

# 약계통에 연계된 인버터 기반 전원의 역상분 전류 주입 크기에 따른 전압 불평형률 분석

김우현, 송승호  
 광운대학교 전기공학과

## Analysis of Grid Voltage Unbalance Factor due to Negative Sequence Current Injection from Inverter-Based Resources Connected to Weak Grid

Woo-Hyun Kim, Seung-Ho Song  
 Department of Electrical Engineering, Kwangwoon University, Seoul, Korea

### ABSTRACT

기존의 인버터 기반 전원에서는 일반적으로 계통을 기준으로 정상분 전류만을 공급한다. 그러나 전압 안정화, 하모닉 제거, 또는 계통의 임피던스 추정과 같은 작업을 수행할 때에는 역상분 전류 주입이 필요하다. 역상분 전류 주입 시, PCC(Point of Common Coupling) 지점에서 전압 불평형이 발생하는데, 이는 전력 품질 저하, 전력 손실 증가, 그리고 전력 계통의 안정성 감소와 같은 문제를 초래할 수 있다. 특히 SCR(Short Circuit Ratio)이 현저히 낮은 약계통에서 이러한 상황이 발생할 경우, 동일한 전류 값에도 큰 전압 불평형이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 SCR이 낮은 약계통에서의 역상분 전류 주입 상황을 모의하고, 이때 발생하는 전압 불평형이 국내 송배전용전기설비 이용규정에 제시된 전압 불평형률 3%를 넘지 않도록 제한하는 알고리즘을 제안한다. 역상분 전류 주입시 PCC지점의 전압 불평형률을 계산하여 일정 수준을 넘지 않도록 역상분 전류의 크기를 점진적으로 증가시키는 알고리즘을 제안하였고 다양한 조건의 약계통 임피던스 상황을 모의한 시뮬레이션으로 제안된 알고리즘을 검증하였다.

### 1. 서론

신재생 에너지 발전 단지가 증가함에 따라 전력 계통에 인버터 기반 전원의 수가 점차 증가하고 있다. 특히 도서지역이나 외딴 지역 등 약계통에 전력을 공급하는 경우, 계통 임피던스의 크기가 인버터 출력단 필터의 임피던스에 비해 무시할 수 없을 만큼 커져서 전류 제어기의 안정성이나 응답 특성에 미치는 영향이 커지고 제어 불안정 발생의 원인이 될 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 계통 임피던스를 추정하려는 노력이 있다. 그 중 하나가 역상분 전류 주입을 이용한 계통 임피던스 추정 방식<sup>[1]</sup>이며 기존 연구는 역상분 전류 주입량을 계통 임피던스와 상관없이 일정하게 유지하는 문제점이 있었다.

하지만, 역상분 전류 주입은 전력 시스템에서 전류의 평형상태를 깨뜨리고, 이는 PCC 지점 전압의 불평형을 초래하게 된다. 특히, SCR이 작은 약계통일 경우, 적은 전류량에도 전압의 변화가 크게 일어나게 된다. 이러한 전압의 불평형은 부하에 전원을 공급할 때 문제가 된다. 전동기 부하의 경우 기계 손실과 온도를 증가시키게 된다.<sup>[2]</sup>

따라서 국내 송배전용전기설비 이용규정에서는 저압의 경우 전압 불평형률을 3% 이내로 유지하도록 하고 있다. 본

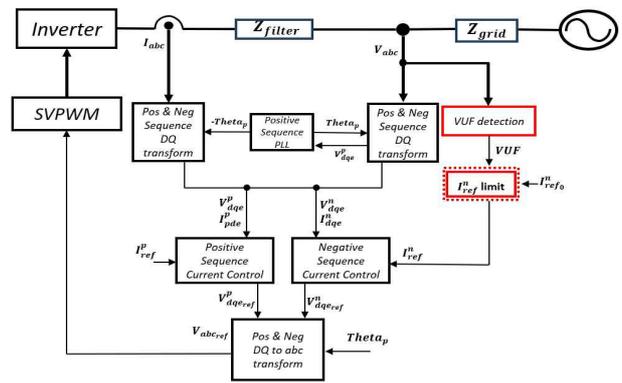


그림 1. 듀얼 전류제어 블록 다이어그램  
 Figure 1. Dual current control block diagram

논문에서는 다양한 약계통 상황에 대한 역상분 전류 주입 모의 시뮬레이션을 수행하여 전압 불평형률을 분석하였다. 제안된 알고리즘은 실시간으로 전압불평형률을 모니터링하여 주입하는 역상분 전류의 크기를 자동으로 조절할 수 있다.

