

고립된 계통에서 인버터 병렬운전 시 선로 임피던스의 특성에 따른 유·무효전력 변동 분석

최형진*, 송승호*, 김광섭**, 김형수**

*광운대학교 전기공학과, **(주)포스콘 기술연구소

Analysis of Active and Reactive Power Variation according to Line Impedance Characteristics for Inverter Parallel Operation in an Isolated Grid

Hyeong-Jin Choi*, Seung-Ho Song*, Kwang-Seob Kim**, Hyeong-Su Kim**

*Dept. of Electrical Engineering, Kwangwoon University, **POSCON Corporation R&D Center

ABSTRACT

두 대 이상의 전원이 부하를 분담하는 경우 전원간의 통신이 없다면 여러 가지의 오차요인으로 인하여 문제가 생길 수 있다. 그래서 기존의 발전기 시스템은 이런 문제를 해결하기 위하여 droop제어를 수행하고 있다. 이와 마찬가지로 분산전원의 용량이 커짐에 따라 2대 이상의 분산전원이 병렬운전하여 고립된 계통에서 부하를 분담해야하는 경우 이들 간 통신이 없다면 문제가 된다. 그러나 발전기와는 달리 분산전원은 저압선로에서 전력을 공급하기 때문에 선로의 임피던스 특성에 따른 유·무효전력의 변동에 대한 분석이 필요하다.

본 논문에서는 분산전원의 병렬운전 시의 오차요인 계산하고 선로에 임피던스에 따른 유·무효전력의 변동을 분석하여 이를 시뮬레이션을 통하여 확인하고 저압선로에서의 분산전원 droop제어 방법에 대해서 연구하였다.

1. 서론

화석에너지의 고갈과 환경문제로 인하여 풍력, 태양광, 연료전지 등 신재생에너지의 모든 분산전원은 급격한 증가를 보이고 있다. 용량의 대형화를 위하여 사용되고 있는 병렬운전에서는 각 인버터 사이에서 발생하는 순환전류의 제거가 핵심기술이며 이를 구현하기 위해서는 별도의 부하분담 알고리즘이 필요하다. 지금까지 연구된 병렬운전 알고리즘은 대표적으로 인버터 사이에 발생하는 전력편차를 주고받는 집중식 병렬제어 방식, 전압제어와 전류제어의 인버터를 결합한 마스터-슬레이브 방식, 그리고 주파수 및 출력전압 수하특성(droop)을 이용한 Wireless 병렬제어 방식으로 나눌 수 있다.^[1-4]

고립된 계통에서 하나에 부하에 일정한 전압을 유지해 주어야 하는 경우에 단위용량의 분산전원시스템의 내부의 병렬운전에는 통신을 이용한 Master-slave 제어를 사용하여 정확한 제어가 가능하지만 이러한 서로 다른 2대 이상의 분산전원시스템이 큰 부하를 분담하여 전력을 공급해야하는 경우에는 두 시스템간의 통신이 없기 때문에 droop제어가 꼭 필요하다.^[1-4]

본 논문에서는 고립된 계통에서 두 대 이상의 분산전원 시스템이 하나에 부하에 아무런 통신 없이 병렬운전하고 있을 때 생길 수 있는 오차요인을 분석하고 오차요인에 따른 유무효전력의 변동을 확인 하였다. 또한 선로의 특성에 따른 유·무효전력의 변동을 분석을 통하여 적절한 제어방법을 확인하고 이를 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

2. 고립된 계통에서 분산전원 병렬운전 시 오차 요인 분석

고립된 계통에서 두 대의 인버터시스템이 전압제어를 통하여 하나의 부하를 분담하고 있는 경우는 그림 1과 같은 간략화된 회로로 나타낼 수 있다.

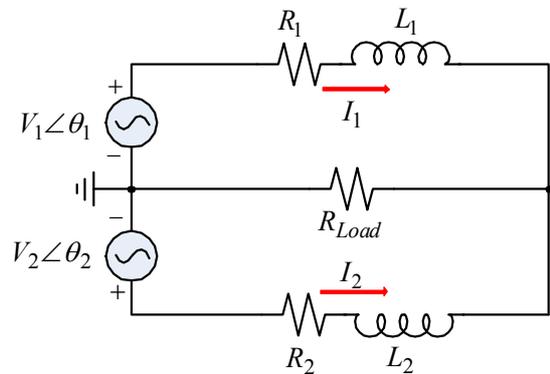


그림 1 병렬 인버터시스템의 간략화된 블록도

Fig.1 Simplified block diagram of parallel inverter system

그림 1에서 확인 할 수 있듯이 두 대의 인버터 시스템의 전압의 크기와 위상각을 V_1 과 V_2 그리고 θ_1 과 θ_2 로 나타낼 수 있다. 전압제어를 수행하는 경우 출력 주파수는 60Hz로 만들어서 제어를 하기 때문에 주파수의 오차는 없고 위상각의 차이 $\Delta\theta$ 만이 생길 수 있다고 가정한다. 또한 두개의 인버터시스템이 부담하고 있는 부하는 저항으로 가정하였다.

