

# AC마이크로그리드에서 EES용 인버터의 자율적인 모드전환을 위한 제어 기법

강수한, 박성열, 최세완†  
서울과학기술대학교

## Autonomous Mode Transfer Control Method of Inverter for ESS in AC Microgrid

Suhan Kang, Sungyoul Park, Sewan Choi†  
Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

본 논문은 EES용 인버터의 계통연계 동작과 단독운전 간 자율적인 모드 전환을 위한 제어기법을 제안한다. 제안하는 제어 기법은 AC마이크로그리드의 ESS용 인버터의 계통연계 동작으로서 DC링크 전압을 제어와 계통 차단 시 단독 운전 동작으로서 부하에 전압 공급을 위하여 출력전압 제어 간 자율적인 모드전환을 통해 계통 고장 시에도 단독운전 검출없이 모드 전환을 성취한다.

### 1. 서론

최근 지구 온난화 및 일본의 원전사고, 고유가 등의 에너지 위기와 세계적으로 에너지 수요증가 및 화석자원 고갈 위기로 증가하는 전력수요와 환경적 이슈로 인하여 신재생 에너지를 이용한 분산전원에 대한 다양한 연구들이 진행되고 있고, 발전되는 에너지를 전력수요에 따라 효율적으로 사용하기 위해 ESS의 필요성이 증가하고 있다. ESS는 계통이 고장 등에 의해 정전이 발생할 경우 부하에 안정적인 전압을 공급하기 위해 무정전 전원장치(UPS)의 역할도 수행하여 정전 시의 인적 피해, 데이터 손상, 경제적 손실 발생을 예방한다. 그렇기 때문에 ESS용 인버터는 계통 고장 시 독립운전 동작을 통해 부하에 끊임없이 안정적인 전력을 공급하는 기능이 요구된다.

기존의 ESS용 인버터 알고리즘은 DC링크 전압 제어기와 출력전압 제어기가 따로 구성되어 있기 때문에, 계통 고장 등으로 인한 정전 발생 시 Clearing Time 구간동안 제어기 포화로 인한 불안정한 전압 공급과 단독운전 검출 이후 DC링크 전압 제어기와 출력 전압제어기 간 절체로 인해 과도상태가 발생한다.

과도상태를 방지하기위한 제어기법으로는 간접전류 기반의 알고리즘이 있다. 이 알고리즘은 급작스러운 모드 전환이 요구되더라도 전압 제어기는 계통연계나 단독운전 모드에 상관없이 동작하기 때문에 자율적이고 끊임없는 모드전환을 성취한다<sup>[1]</sup>. 그러나 간접전류 제어기법은 LCL 필터에 한정된 제어 알고리즘이며, 계통측 전류를 간접적으로 제어하기 때문에 높은 차수의 제어기가 요구되고, 이로 인한 설계에 어려움이 생긴다<sup>[2]</sup>.

제안하는 모드전환 기법은 LC 필터 구조에서도 리미터를 이용하여 DC전압 제어기와 부하전압 제어기를 하나로 통합하여, 내부 전류제어 루프가 제어기 절체없이 지령값 변동이 끊임없이 연속적으로 동작한다.

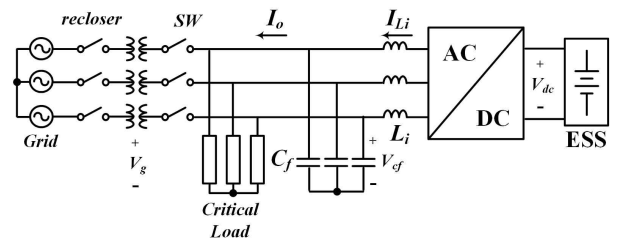


그림 1 AC 마이크로 그리드의 ESS용 인버터 회로도

### 2. 제안하는 모드전환 기법

그림 2는 제안하는 알고리즘의 제어블록도로서 내부 인덕터 전류 제어기를 공유하며 외부 제어루프에 인덕터 전류 지령값을 계산하는 부하 전압 제어기와 DC 전압 제어기를 하나로 통합한 구조이다. 부하 전압 제어기는 단독운전 시 인덕터 전류 지령값을 계산하며, 계통연계 시에는 DC전압 제어기가 인덕터 전류 지령값을 계산한다. 계통연계 시에 부하 전압제어기의 동작을 방지하기 위해 부하 전압의 지령값  $V_{cd}^*$ 은 계통의 공칭 전압으로 설정하고 실제 부하 전압 제어기의 지령치는 다음과 같다.

$$\begin{cases} V_{cd}^{H*} = V_{cd}^* + \Delta V \\ V_{cd}^{L*} = V_{cd}^* - \Delta V \\ V_{cq}^{H*} = V_{cd}^* + \Delta V \\ V_{cq}^{L*} = V_{cd}^* - \Delta V \end{cases} \quad (1)$$

여기서  $\Delta V$ 는 전압 제어 밴드이며 계통전압의 허용 변동 범위 안에서 설정되어야 한다.