### 2. 역상분 전류 주입에 의한 전압 불평형률 분석

#### 2.1 Dual current control

역상분 전류 주입을 위해서는 정상분과 역상분의 분리가 필요하게 된다. 그림 1은 정상분과 역상분의 듀얼 전류 제어의 블록 다이어그램으로 측정된 PCC 전압과 전류를 DQ축으로 변환 하면서 APF를 이용한 정상분 전압과 전류 및 역상분 전압과 전류로 분리한다. 일반적인 제어기와 달리 듀얼 제어기는 PCC 전압의 정상분만을 추종하여 인버터를 제어한다. 역상분 전류 지령은 전압 불평형률에 의해 제한되는 것을 나타낸다.

#### 2.2 Ramp function algorithm

2.1절에 나와 있는 듀얼 전류 제어에서 역상분 전류에 대한 지령은 그림 2와 같이 전압 불평형률 상황에 따른 제한을 두게 된다. 전압 불평형률의 정의는 식(1) 과 같이 IEEE에서 정의하는 상전압 불균형률<sup>[3]</sup>로 정의하였다.  $V_{abe}$ 는 선간전압과 선간 평균 전압 간의 차이이다.

$$\% \text{voltage unbalance} = \frac{82\sqrt{V_{abe}^2 + V_{bce}^2 + V_{cae}^2}}{\text{avg line voltage}} \quad (1)$$

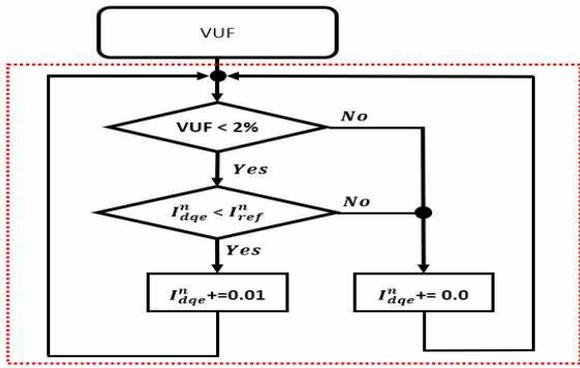


그림 2. 역상분 전류 지령 제한 순서도  
Figure.2 Negative sequence current reference limit flowchart

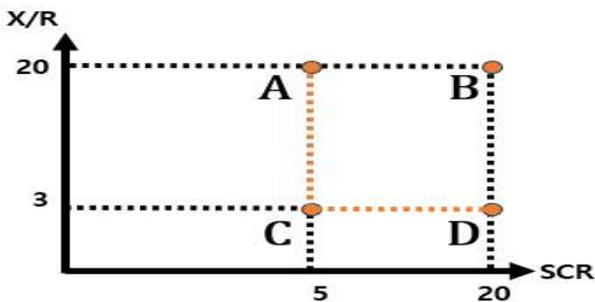


그림 3. SCR 과 X/R ratio 선정  
Figure 3. Grid impedance selection

### 2.3 Grid Impedance

약계통을 모의하기 위해 계통의 SCR과 X/R ratio를 기준으로 계통의 임피던스를 구성하였다.<sup>[4]</sup> 계통 연계형 인버터의 용량과 SCR을 기준을 정한 후, 이에 맞는 계통의 임피던스를 선정하였다.

### 3. 시뮬레이션

PSIM을 이용해 인버터 기반 전원을 모의하고, 각 SCR 상황에서의 역상분 전류 주입 시 발생하는 전압 불평형률의 상황을 관측하였다.