각각의 전압과 위상각의 차이가 유·무효전력에 어떤 영향을 미치는지를 간략하게 수식으로 표현해 보면 아래와 같다.

$$V_1 \angle \theta_1 = (R_1 + j\omega L_1) \cdot I_1 + R_L \cdot (I_1 + I_2) \quad (1)$$

$$V_2 \angle \theta_2 = (R_2 + j\omega L_2) \cdot I_2 + R_L \cdot (I_1 + I_2)$$

(1)을 다시 전류에 대해서 정리하면 (2)와 같이 정리가 가능하다.

$$V_1 \angle \theta_1 = (R_1 + R_L + j\omega L_1) \cdot I_1 + R_L \cdot I_2 \quad (2)$$

$$V_2 \angle \theta_2 = R_L \cdot I_1 + (R_2 + R_L + j\omega L_2) \cdot I_2$$

(2)를 Matrix형태로 표현하면 아래와 같이 표현이 가능하고 이를 이용하여 두개의 분산전원 시스템의 전류와 전압사이의 관계를 알 수 있다.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = A \cdot \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\text{Where, } A = \begin{bmatrix} j\omega L_1 + R_1 + R_L & R_L \\ R_L & j\omega L_2 + R_2 + R_L \end{bmatrix}$$

여기서 출력전압은 우리가 만들어 내는 것이기 때문에 오차가 없다고 가정하고 전압의 위상차이($\Delta\theta$)가 있다고 가정하여 전류에 대해서 (3)을 다시 표현하면 (4)와 같다.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = A^{-1} \cdot \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \angle \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

전류가 계산되어지면 전압과 전류를 이용하여 두 대의 인버터 시스템의 전압의 크기의 차이와 위상각의 차이에 따른 유·무효전력을 계산할 수 있다. 이는 (5)와 같이 표현 될 수 있으며 선로의 임피던스에 의해서 달라질 수 있는데 아래의 표 1은 선로의 종류에 따른 저항값과 임피던스값을 나타내고 있다.

$$S_1 = V_1 I_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (5)$$

$$S_2 = V_2 I_2^* = P_2 + jQ_2$$

표 1 선로타입에 따른 임피던스 특성

Table 1 Impedance Characteristics according to type of line

Type of line	$R_i(\Omega/\text{Km})$	$L_i(\Omega/\text{Km})$	L_i/R_i
Low voltage line	0.642	0.083	7.7
Medium voltage line	0.161	0.190	0.85
High voltage line	0.06	0.191	0.31

고압선로에서는 R/X 비율이 0.31로 즉 R에 비하여 L이 매우 크며, 거의 L성분으로 가정할 수 있으며 저압선로로 갈수록 R 성분이 커지는 것을 확인할 수 있다. 위에 (4)와 (5)를 이용하여 위상각의 차이는 없다고 가정하고 선로임피던스에 차이에 따른 전압에 크기에 따른 유·무효전력의 변화를 계산하여 보면 아래의 그래프와 같이 나타날 수 있다.

먼저 10Km의 선로를 가정하여 두개의 전원의 위상 차이는 없고 V_1 의 전압의 크기는 220V로 고정시켜 놓고 V_2 의 전압의 크기를 변경시키면서 $\Delta V = |V_2| - |V_1|$ 에 따른 유·무효전력의 변화를 살펴보면 아래의 그림 2, 그림 3과 같다.

전압의 크기의 오차가 생기게 되면 순환전류가 발생하게 되어 유·무효전력의 차이가 나타나게 되는데 저압선로와 고압선로에서의 유·무효전력의 변동의 추세가 다를 수 있다.

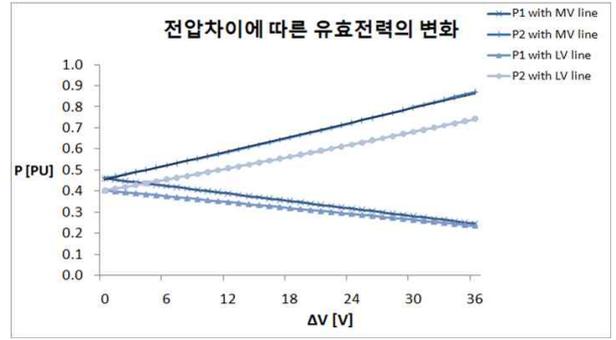


그림 2 전압차이에 따른 유효전력의 변동
Fig.2 Variation of active power according to voltage magnitude difference