출력 전압 제어기의 출력  $\Delta I_d$ 은 DC전압 제어기의 전류지령치  $I_{o,d}^*$ 에 더해져 인버터의 인덕터 전류지령치는 다음과 같이 결정된다.

$$\begin{bmatrix} I_{i,d}^* \\ I_{i,q}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega C_f \\ \omega C_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{cd} \\ V_{cd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{o,d}^* \\ I_{o,q}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

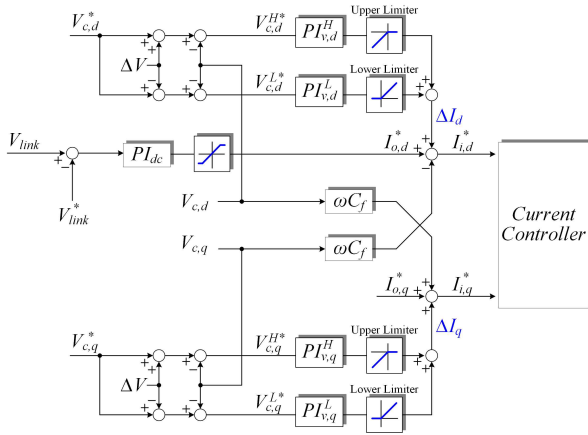


그림 2 제안하는 모드전환 기법의 알고리즘 블록도

### 2.1 계통연계 시 제어동작

계통연계 상황에서 부하 전압은 계통 전압으로 항상 두 지령치 사이에 있기 때문에 부하 전압 제어루프의  $PI_{v,d}^H$  와  $PI_{v,q}^H$  에는 양의 오차가 누적되고,  $PI_{v,d}^L$ ,  $PI_{v,q}^L$  에는 음의 오차가 누적된다. 이로 인해 각 보상기의 출력은 양의 값과 음의 값으로 포화되지만, 상한 리미터와 하한 리미터의 제한값은 0으로 설정하게되면 계통연계 시에는 네 루프의 출력 모두 0이 되기 때문에 부하 전압 제어루프는 인덕터 전류 제어 루프에 영향을 주지 않고, 인버터가 ESS의 충전 및 방전 동작을 수행하기 때문에 DC 전압 제어를 위한 제어기  $PI_{dc}$  가 활성화 되고 제어기의 보상값  $I_{o,d}^*$  에 따라 전류제어기가 동작한다.

### 2.2 단독운전 발생 시 제어동작

계통이 차단되어 단독운전 동작 시에는 부하 전압에 변동이 발생하게 되며 부하 전압 제어루프의  $PI_{v,d}^L$  가 활성화 되어 부하전압 제어를 수행한다.

ESS가 방전 중에 계통 차단 발생 시, DC전압 제어기  $PI_{dc}$  는 방전 동작을 수행하기 위해 인덕터 전류 지령값  $I_{o,d}^*$  을 지속적으로 증가시키게 되고, 리미터에 의해 양의 값으로 포화되게 된다. 계통 전압에 의해 부하에 흐르고 있던 전류보다 큰 인버터의 인덕터 전류가 부하에 인가되기 때문에 부하의 전압이 계통 전압보다 증가한다. 부하전압을 감소시키기 위해 부하 전압제어기의  $PI_{v,d}^H$  가 활성화 되고, 음의 값을 갖는 인덕터 전류 지령값  $\Delta I_d$  를 출력하여  $V_{c,d}^H$  에 대한 출력전압 제어를 수행하게 된다.

ESS가 충전 중에 계통 차단 발생 시, DC전압 제어기는 충전 동작을 수행하고 있는 상태이기 때문에 인덕터 전류 지령값  $I_{o,d}^*$  을 지속적으로 감소시키게 되고, 리미터에 의해 음의 값으로 포화되게 된다. ESS가 충전 중 계통 차단이 발생했기 때문에, 부하의 전압은 감소한다. 부하전압을 증가시키기 위해 부하 전압제어기의  $PI_{v,d}^L$  가 활성화 되고, 양의 값을 갖는 인덕터 전류 지령값  $\Delta I_d$  를 출력하여  $V_{c,d}^L$  에 대한 부하전압 제어를 수행하게 된다.

### 2.2 무효전력 공급에 대한 제어동작

인버터는 계통전압에 PLL하여 위상 제어를 수행하기 때문에 계통연계 시에는  $PI_{v,d}^H$ ,  $PI_{v,q}^L$  가 포화되어 각각의 상한·하한 리미터에 의해 0이 출력된다. 단독 운전 발생 시에는 인버터의 ESS의 충·방전 동작에 관련 없이 인버터의 부하가 용량성일 경우  $PI_{v,q}^L$  가 활성화 되고, 유도성 부하일 경우  $PI_{v,d}^H$  가 활성화 되어 부하에 무효전력을 공급하게 된다.

