

# 4-Leg 계통연계 인버터 불평형 전류제어 알고리즘 제안

선다운, 안정훈, 송성근<sup>†</sup>  
전자부품연구원

## Analytical Suggestion on Imbalanced Current Control Algorithm of Grid-Connected 4-Leg Inverter

Daun Sun, Jung-Hoon Ahn and Sunggeun Song<sup>†</sup>  
Korea Electronics Technology Institute

### ABSTRACT

본 논문은 3상 계통의 각상 부하 불평형이 전체 계통의 안정성 및 여분성에 미치는 부정적 영향을 최소화하기 위한 ESS (Energy Storage System) 전력변환장치의 제어 알고리즘을 제안하였다. 먼저, 4-Leg 인버터를 불평형 전류제어에 적합한 토폴로지 선정하고 3상 독립 제어 방식을 적용하였다. 제안한 제어기법을 분석하고 시뮬레이션과 50-kW 4-Leg 인버터 프로토타입 시험을 통하여 검증하였다.

### 1. 서론

최근 우리나라의 전력 수요가 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 추가적인 발전단지의 건설이 추진되고 있지만 송변전 설비 부족으로 인해 큰 제약비용이 발생하고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 최근 고압직류송전(HVDC), 태양광 발전(PV), 에너지저장장치(ESS) 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있다<sup>[1]</sup>. 이중 ESS는 배전계통에 접속되어 3상 평형 상태 출력을 제어하는 구조로서, 현재 불평형 제어에 대한 기술이 부족한 상황이다. 부하 불평형은 고장이나 단상부하, 고조파 등에 의해 주로 나타나며 이는 계통 선로의 손실 및 선로의 전압 강하에 의한 전압 불평형으로 이어지기 때문에 부하 배전계통의 안정화를 위하여 불평형을 개선에 대한 연구가 진행되고 있다<sup>[2]</sup>. 본 논문에서는 이러한 불평형 문제를 해결하기 위하여 불평형 제어에 적합한 3상 4선식 4-Leg 인버터 토폴로지를 선정하고 제어 알고리즘을 제안하였다.

### 2. 본론

#### 2.1 불평형 제어를 위한 토폴로지 분석

그림 1의 3-Leg 인버터는 부하 불평형 발생 시 중성점 전압에 동 위상을 가진 교류 파형이 발생하고 상전압에 전압강하가 발생하게 된다. 이때 각상 전류의 합이 0으로 유지되어야 하는데 이를 제어하는 방법은 매우 복잡하고 그 영역에도 한계가 있다. 4-Leg 인버터는 불평형 출력전류가 발생하였을 때 각 상 전압에 영향을 주지 않고, 한 개의 레그(Leg)만을 추가하여 불평형 부하에 따른 편차를 쉽게 제어할 수 있다는 장점이 있다. 추가된 경로로 인한 부하 상전압 영향을 줄이기 위해서는 해당 Leg의 전압이 부하 중성점 전압과 동일하여야 하며 이를 위한 직류 오프셋 전압 지령치는 식 (1)로 나타낸다.

$$C(wt) = \frac{V_{dc}}{2} + \frac{V_{max} + V_{min}}{2} \tag{1}$$

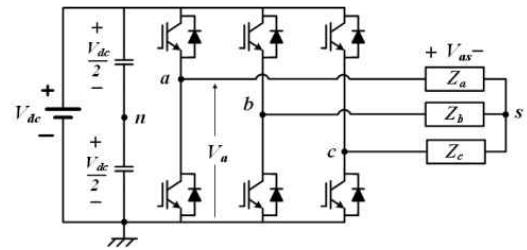
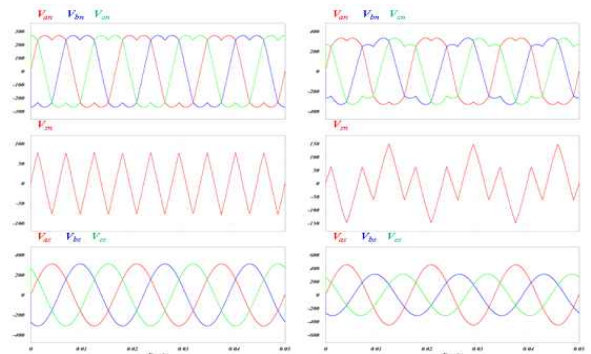


