으로 제어를 한다[5]. 그러므로 3상 4선식 UPS의 병렬운전은 3상 인버터부의 병렬운전과 동일하다. 그림 2는 UPS의 병렬운전 등가회로를 나타낸다.

그림 3은 3상 4선식 UPS의 병렬운전을 위한 인버터

부 제어 블록도이다. UPS의 출력전압(v_{oa}, v_{ob}, v_{oc}), 출력전류(i_{oa}, i_{ob}, i_{oc}), 필터 인덕턴스 전류(i_{La}, i_{Lb}, i_{Lc})는 전력 제어기의 출력으로 나오는 위상(θ)을 기준으로 하는 회전좌표계를 이용하여 d-q-0 변환을 된다. 여기서 d-q-0 변환식은 식 (1)을 사용한다.

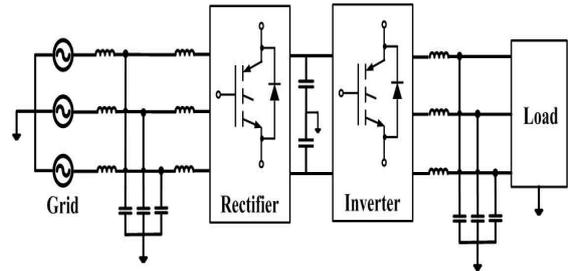


그림 1. 3상 4선식 UPS의 구조
Fig. 1. The structure of the 3-phase, 4-wire UPS

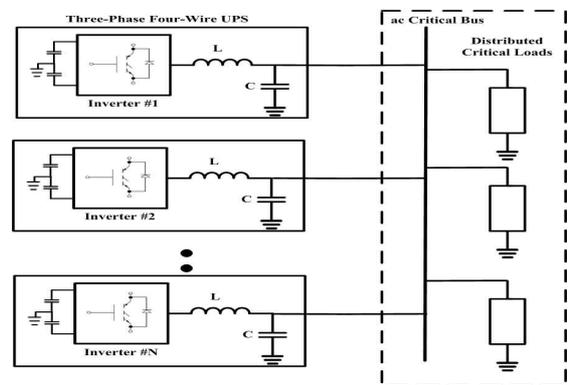


그림 2. 3상 4선식 UPS의 병렬운전 등가회로
Fig. 2. Equivalent Circuit of Parallel operation in the 3-phase, 4-wire UPS

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \\ f_0 \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기서 f_a, f_b, f_c 는 a-b-c 축에서 전압, 전류를 의미하고 f_d, f_q, f_0 는 회전동기좌표계에서의 전압, 전류를 의미한다.

그림 4는 기존의 droop 특성을 이용한 전력 제어기의 제어 블록도를 보여 준다. UPS가 3상 4선식 부하

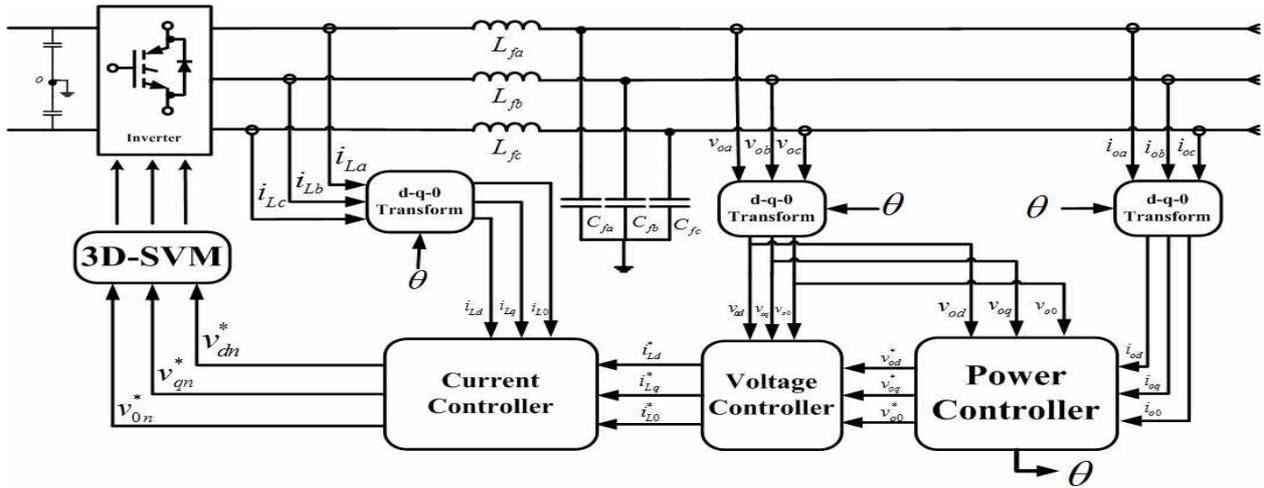


그림 3. droop 제어를 이용한 3상 4선식 UPS의 제어 블록도
Fig. 3. The control block of 3-phase, 4-wire UPS using droop control

