

GFM 인버터의 전압 불평형을 개선을 위한 3상 밸런스 제어기 연구

이호준¹, 김현준², 조현규¹, 이은수¹

한양대학교 ERICA 전자공학부¹, (주)효성중공업²

Three-phase Balance Controller to Improve Grid-voltage Imbalance for GFM Inverters

Hojun Lee¹, Hyunjun Kim², Hyeongyu Cho¹ and Eunsoo Lee¹

Hanyang University ERICA Electrical Engineering¹, Hyosung Industries, Co., Ltd²

ABSTRACT

본 논문에서는 불평형 부하조건 하 그리드 포밍 (Grid Forming, GFM) 인버터를 이용하여 부하전압 불평형을 개선을 위한 3상 정상 및 역상 제어기 연구를 제안하였다. GFM 인버터는 계통전압을 자체적으로 생성할 수 있는 장점이 있으나, 부하가 불평형인 경우 3상 전압 불평형이 발생할 수 있다. 본 논문에서는 3상 전압을 정지좌표계 DQ 변환한 성분을 PR필터의 위상변화를 이용하여 정상분과 역상분을 추출하였고, 이를 GFM 인버터의 정상분, 역상분 제어기에 각각 보상함으로써 역상분 성분을 제거할 수 있다. 이를 통해 부하 불균형 상황에서도 3상 전압 크기를 동일하게 제어할 수 있음을 시뮬레이션 을 통해 검증하였다.

1. 서론

그리드 포밍 인버터는 계통 주파수에 동기화하여 전압을 생성하고 계통 부하에 안정적으로 전력을 공급하는 것이 중요하다. 하지만 불평형 부하 상황에서 인버터의 단독 운전은 출력단에 설치된 LC 필터의 임피던스로 인해 필터 캐패시터 양단 전압이 왜곡되는 문제를 야기한다. 이로 인해 중성선에 고조파 전류 또는 역상분 전류가 흐르게 되며, 이러한 현상은 인버터의 수명을 단축시킬 뿐만 아니라, 연결된 부하 장치의 오동작을 유발하고 3상 평형 전압에 기반한 드롭 제어에 영향을 미치게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 본 논문에서는 기존의 전압 제어기를 정상분과 역상분으로 각각 구성하여, 정상분 전압 제어기는 드롭 제어를 수행하고, 역상분 전압 제어기는 지령 전압을 0V로 제어하는 방식을 제안한다. 이를 통해 불평형 부하 조건에서도 안정적인 드롭 제어를 구현하고, 불평형 전압을 보상할 수 있도록 하였다. 본 논문은 이러한 제어기 설계를 중점적으로 다루며, 이론적 분석 및 시뮬레이션을 통해 제안하는 제어 알고리즘의 유효성을 검증하고자 한다.

2. 토폴로지 및 제어 알고리즘

2.1 정상분과 역상분 추출 및 제어 알고리즘

정상분과 역상분을 효과적으로 제어하기 위해서는 불평형 전압에서 정상분과 역상분을 정확하게 분리하는 것이 필수적이다. 이를 위해 본 논문에서는 불평형 전압을 정지 좌표계를 통해 2상의 교류 전압에서 PR 필터를 사용하여 정상분, 역상분 전압을 정확하게 추출하는 방법을 제시하며, 이를 위한 제어구조를 그림 1에 나타내었다. 유효전력 지령 P^* 및 무효전력 지령 Q^* 에 구동하기 위해 드롭제어기를 통해 각각 주파수 지령 및 전압 지령을 생성한다. 유효전력은 위상차 생성을 통해 원하는 유효전력을 공급하고, 무효전력은 D축 정상분 전압 제어기를 통해 제어되도록 한다. 역상분 전압은 부하 불평형시 발생할 수 있으므로 역상분 전압지령을 0으로 하여 전압 불평형을 제거하도록 한다.

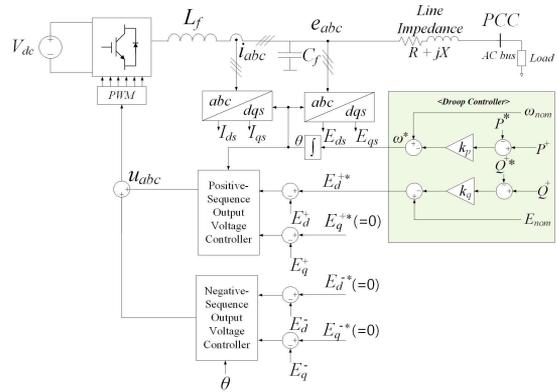


그림 1 제안하는 GFM 컨버터의 정상분 및 역상분 제어기 블록도
Fig. 1 Block diagram of proposed positive and negative controllers

