

# 철도 차량용 보조전원장치의 병렬 운전을 위한 가상 임피던스 기반의 드롭 제어

안창균\*, 최봉연\*, 강진욱\*, 강경민\*, 이훈\*, 원충연\*  
성균관대학교\*

## A Modified Droop Control Method for Parallel Operation in Railway Auxiliary Power Supply Based on Virtual Impedance

Chang-Gyun An\*, Bong-Yeon Choi\*, Jin-Wook Kang\*,  
Kyung-Min Kang\*, Hoon-Lee\*, Chung-Yeon Won\*  
Sungkyunkwan University\*

### ABSTRACT

This paper explores the power distribution problem of parallel-connected inverter system which supplies auxiliary power for railway facilities. We propose a droop control method which facilitates power distribution and restrain of voltage drop by tracking the average power control command by adjusting the virtual impedance. The performance of proposed droop method is verified by the PSIM simulation.

### 1. 서론

철도 차량용 보조전원장치(Auxiliary Power Supply)는 그림 1과 같이 DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터로 구성된 모듈이 병렬로 연결되어 사용된다. 이때 APS 출력단의 선로 임피던스 불균형은 순환전류 발생 및 유·무효전력 분담의 오차를 가져온다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 가상 임피던스 기반의 드롭 제어에 관한 연구가 선행되었다. 하지만 가상 임피던스의 추가는 출력 전류가 큰 대용량 시스템의 경우 부하 출력단에 큰 전압 강하를 유발하여 설정된 정격 동작 전압 범위를 벗어 나게 된다.

따라서, 본 논문에서는 가상 임피던스로 인한 전압강하를 줄이고 병렬로 연결된 인버터의 균등한 전력 분담을 위한 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어 기법을 제안한다. 제안하는 드롭 제어 기법은 차량용 MVB통신 라인을 이용하여 각 APS의 출력 전력을 수집하고, 출력 전력이 전체 시스템의 평균 출력 전력에 추종하도록 가상 임피던스값을 제어한다. 제안하는 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어는 PSIM 시뮬레이 션을 통해 타당성을 검증하였다.

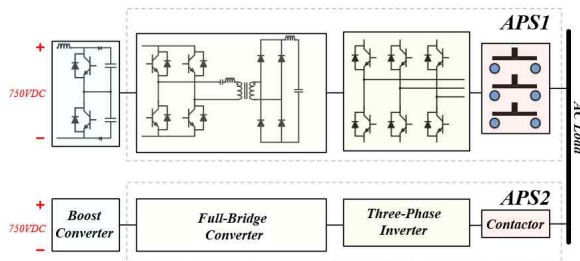


그림 1 철도 차량용 보조전원 장치의 구성  
Fig. 1 Configuration of APS for railway vehicles

### 2. 본론

#### 2.1 가상 임피던스 기반의 드롭 제어

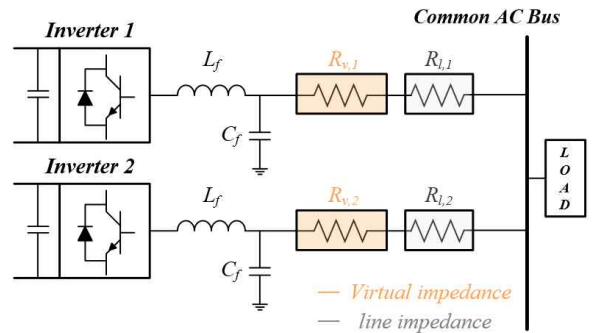


그림 2 가상 임피던스가 추가된 병렬 인버터의 등가회로  
Fig. 2 Equivalent circuit of parallel-inverters with virtual impedance

기존의 드롭 제어를 통해 병렬 연결된 APS를 제어하는 경우 인버터 출력단의 선로 임피던스 불균형으로 인하여 유·무효 전력 분담의 오차가 발생할 수 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 선로 임피던스보다 큰 가상의 임피던스를 추가하는 가상 임피던스 기반의 드롭 제어가 제안되었다. 선로 임피던스의 성분이 저항성인 경우, 가상 임피던스가 추가된 병렬 인버터의 등가회로를 나타내면 그림 2와 같다.  $R_{l,n}$ ,  $R_{v,n}$ 는 각각 n번째 인버터의 선로 임피던스와 가상 임피던스를 나타낸다.