에 전달하는 유효전력(\tilde{p})과 무효전력(\tilde{q})은 식 (2), (3)에 의해 각각 계산된다[6].

$$\tilde{p} = v_{od}i_{od} + v_{oq}i_{oq} + v_{o0}i_{o0} \quad (2)$$

$$\tilde{q} = \sqrt{q_d^2 + q_q^2 + q_0^2} \quad (3)$$

여기서 v_{od}, v_{oq}, v_{o0} 는 회전좌표계에서의 출력전압, i_{od}, i_{oq}, i_{o0} 는 회전좌표계에서의 출력전류를 나타내고 q_d, q_q, q_0 는 회전좌표계에서의 무효전력 성분을 나타내고 식 (4), (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_d = v_{oq}i_{o0} - v_{o0}i_{oq} \quad (4)$$

$$q_q = v_{o0}i_{od} - v_{od}i_{o0} \quad (5)$$

$$q_0 = v_{od}i_{oq} - v_{oq}i_{od} \quad (6)$$

계산된 유효전력과 무효전력은 디지털 필터링 후 droop특성을 이용하여 위상(θ)과 출력전압 지령치 ($V_{od}^*, V_{oq}^*, V_{o0}^*$)를 출력한다. 전압 제어기, 전류 제어기는 PI제어기를 사용하였다. 그리고 인버터 상전압 지령치($v_{dn}^*, v_{qn}^*, v_{0n}^*$)는 3D-SVM(Space Vector Modulation)을 통해 구현하였다[7].

2.2 기존의 droop 제어기의 문제점

동기좌표계를 이용한 기존의 droop 제어기는 식 (7), (8)과 같다[8].

$$\omega = \omega_n - m_p P \quad (7)$$

$$V_{od}^* = V_n - n_q Q \quad (8)$$

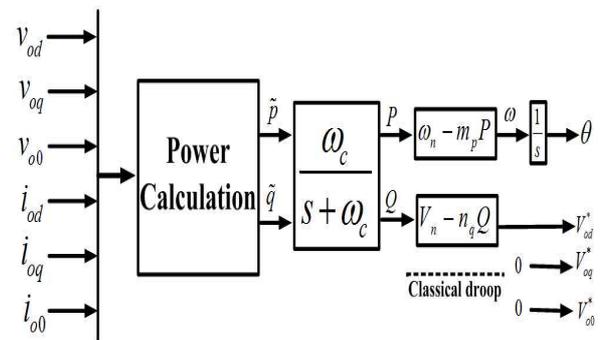


그림 4. 기존의 droop 제어를 적용한 전력 제어기
Fig. 4. Power controller using classical droop control

여기서, ω_n 은 상용주파수, V_n 은 상용전압의 최대값, m_p 는 유효전력에 대한 droop 계수, n_q 는 무효전력에 대한 droop계수를 의미한다. droop 계수는 식 (9), (10)

를 이용하여 선정한다[8].

$$m_p = \frac{\omega_n \times (\%droop)}{P_{max}} \quad (9)$$

$$n_q = \frac{V_n \times (\%droop)}{Q_{max}} \quad (10)$$

UPS의 PnP운전을 하기 위하여 하나의 UPS(UPS1)가 부하 전체를 부담하고 있다면($P_1 > 0, Q_1 > 0$) UPS1의 각주파수와 전압 크기는 각각 ω_n, V_n 보다 작게 된다. 반면에 부하에 연결이 되어 지기 전의 다른 UPS(UPS2)는 부하에 전력을 공급하지 않기 때문에($P_2 = 0, Q_2 = 0$) UPS2의 각주파수와 전압 크기는 ω_n, V_n 값과 같게 된다. 그림 5는 UPS1의 운행 중에 UPS2의 투입직전의 등가회로이다.