그림 4에서 역상분 전류를 인버터를 통해 정격전류 크기만큼의 지령을 모든 상황에 동일하게 주었다. 하지만, 약계통인 SCR이 5, X/R ratio가 3인 상황에서는 정격전류 크기의 40% 역상분 전류를 내보낼 시, 전압 불평형률이 2%를 넘어가는 상황이 발생하여 알고리즘 동작으로 전류 지령에 제한이 걸리게 된다.

### 4. 결론

본 논문에서는 역상분 전류 주입 시 발생하는 전력 시스템의 전력 품질 저하에 대하여 살펴보았다. 인버터의 접속지점에서 SCR과 X/R Ratio를 기준으로 계통의 임피던스를 선정하였고 역상분 전류를 주입한 결과, 약계통에서는 인버터 정격전류의 40%의 역상분 전류 주입 시 전압 불평형률이 2%를 넘게 되어 이용규정 제한치에 도달하였다. 점차 인버터 기반 전원이 늘어나면서 약계통에서 전압변동으로 인한 문제가 늘어날 것으로

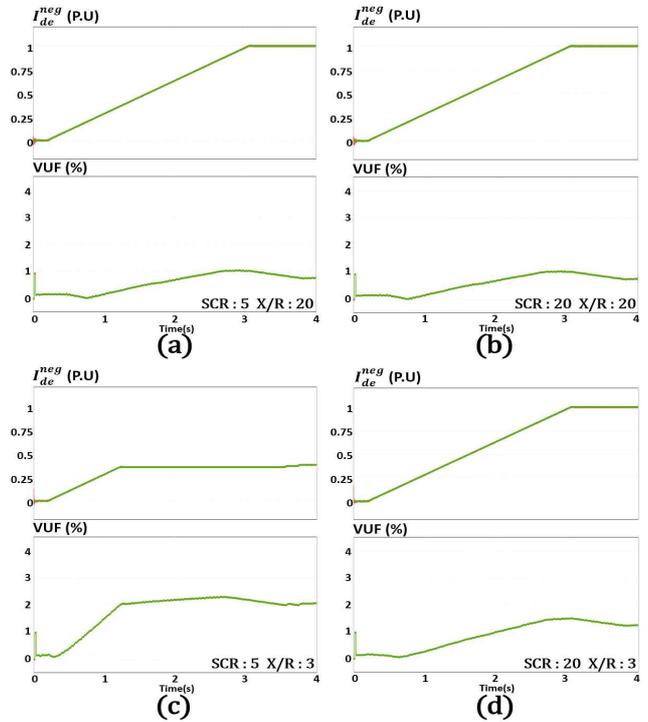


그림 4. 역상분 전류 주입에 따른 전압불평형률의 변화  
Figure 4. Change of voltage unbalance factor according to negative sequence current

표 1. 전압불평형률 2% 이하가 되는 최대 역상분 전류  
Table 1. Maximum negative sequence current which meets 2% of voltage unbalance factor

Grid Condition	SCR : 5	SCR : 20
X/R : 20	A : 100%	B : 100%
X/R : 3	C : 40%	D : 100%

예상되므로 주변 계통에 미치는 영향을 고려하여 계통 연계형 인버터의 역상분 전류 주입 가능 크기와 시간을 지능적으로 조절하는 노력이 필요하다.

### 참고 문헌

- [1] 박찬술, 송승호, 임지훈, "3 상 계통 연계형 인버터의 역상분 전류 주입을 이용한 계통 등가 임피던스 추정 기법", 전력전자학회 논문지, 제20권, 제6호, pp.526-533. 2015. 12.
- [2] A. von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 16, no. 4, pp. 782-790, Oct. 2001
- [3] P. Pillay, & M. Manyage "Definitions of voltage unbalance." IEEE Power Engineering Review, (2001), 21(5), 50-51.
- [4] S. L. Lorenzen, A. B. Nielsen and L. Bede, "Control of a grid connected converter during weak grid conditions," 2016 IEEE 7th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), Vancouver, BC, Canada, 2016