$$E_n^* = E_{nom} - D_E P_n - (I_n R_{v,n}) \quad (1)$$

$$\frac{R_{l,1} + R_{v,1}}{R_{l,2} + R_{v,2}} \square 1 \quad (2)$$

식 (1)은 선로 임피던스에 저항 성분이 지배적인 경우, 가상 임피던스 추가로 인한 전압 드롭 식을 나타낸다. 식 (2)는 추가된 가상 임피던스로 인하여 병렬 연결된 인버터의 합성 임피던스가 평형을 이룸을 나타낸다. 식 (2)와 같이 선로 임피던스의 불균형에도 가상 임피던스를 추가하여 병렬 연결된 인버터의 합성 임피던스를 평형으로 근사화하기 위해서는 큰 가상 임피던스값을 요구한다. 이러한 가상 임피던스 성분은 식 (2)의  $I_n R_{v,n}$  성분으로 전압 강하를 유발하게 된다. 특히, 출력 전류가 큰 시스템의 경우, 이러한 가상 임피던스 기반의 드롭 제어시 발생하는 전압 강하는 부하에서 요구하는 정격 전력보다

낮은 전력을 출력하는 문제를 초래한다.

## 2.2 제안하는 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어

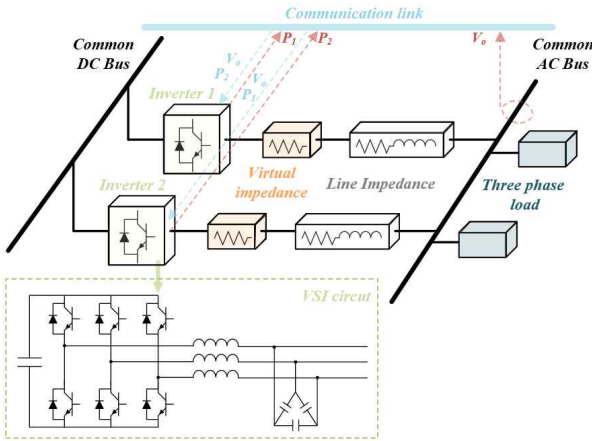


그림 3 제안하는 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어 다이어그램

Fig. 3 Proposed droop control diagram with virtual impedance communication

기존의 가상 임피던스가 갖는 큰 전압 강하의 문제 없이 균등한 유효전력 분담을 위하여, 본 논문에서는 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어를 제안한다. 그림 3은 제안하는 드롭 제어의 다이어그램을 나타낸다. 병렬 연결된 인버터는 각각의 제어기를 통해 계산된 유효전력값을 통신망으로 송신하고, 다른 인버터의 유효전력값과 측정된 부하 공통단의 전압( $V_o$ )을 수신받게 된다. 이렇게 수신된 정보를 바탕으로 각 인버터의 동등한 전력 분담을 위해 최적의 가상 임피던스 값을 추종하도록 제어한다.