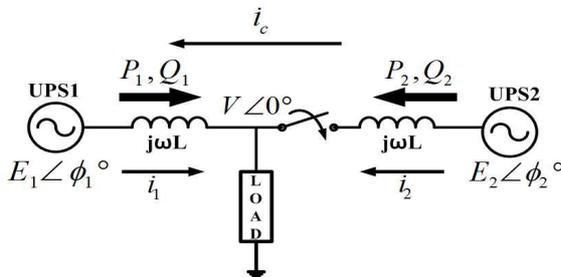


그림 5. UPS1의 운전중에 UPS2의 투입시 등가회로
Fig. 5. Equivalent circuit of injection of UPS2 in operation UPS1

그림 5에서 순환 유효전류(Δi_p)과 순환 무효전류(Δi_q)는 각각 식 (11), (12)로 정의할 수 있다[4].

$$\Delta i_p \cong \frac{E_1 E_2}{V \cdot \omega L} (\phi_2 - \phi_1) \quad (11)$$

$$\Delta i_q \cong \frac{(E_2 - E_1)}{\omega L} \quad (12)$$

PnP 운전 직전에 UPS2의 각주파수는 UPS1의 각주파수보다 빠르기 때문에 ϕ_2 는 ϕ_1 보다 큰 값을 가지게 된다. 그러므로 식 (11)로부터 순환 유효전류가 발생하게 된다. 이렇게 발생하는 순환 유효 전류는 UPS1

의 스위칭 소자, DC link 커패시터의 소손으로 이어질 수 있다[2-3]. 그리고 식 (12)에서는 E_2 가 E_1 보다 크기 때문에 순환 무효전류가 발생하게 된다. 순환무효전류는 UPS의 효율을 낮추게 된다.

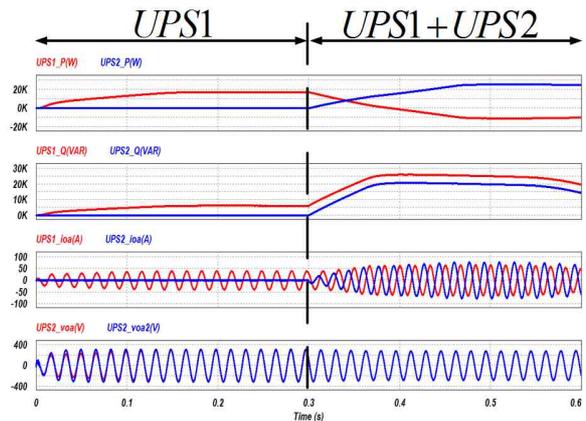


그림 6. 기존의 droop을 적용한 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 유효전력, 무효전력, 출력전류, 출력전압
Fig. 6. Active power, reactive power, output current and output voltage of UPS at PnP operation of UPS using classical droop

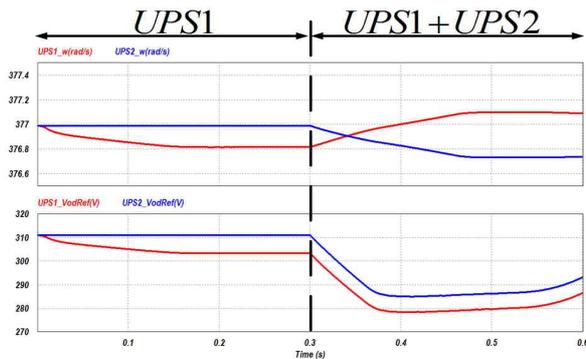


그림 7. 기존의 droop을 적용한 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 각주파수, 출력전압지령치
Fig. 7. Angle frequency and output voltage reference of UPS at PnP operation of UPS using classical droop

그림 6은 기존의 droop을 적용한 UPS1이 동작하고 있을 때, UPS2의 PnP운전시 각 UPS의 유효전력, 무효전력, 출력전류, 출력전압을 나타낸다. 여기서, UPS의 시뮬레이션 파라미터는 표 1을 사용하였다. 그림 6에서 보듯이 기존의 droop 제어기 사용시 각각의 UPS

는 동등한 부하를 분담하지 못하고 UPS1이 전력을 공급하지 못하고 소비하게 된다. 그 기본적인 이유를 그림7이 분명하게 보여주고 있다. 그림 7은 기존의 droop를 적용한 UPS의 PnP운전시 병렬운전 중인 UPS의 각 주파수, 전압 지령치를 나타낸다. 기존의 droop 제어기를 적용한 UPS는 PnP 운전시 주파수와 전압 지령치의 차이로 인해 동등한 부하를 분담하지 못하게 된다.