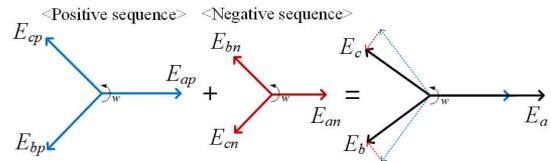


그림 2 3상 불평형 전압 페이저도
Fig. 2 Unbalanced three phase Voltage diagram

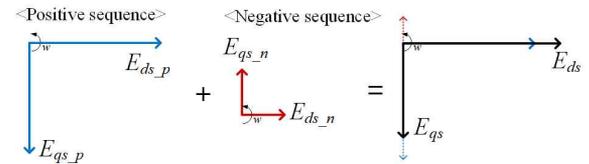


그림 3 DQ변환된 2상 불평형 전압 페이저도
Fig. 3 DQ transformed Unbalanced DQ Voltage diagram

본 논문에서의 정상분, 역상분 필터를 통한 전압 불평형 개선을 위해서는 정상분, 역상분 DQ축 전압을 3상 전압으로부터 추출해야 한다. 이를 위해 아래 식 (1)를 통해서 abc 전압을 정상분, 역상분으로 이루어진 2상 전압으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 E_a &= E_p \cos(\omega t + \Phi_p) + E_n \cos(\omega t + \Phi_n) \\
 E_b &= E_p \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Phi_p) + E_n \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Phi_n) \\
 E_c &= E_p \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi + \Phi_p) + E_n \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi + \Phi_n)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

식 1에서의 E_p, E_n 은 정상분, 역상분 전압크기의 최대치를 나타내며 Φ_p 와 Φ_n 는 각각 정상분, 역상분의 위상차다.

3상 계통전압이 불균형하다면 그림2와 같이 정상분, 역상

분으로 나눌 수 있으며, 이를 DQ변환한 관점에서의 전압 벡터도로 표현한다면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

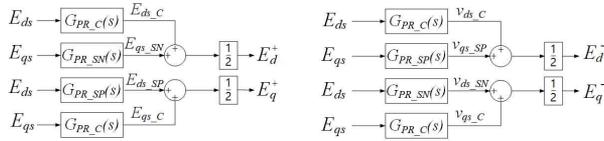


그림 4 정상분(Left) 및 역상분(Right) DQ축 전압 계산을 위한 제어 블록도
Fig. 4 Block diagram for positive sequence (Left) & negative sequence (Right) DQ-axes voltage calculation

그림 3과 같이 나타낸 DQ 페이저도를 통해 정지 좌표상의 정상분 DQ축 전압 E_d^+ , E_q^+ 와 정지좌표상의 역상분 DQ축 전압 E_d^- , E_q^- 를 도출할 수 있으며, 이를 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 $G_{PR,C}(s)$ 는 위상 지연없는 필터, $G_{PR,SP}(s)$ 과 $G_{PR,SN}(s)$ 는 각각 90도 위상 지연 및 앞서는 필터 효과를 가지며 아래 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{PR,C}(s) = \frac{kw_s}{s^2 + kw_s + w^2}, G_{PR,SP}(s) = \frac{kw_w}{s^2 + kw_s + w^2}, G_{PR,SN}(s) = \frac{-kw_w}{s^2 + kw_s + w^2} \quad (2)$$

수식 (2)에서 w 는 공진주파수, k 는 댐핑 요소, w_c 는 차단 주파수 (Cut-off Frequency)를 나타내며, 일반적인 임계 감쇠 응답 위해서 $k = \sqrt{2}$ 로 설정한다. 이 설정은 정격 주파수에서 크기 변동 없이 위상만 90도 지연 또는 90도 앞서는 필터링 효과를 제공한다.

그림 1에서 제시된 제안하는 불평형 보상제어의 정상분 DQ축 전압 E_d^+ , E_q^+ 와 역상분 DQ축 전압 E_d^- , E_q^- 은 그림 4의 90도 위상 변환 과정을 통해 추출할 수 있으며, 역상분 전압은 0으로 제어되어야 하므로 E_d^- , E_q^- 모두 0으로 제어되도록 한다. 정상분 및 역상분 DQ축 전압과 지령값의 차는 각각 PI 전압제어기를 통해 3상 지령을 생성하고 이를 그리드 포밍 인버터 스위칭 신호로 사용된다.

2.2 제안하는 제어기의 시뮬레이션 검증

제안하는 정상분, 역상분 제어기의 성능을 검증하기 위해 그림 5와 같이 PSCAD 시뮬레이션 툴을 이용하였다. 불평형 부하의 b상 & c상 부하는 8Ω 로 고정하였으며, 불평형 부하 전류 조건을 모의하기 위해 a상 부하는 1Ω 과 50Ω 로 설정하였다. 이 경우 a상 전류가 b&c상 전류 대비 크거나 작은 상황을 모의하였으며, 이에 대한 시뮬레이션 결과를 그림 6-7에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 불평형 부하 1Ω , 50Ω 조건에서도 정상분, 역상분 DQ축 전압을 정확히 추출하는 것을 확인할 수 있다. 추출해낸 정상분, 역상분 전압을 제안하는 알고리즘을 통하여 정상분 전압 제어기는 드립 제어를 수행하고 역상분 전압 제어기는 지령 전압을 0V로 제어함으로써 불평형 전압이 완전히 보상되어 3상 부하전압이 평형이 됨을 확인할 수 있다.