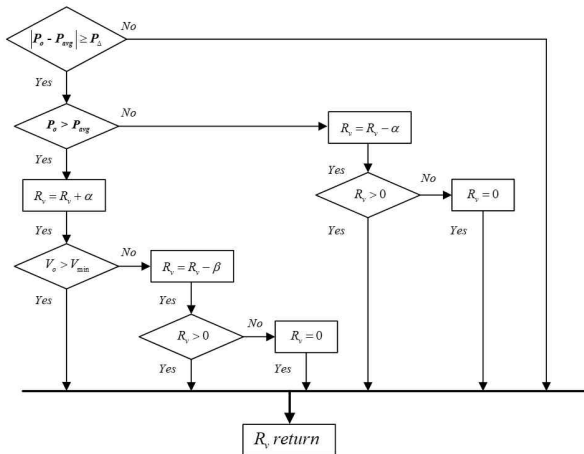


그림 4 제안하는 가상 임피던스 추종 기법

Fig. 4 Proposed method of virtual impedance tracking

그림 4는 제안하는 가상 임피던스 추종 기법으로 통신망을 통해 수신된 정보를 이용해 알고리즘이 구성된다.  $P_o$ 와  $P_{avg}$ 는 각각 제어하는 인버터의 유효전력값과 병렬 연결된 인버터의 유효전력 평균을 의미한다.  $P_{\Delta}$ 는 제어 알고리즘 동작을 필요로 하는 최저 유효전력차를 의미한다. 유효전력차가 설정된  $P_{\Delta}$ 값 이상이 되면  $P_o$ 와  $P_{avg}$ 의 비교를 통해 가상 임피던스 값을 제어하게 된다. 이 때  $\alpha$ 와  $\beta (> \alpha)$ 는 가상 임피던스 조정을 위한 작은 값의 상수를 나타내고  $V_{min}$ 은 부하에서 요구

하는 최소 정격전압을 의미한다.  $V_o > V_{min}$ 과  $R_v > 0$ 의 조건을 통해 제안하는 알고리즘이 전압강하를 최소화하며 균등한 유효전력을 분담할 수 있도록 하였다.

## 3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어의 타당성을 검증하기 위하여 PSIM 시뮬레이션을 진행하였다. 제안하는 드롭 시뮬레이션을 위한 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 제안하는 드롭 시뮬레이션 파라미터

Table 1 Per unit values of the proposed droop simulation

Parameter	Value	Unit
Input voltage	750	V
Rated Output Power	120	kVA
Load Power Factor	0.85	PF
APSI, 2 line impedance	100   50	mΩ
L, C filter	1.5   150	mH   uF

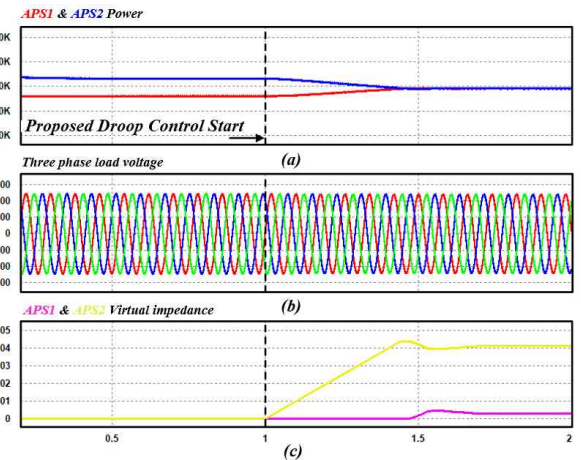


그림 5 제안하는 드롭 제어 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Proposed droop control simulation results

그림 5는 제안하는 드롭 제어 시뮬레이션의 결과 파형으로 기존의 가상 임피던스 드롭 제어를 1초간 진행한 뒤 제안하는 드롭 제어를 적용하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5(a)는 두 모듈의 유효전력 파형으로 1초 이후부터 유효전력이 균등히 분배됨을 확인할 수 있다. 5(b)는 큰 전압강하 없이 부하 공통 전압이 출력됨을 알 수 있다. 5(c)는 가상 임피던스 추종 기법이 적용된 가상 임피던스 파형으로 유효전력 분담을 위한 최적의 가상 임피던스값을 추종함을 나타낸다.

## 4. 결론

본 논문에서는 가상 임피던스 드롭 제어의 큰 전압강하 문제를 해결하기 위하여 가상 임피던스 통신 기반의 드롭 제어를 제안하였다. 제안된 가상 임피던스 추종 기법을 통해 병렬 연결된 인버터의 유효전력이 순시적으로 균등히 제어됨을 PSIM 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

## 참고 문헌

- [1] P. Rodriguez, I. Candela, C. Citro, J. Rocabert and A. Luna, "Control of grid-connected power converters based on a virtual admittance control loop," *2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)*, Lille, 2013, pp. 1-10.