3. PnP 운전이 가능한 droop 제어기

그림 8은 PnP운전시 UPS의 이상적인 각주파수와 전압 크기지령치의 변동추이를 나타낸다. PnP운전 직전의 UPS1의 각주파수(ω_1)은 UPS2의 각주파수(ω_2)보다 작다. UPS의 병렬운전을 하기 위해서는 각 주파수가 일치해야 하므로 PnP운전시 UPS1의 각주파수는 증가되어야 하고 UPS2의 각주파수는 감소되어야 한다. 한편, UPS1의 전압 크기지령치(V_{od-1}^*)는 UPS2의 전압 크기지령치(V_{od-2}^*)보다 작다. 그러므로 같은 무효전력을 분담하기 위해서는 PnP운전시 UPS1의 전압 크기지령치는 증가되어야 하고 UPS2의 전압 크기지령치는 감소되어야 한다. 이를 실현하기 위해 본 논문에서는 그림 9와 같이 전력변화량에 대한 droop를 추가함으로써 PnP 운전이 가능한 droop제어기를 제안하였다. 제안한 droop식은 식 (13), (14)와 같다.

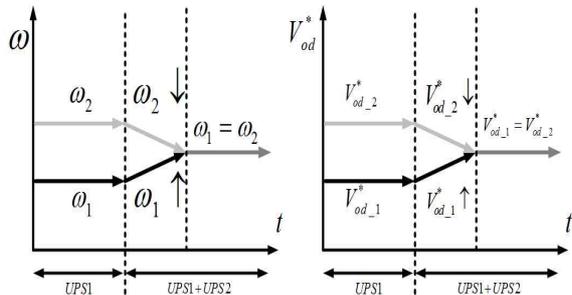


그림 8. PnP운전시 UPS의 이상적인 각주파수와 전압크기지령치 변화
 Fig. 8. Ideal angle frequency and voltage reference change for UPS at the PnP operation

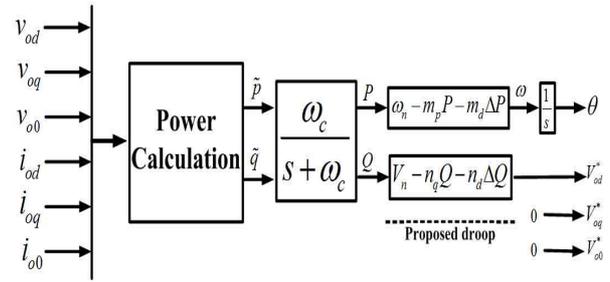


그림 9. 제안한 droop 제어기를 적용한 전력 제어기
 Fig. 9. Power controller using proposed droop control

$$\omega = \omega_n - m_p P - m_d \Delta P \quad (13)$$

$$V_{od}^* = V_n - n_q Q - n_d \Delta Q \quad (14)$$

여기서 m_d 는 유효전력변화량에 대한 droop 계수, ΔP 는 유효전력변화량, n_d 는 무효전력변화량에 대한 droop 계수, ΔQ 는 무효전력변화량을 의미한다. 전력 변화량에 대한 droop를 추가함으로써 UPS의 PnP운전시 UPS1의 각주파수는 증가하고 UPS2의 각주파수는 감소함으로써 최종적으로 각 UPS의 위상을 같게 만들 수 있다. 또한 UPS1의 전압 크기지령치는 증가하고 UPS2의 전압 크기지령치는 감소하게 되어 최종적으로 각 UPS의 전압 크기 지령치도 동일하게 유지시킬 수 있다. 그러므로 각각의 UPS는 동일한 부하를 분담할 수 있게 될 것이다.

4. 시뮬레이션

제안한 동기좌표계 droop 제어기법을 적용한 3상 4선식 UPS 병렬운전과 PnP 운전을 위한 droop 제어기의 타당성을 입증하기 위해 표 1과 같은 UPS 시스템 파라미터를 적용하여 PSIM을 통해 시뮬레이션하였다. 이 때에 인버터의 필터 임피던스는 물리적인 차이를 고려하여 10%로 차이를 두었고 유효전력에 대한 droop 계수값(m_p)은 정격주파수의 0.8% droop값을 선정하였고 무효전력에 대한 droop 계수값(n_q)은 정격전압 최대값의 6% droop값으로 선정하였다. 그리고 모든 부하는 3상 4선식으로 연결되어 있고 Load1, Load2는 평형 부하이고 Load3은 불평형 부하이다.