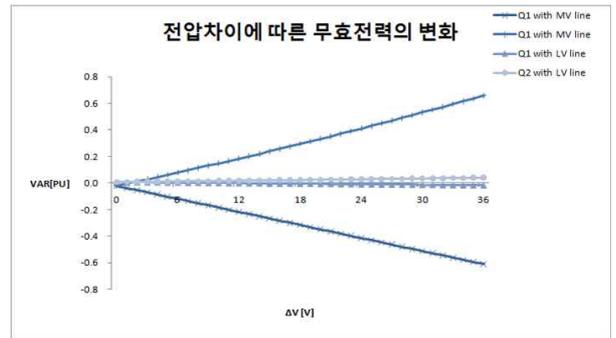


그림 3 전압차이에 따른 무효전력의 변동
Fig.3 Variation of reactive power according to voltage magnitude difference

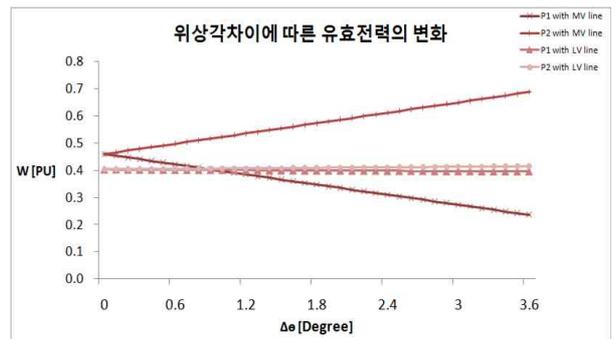


그림 4 위상각 차이에 따른 유효전력의 변동
Fig.4 Variation of active power according to phase angle difference

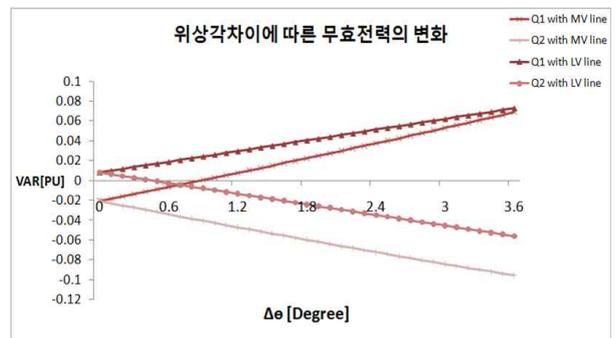


그림 5 위상각 차이에 따른 무효전력의 변동
Fig.5 Variation of reactive power according to phase angle difference

고압선로에서는 전압의 크기의 변동 시에 유효전력 변동량에 비하여 무효전력 변동량이 더 크므로 일반적인 발전기의 무효전력-전압 수하특성을 그대로 이용한 droop제어가 효율적이지만 저압선로에서는 무효전력의 변동량이 유효전력에 비하여 매우 작음을 확인할 수 있다. 이 경우에는 기존의 발전기의 수하특성과는 달리 유효전력을 이용하여 전압의 droop제어를 수행하는 것이 조금 더 바람직한 제어방법임을 확인할 수 있다.

마찬가지로 10Km의 선로를 가정하여 두개의 전원의 크기는 220V로 고정시켜 놓고 V_2 의 초기 위상각의 차이를 변경시키면서 ΔV 에 따른 유·무효전력의 변화를 살펴보면 그림 4, 그림 5와 같다.

고압선로에서는 위상각의 차이가 증가 할수록 무효전력 변동량에 비하여 유효전력 변동량이 더 크므로 일반적인 발전기의 유효전력-주파수(위상각) 수하특성을 그대로 이용한 droop제어가 효율적이지만 저압선로에서는 유효전력의 변동량이 무효전력에 비하여 매우 작음을 확인할 수 있다. 이 경우에는 기존의 발전기의 수하특성과는 달리 무효전력을 이용하여 주파수의 droop제어를 수행하는 것이 조금 더 바람직한 제어방법임을 확인할 수 있다. 선로임피던스의 특성에 따른 유·무효전력변동과 전압 주파수의 관계를 살펴보면 아래의 표 2와 같이 정리가 가능하다.

표 2 선로에 따른 droop 제어 방법
Table 2 Method of droop control according to line

고압선로	저압선로
$P_{fbk} \uparrow \rightarrow f_{ref} \downarrow$	$Q_{fbk} \uparrow \rightarrow f_{ref} \uparrow$
$Q_{fbk} \uparrow \rightarrow V_{ref} \downarrow$	$P_{fbk} \uparrow \rightarrow V_{ref} \downarrow$

즉 전압크기의 차이와 위상각의 차이는 유·무효전력의 변동을 야기하는데 선로의 임피던스 특성에 따라 상대적인 변동량이 다르기 때문에 저압선로에서는 고압선로와는 다른 제어가 필요하다.