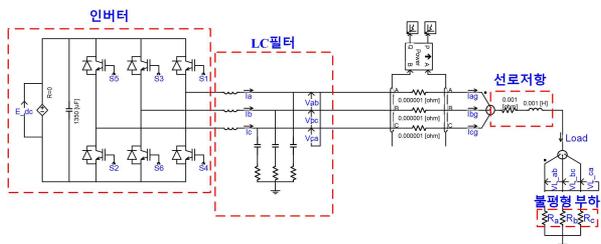


그림 5 3상 그리드 포밍 시스템 토폴로지
Fig. 5 Block diagram of 3-phase GFM system

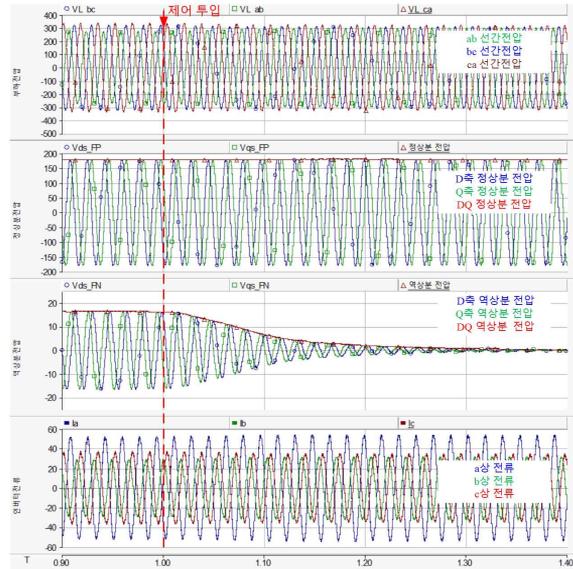


그림 6 불평형 부하저항 $R_a = 1\Omega$, $R_b = R_c = 8\Omega$ 조건의 정상분 및 역상분 전압 그래프

Fig. 6 Positive and Negative Sequence Voltage Graphs with Unbalanced Load Resistance $R_a = 1\Omega$, $R_b = R_c = 8\Omega$

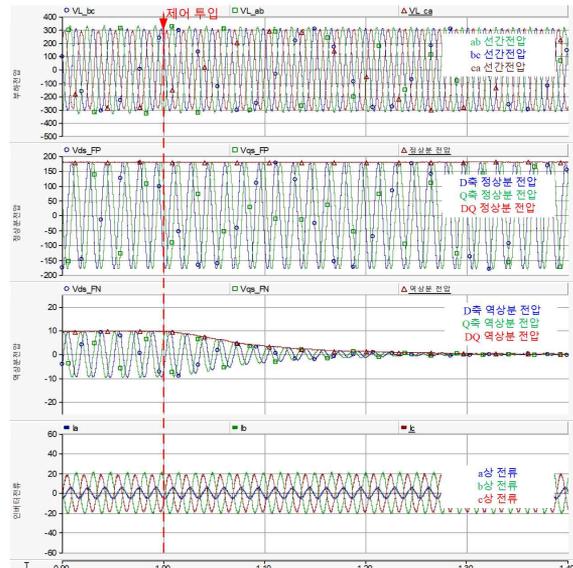


그림 7 불평형 부하저항 $R_a = 50\Omega$, $R_b = R_c = 8\Omega$ 조건의 정상분 및 역상분 전압 그래프

Fig. 7 Positive and Negative Sequence Voltage Graphs with Unbalanced Load Resistance $R_a = 50\Omega$, $R_b = R_c = 8\Omega$

3. 결론

본 논문에서는 불평형 부하 조건에서의 부하전압 불평형을 개선하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 불평형 보상 알고리즘을 통해 그리드 포밍 인버터가 단독으로 운전되는 불평형 부하 조건에서 안정적인 드립 제어가 가능하고, 불평형 전압을 효과적으로 보상할 수 있음을 보여주었다. 본 알고리즘은 향후 그리드 포밍 인버터의 3상 불평형 부하 조건 구동에서도 평형 부하전압을 형성하는데 유용할 것으로 전망한다.

참고 문헌

[1] Diego Ríos-Castro et al., "AC-Voltage Controller for Grid-Forming Converters", *IEEE Trans Power Electron*, vol. 38, No. 4, pp. 4529-4543, Apr, 2023.