표 1. UPS 시스템 파라미터
Table 1. UPS System Parameters

	UPS1	UPS2
System capacity	30kVA	30kVA
DC bus volatage	800V	800V
Inductance of filter	2mH	1.8mH
Capacitance of filter	100uF	90uF
ω_n (rad/s)	120π	120π
V_n (V)	$220\sqrt{2}$	$220\sqrt{2}$
m_p	1.005×10^{-5}	1.005×10^{-5}
n_q	1.244×10^{-3}	1.244×10^{-3}
Load 1	R=10Ω, L=10mH	
Load 2	R=25Ω, L=20mH	
Load 3	R1=9Ω, L1=9mH R2=10Ω, L2=10mH R3=11Ω, L3=11mH	
m_d	2.01×10^{-1}	
n_d	1.244×10^{-1}	

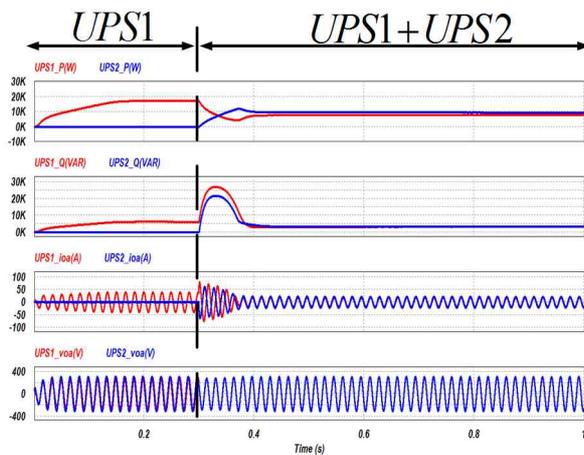


그림 10. 제안한 droop을 적용한 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 유효전력, 무효전력, 출력전류, 출력전압
Fig. 10. Active power, reactive power, output current and output voltage of UPS at PnP operation of UPS using proposed droop

그림 10은 제안한 droop 제어기를 적용한 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 유효전력, 무효전력, a상 출력전류, a상 출력전압을 나타낸다. 부하는 Load1, Load2가 연결되어 있다. 각각의 UPS가 유효전력은 8.75kW, 무

효전력은 3.05kVAR씩 동등한 부하를 분담하고 있다.

표 2. 기존의 droop 제어와 제안한 droop 제어의 성능

Table 2. Performance of the classical droop control and the proposed droop control

	기존의 droop	제안한 droop
순환전류	큼(94.8A)	작음(1.6A)
전압차이	거의 없음(0V)	거의 없음(0V)
유효전력 차이	큼(360kW)	작음(0.9kW)
무효전력 차이	큼(5.3kVAR)	작음(0kVAR)

표 2는 기존의 droop 제어(그림 6)와 제안한 droop 제어(그림 10)의 성능을 보여준다. 제안한 droop 알고리즘은 기존의 droop 제어와 비교하였을 때 순환전류가 작고 부하에 거의 동등한 전력을 공급해 준다.

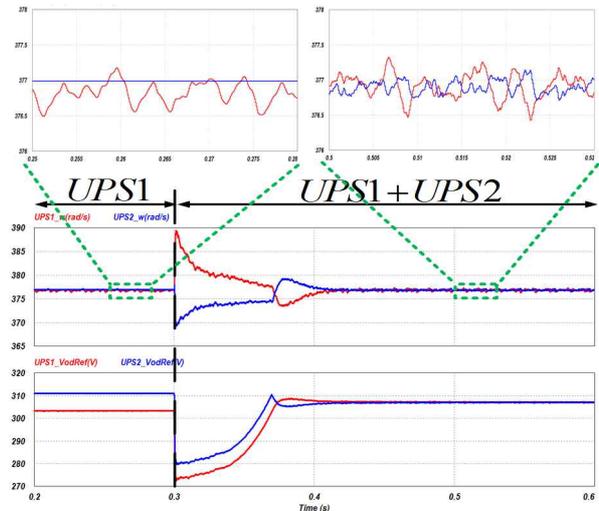


그림 11. 제안한 droop을 적용한 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 각주파수, 출력전압지령치
Fig. 11. Angle frequency and output voltage references of UPS when the proposed droop is employed for PnP operation