그림 1 3상 3-Leg 인버터  
Fig. 1 3-phase 3-leg inverter



(a) 평형 (b) 불평형 (2Z<sub>a</sub> = Z<sub>b</sub> = Z<sub>c</sub>)

그림 2 SVPWM 방식을 적용한 인버터 출력파형  
Fig. 2 Waveform of inverter with SVPWM method

그림 2는 공간 벡터 PWM(SVPWM) 스위칭 방식을 적용한 인버터 시뮬레이션 출력파형이며, 그림 2(b)는 A상의 부하를 B, C상의 2배로 증가시킨 경우의 Leg전압과 상전압 파형이다. 기존 평형상태와 비교하여 중성점전압 변동을 확인할 수 있다.

#### 2.2 제안하는 3상 독립 제어 알고리즘

그림 3은 본 논문에서 제안한 3상 인버터의 상별 독립 제어를 위한 토폴로지이다. 개별 제어를 위하여 전역통과필터를 사용하여 단상을 2상 정지 좌표계( $\alpha\beta$ )로 변환한 후 회전좌표계( $dq$ )로 다시 변환하며, 이때 회전각은 계통전압의 PLL을 이용한다. 각 상의 d축 성분은 무효전류, q축 성분은 유효전류 성분이며 각 전류 지령치는 식 (2), (3)과 같다.

$$i_{abc(d)}^* = \begin{bmatrix} i_{ad}^* \\ i_{bd}^* \\ i_{cd}^* \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{1}{V_{aq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{V_{bq}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{V_{cq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_a^* \\ Q_b^* \\ Q_c^* \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$i_{abc(q)}^* = \begin{bmatrix} i_{aq}^* \\ i_{bq}^* \\ i_{cq}^* \end{bmatrix} = 2 \begin{bmatrix} \frac{1}{V_{aq}} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{V_{bq}} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{V_{cq}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_a^* \\ P_b^* \\ P_c^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

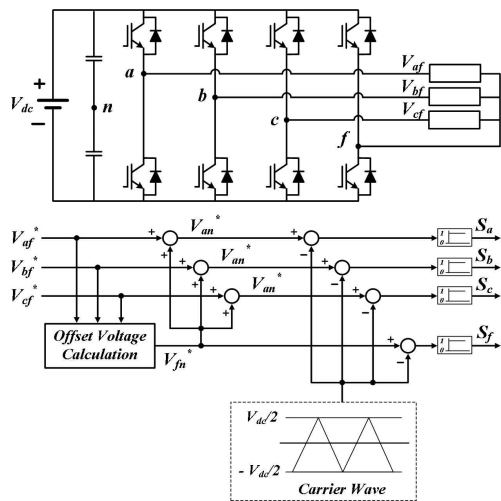


그림 3 3상 4선식 4-Leg 인버터 토폴로지  
Fig. 3 3-phase 4-wire 4-leg inverter topology

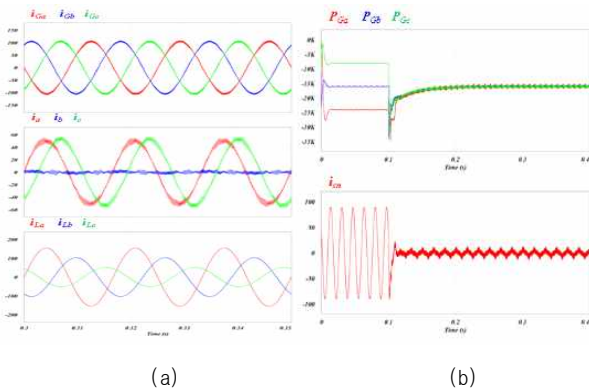


그림 4 불평형 부하 보상 시뮬레이션 출력파형  
Fig. 4 Waveform of simulation to compensate the unbalanced load