3. 시뮬레이션

이의 동특성을 확인하기 위하여 Psim으로 두 대의 분산전원 인버터를 구현하여 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 아래의 표 3를 사용하였다.

표 3 시뮬레이션 파라미터
Table 3 Simulation Parameters

Sampling Time	125[usec]
R_1, R_2	6.42[Ω]
L_1, L_2	2.201592[mH]
R_L	32.2666[Ω]
K_{V_Droop}	4[%]
K_{f_Droop}	0.5[%]

그림 6은 저압선로에서 기존발전기의 droop방법을 이용한 제어방법을 사용 하였을 때의 동특성을 보여주며, 그림 7은

저압선로에서 제안된 인버터 제어 droop방법을 이용한 동특성이다. 0.5초에서 위상각 오차는 0.5°, 전압오차는 5V를 주었으며 Droop제어는 1초에서 시작하였다.

그림에서 확인 할 수 있듯이 저압선로에서는 제안된 인버터 제어 droop방법의 동특성이 개선되었으면 확인할 수 있다.

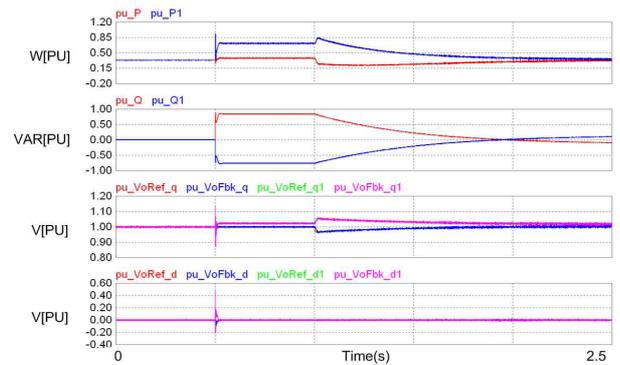


그림 6 저압선로에서 기존 droop제어의 동특성
Fig.6 Dynamics of convention droop control with LV line

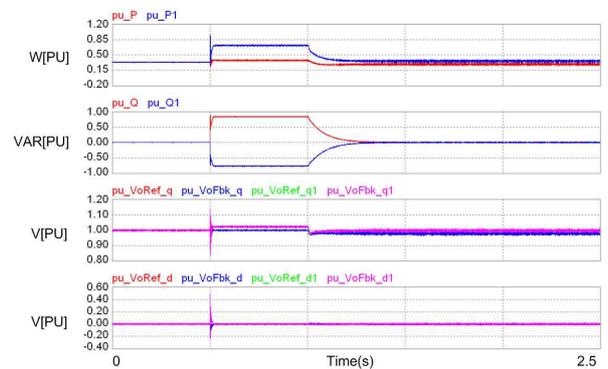


그림 7 저압선로에서 제안된 droop제어의 동특성
Fig.7 Dynamics of proposed droop control with LV line

4. 결 론

본 논문에서는 선로의 임피던스에 따른 오차요인이 유·무효전력의 변동에 어떤 영향을 미치는 지를 분석하고 이를 이용한 저압선로에서의 분산전원의 droop제어 방법에 대해서 제안하였다. 전압선로에서는 선로에 임피던스로 인하여 유·무효전력의 변동이 고압선로와 달라지기 때문에 기존의 발전기의 수하특성과는 다른 제어가 필요하여 이를 시뮬레이션을 통하여 과도상태의 응답성이 좋아짐을 입증하였다.

감사의 글

본 연구는 기초전력연구원 과제인 3kw급 시뮬레이터를 이용한 분산전원의 연계운영 기초기술개발(과제번호 : R-2007-1-015-01)의 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Irving, B.T., Jovanovic, M.M., "Analysis, design, and performance evaluation of droop current-sharing method" Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE Volume 1, 6-10 Feb. 2000
- [2] Koo, T.G., Byun, Y.B., Joe, K.Y., Seo, J.I., Kim, D.H., Kim, C.U., "Wireless parallel operation control of a two-module UPS system for equivalent load sharing" Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE Volume 4, 22-28 Oct. 2000
- [3] Serban, E., Ngosi, M., Monk, T., "Parallel operation of multi-mode Voltage Source Inverter modules with equal load sharing in single phase AC systems", Optimization of Electrical and Electronic Equipment, 2008. OPTIM 2008. 11th International Conference on 22-24 May 2008
- [4] 조준석, 한재원, 최규하, "독립제어구조를 갖는 N+1 모듈형 UPS 시스템의 병렬운전" 전력전자학회, 전력전자학술대회 논문집 전력전자학회 2002년 학술대회논문집, 2002. 7, pp. 734 ~ 738 (5pages)