그림 11은 UPS의 PnP 운전시 각 UPS의 각주파수, 전압크기지령치의 변화를 보여준다. UPS2의 투입시 UPS1의 각주파수는 증가하고 UPS2의 각주파수는 감소한다. 결국 UPS1의 각주파수와 UPS2의 각주파수가 일치하게 되어 동등한 부하분담이 이루어진다. 또

한 UPS1의 전압크기지령치는 과도 상태 후 증가하게 되고 UPS2의 전압크기지령치는 감소하게 되어 동등한 무효전력을 분담하게 된다. 이 결과는 그림 8에서 제시한 제어동작과 일치함을 분명하게 보여주고 있다.

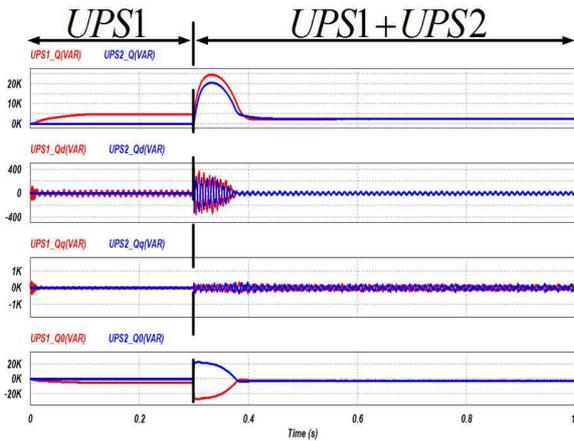


그림 12. 평형 부하(Load1)상태에서 PnP운전시 각 UPS의 무효전력, d축 무효전력, q축 무효전력, 0축 무효전력
 Fig. 12. Reactive power, d-axis reactive power, q-axis reactive power, 0-axis reactive power of each UPS at PnP operation on Load1

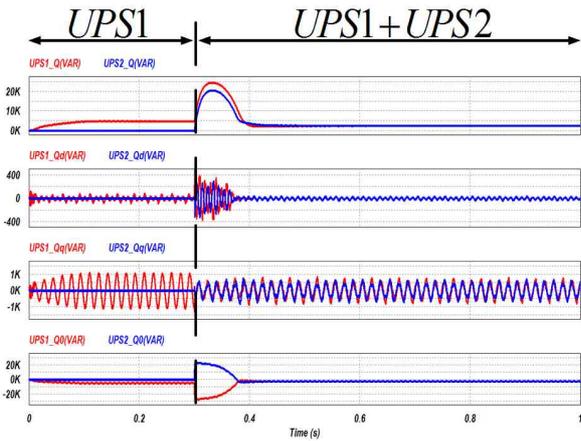


그림 13. 불평형 부하(Load3)상태에서 PnP운전시 각 UPS의 무효전력, d축 무효전력, q축 무효전력, 0축 무효전력
 Fig. 13. Reactive power, d-axis reactive power, q-axis reactive power, 0-axis reactive power of each UPS at PnP operation on Load3

각 UPS의 주파수, 전압이 제안한 알고리즘에 의해서 서로 동일하게 제어됨으로써, 이상적인 병렬운전이 실현될 수 있음을 보여주고 있다.

그림 12는 평형 부하(Load1)상태에서 PnP운전시 각 UPS의 무효전력, d축 무효전력, q축 무효전력, 0축 무효전력을 나타낸다. 정상 상태에서 d축, q축 무효전력 성분은 거의 0이고 0축 무효전력 성분만이 존재하게 된다. 또한 PnP운전시 d축 무효전력성분이 과도 상태에서 증가함을 보여준다.

그림 13은 불평형 부하(Load3)상태에서 PnP운전시 각 UPS의 무효전력, d축 무효전력, q축 무효전력, 0축 무효전력을 나타낸다. 정상상태에서 d축 무효전력 성분은 거의 0이고, q축, 0축 무효전력 성분이 나타난다. 그리고 과도상태에서 d축 무효전력성분이 발생하게 된다.

그림 14는 UPS1과 UPS2가 Load1에 대해 동등한 부하 분담을 하는 중에 Load2만큼 부하가 증가되었을 때, 각 UPS의 유효전력, 무효전력, 출력전류, 출력 전압을 보여주고 있다. 부하가 증가하여도 UPS1과 UPS2는 동등한 부하를 분담하고 있다.