그림 4는 제어 알고리즘이 적용된 시뮬레이션 출력 파형이다. 그림 4(a)는 인버터가 각 상 전류를 개별적으로 제어하여 B상에는 전류가 흐르지 않고 각 상이 독립적으로 제어되고 있다. 그림 4(b)는 계통 유효전력과 중성점 전류를 나타내며, 불평형 보상 후 유효전력의 평균치가 동일하게 수렴하고 중성점 전류가 크게 감소한다. 이처럼 본 논문에서 제안한 토폴로지는 계통에 병렬로 연결되어 불평형을 제어함으로써 전압 불평형 문제를 해결할 수 있고, 유효분과 무효분으로 나누어 제어함으로써 역률 또한 개선시킬 수 있다.

### 2.3 실험 결과

제안한 알고리즘의 검증을 위하여 50-kW 4-Leg 인버터 프로토타입 시험을 진행하였다. DSP는 TI사의 TMS320F28335를 사용하였으며, 출력 전압 제어 및 PLL을 위한 3상 교류 전압·전류 센서 및 DC링크 전압센서 등으로 구성되어 있다. 그림 5(a),(b)는 계통 연계 인버터의 3상 평형 전류 파형이며 중성점 전류는 거의 0에 가깝게 출력된다. 그림 5(c),(d)는 3상 불평형 실험 파형이며 중성점 불평형 전류를 확인함으로써 제안한 알고리즘을 적용하여 상별 독립 제어가 가능함을 알 수 있다.

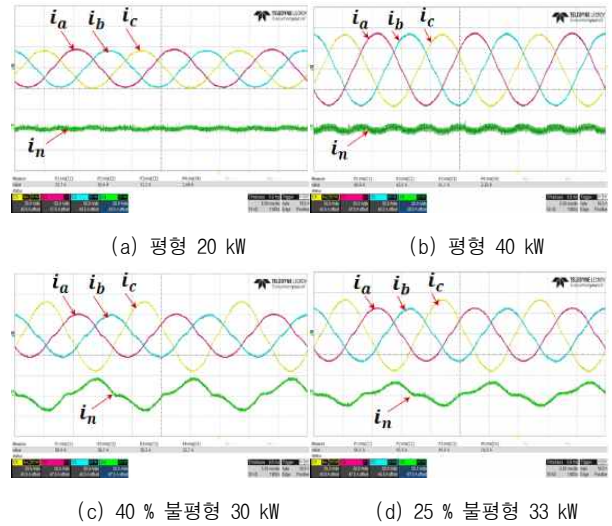


그림 5 계통연계 인버터 시험 파형  
Fig. 5 Waveform of grid connected inverter test

### 3. 결론

본 논문에서는 계통의 안정화를 위한 4-Leg 인버터 불평형 제어 기법을 제안하였다. 불평형 제어에 적합한 토폴로지를 선정하고 상별 독립제어 알고리즘을 적용하였다. 제안된 기법이 유효함을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 기법은 분산 전원 및 DC 부하 증가로 인해 발생할 수 있는 불평형 문제를 해결하고 계통 역률 개선에 활용하여 전력안정화 및 전력품질 신뢰성 향상에 기여할 수 있다.

본 연구는 2020년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20194310100030)

### 참고 문헌

[1] S. Bahramirad, W. Reeder and A. Khodaei, "Reliability-Constrained Optimal Sizing of Energy Storage System in a Microgrid", Transactions on smart grid of the IEEE, Vol. 3, No. 4, pp. 2056-2062, 2012, December.  
[2] J.Y.Kim, J.H.Jeon., S.K.Kim, C.H.Cho, J.H.Park, H.M.Kim and K.Y.Nam, "Cooperative Control Strategy of Energy Storage System and Microsources for Stabilizing the Microgrid during Islanded Operation", Transactions on power electronics of the IEEE, Vol. 25, No. 12, pp. 3037-3048, 2010, December.