5. 결 론

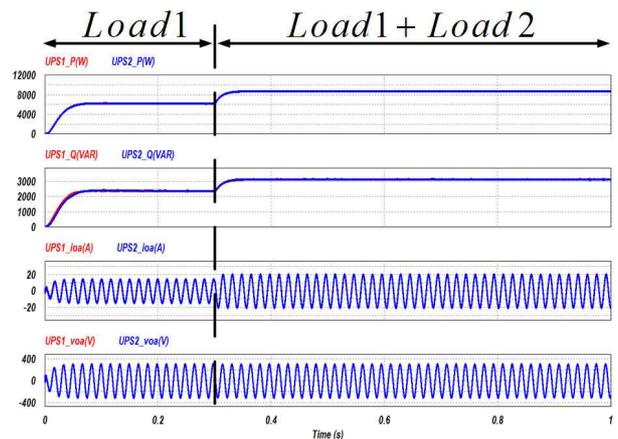


그림 14. 부하변동(Load1→Load1+Load2)시 각 UPS의 유효전력, 무효전력, 출력전류, 출력전압
 Fig. 14. Active power, reactive power, output current and output voltage of each UPS at Load variations(Load1→ Load1 + Load2)

본 논문은 droop 제어를 적용한 3상 4선식 UPS의 병렬 제어 알고리즘을 제안하고 기존의 droop 제어를 적용한 UPS의 PnP 운전시 순환전류가 흐르는 문제점을 분석하고 PnP 운전이 가능한 새로운 droop 제어를 제안하였다. 그리고 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 PSIM 시뮬레이션을 통해 PnP 운전시 부하가 각각의 UPS가 출력전류의 크기와 위상이 동일하고 동등한 부하분담이 이뤄지는 것을 확인하였다.

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술 연구비(일부) 지원으로 수행되었습니다.

References

- [1] W. C. Lee, D. S. Hyun, "A Master and Slave Control Strategy for Parallel Operation of Three-Phase UPS Systems with Different Ratings", Journal of the Korean Institute Power Electronics, vol 9, no 6, pp. 341-349, Aug. 2004.
- [2] W. J. Choi, H. J. Jong, "Design of the Fuel Cell Powered Line-Interactive UPS System", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineer, vol. 18, no. 6, pp. 205-212, Nov. 2004.
- [3] J. M. Guerrero, L. García de Vicuña, and J. Uceda, "Uninterruptible power supply systems provide protection," IEEE Ind. Electron. Mag., vol. 1, no. 1, pp. 28 - 38, 2007.
- [4] J. M. Guerrero, L. Hang, and J. Uceda, "Control of distributed uninterruptible power supply systems," in IEEE Trans. Ind. Electron., Aug. 2008, vol. 55, no. 8, pp. 2845-2859, 2008.
- [5] E.-H. Kim, J.-M. Kwon, J.-K. Park, and B.-H. Kwon, "Practical control implementation of a three- to single-phase online UPS," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 55, no. 8, pp. 2933 - 2942, 2008.
- [6] R. S. Herrera and P. Salmerón, "Instantaneous reactive power theory: A comparative evaluation of different formulations," IEEE Trans. Power Del. vol. 22, no. 1, pp. 595 - 604, Jan. 2007.
- [7] M. G. Villalva and E. R. Filho, "3-D space vector PWM for three leg four-wire voltage source inverters," in Proc. IEEE PESC, pp. 3946 - 3951, 2004.
- [8] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. Green, "Modeling, analysis and testing of autonomous operation of an inverter-based microgrid," IEEE Trans. Power Electron., vol. 22, no. 2, pp. 613-625, Mar. 2007.

◆ 저자소개 ◆



김현섭 (金賢燮)

1986년 3월 31일생. 2011년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2011~2013년 동 대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업(석사).

E-Mail : khseob@seoultech.ac.kr



한정호 (韓廷虎)

1984년 11월 3일생. 2008년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학교 철도전문대학원 철도전기신호공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 박사과정.

E-Mail : hanston@seoultech.ac.kr



송중호 (宋重鎬)

1957년 1월 30일생. 1980년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(박사). 1995~1996년 미국 위스콘신대 초빙연구원. 1982~1985년 이화전기 기술개발부. 1985~2002년 한국과학기술원 지능제어연구센터 책임연구원. 2002년~현재 서울과학기술대학교 전기정보공학과 교수.

E-Mail : joongho@seoultech.ac.kr