## 3. 모의 실험 결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위해 표1과 같은 사양의 5kW 3상 인버터를 구성하여 PSIM을 통해 시뮬레이션을 수행하였다. 부하는 단독운전 발생 시 동작을 검증하기 위한 저항부하와 무효전력 공급에 대한 제어 동작을 검증하기 위한 유도성 부하로 구성하였다. 계통연계 중 임의의 시간에 재폐로 차단기를 개방하여 정전을 모사하였고, 본 모의 실험에서 단독운전 검출 기능은 적용하지 않고 재폐로 차단기 개방 100ms 후 계통 차단기를 개방하였다.

$P$	5kW	$V_{g,rms}$	220V	$f_g$	60Hz
$L_i$	556μH	$C_f$	16μF	$f_{sw}$	10kHz

표 1 시스템 사양

그림 2는 ESS가 방전 중 계통 차단 발생 시 제안하는 알고리즘의 동작을 나타낸다. 첫 번째 파형은 ESS의 전압을 보여주고, 두 번째 파형은 계통전압과 인버터의 출력 전류를 보여준다. 세 번째와 네 번째 파형은 각 부하 전압제어기의 실제 전압 지령값과 인버터 출력 캐패시터 전압의 DQ 변환값을 보여주며, 다섯 번째 파형은 계통 전류 파형과 계통전류의 DQ 변환값을 보여준다. 여섯 번째 파형과 일곱 번째 파형은 실제 인버터 출력전류의 DQ 변환값의 지령값과 각 전압제어기의 출력에 의해 생성된 전류 지령값을 보여준다.

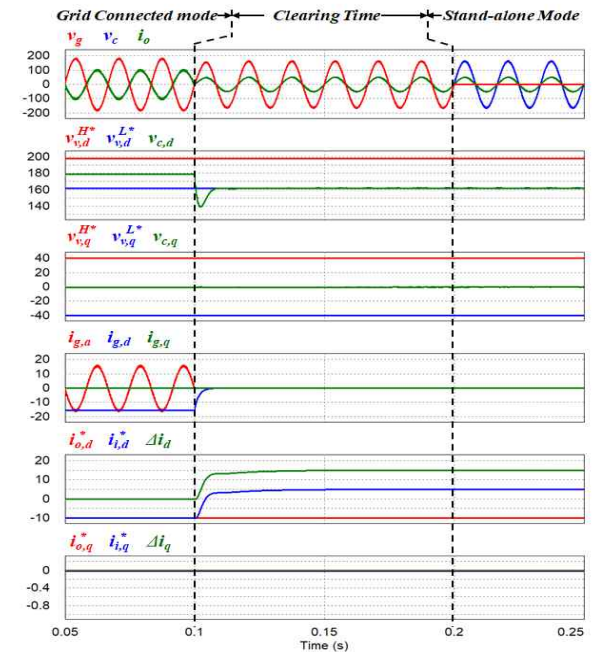


그림 3 ESS 충전 중모드 전환 모의 실험 파형

그림 4는 ESS가 충전 중 계통 차단 시 제안하는 알고리즘의 동작을 나타낸다. 파형의 구성은 그림 0과 같다.

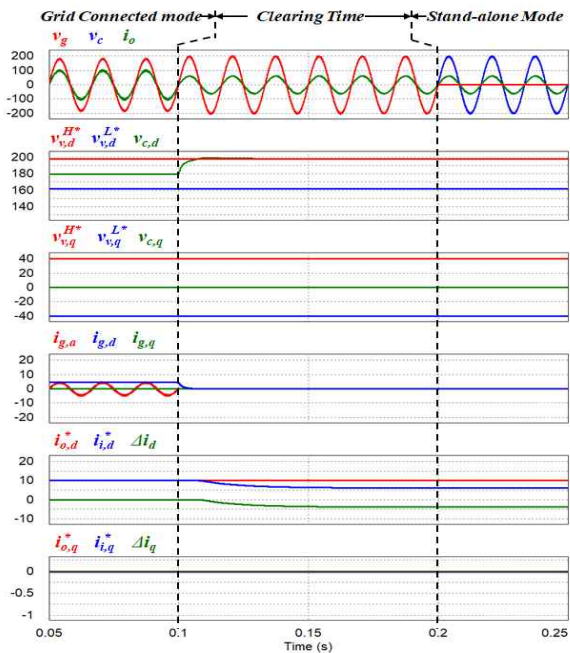


그림 4 ESS방전 중 모드 전환 모의 실험 파형

그림 5는 계통 차단 시 유도성 부하로 인한 무효 전력 공급 동작을 나타내며, 파형의 구성은 그림 0과 같다.

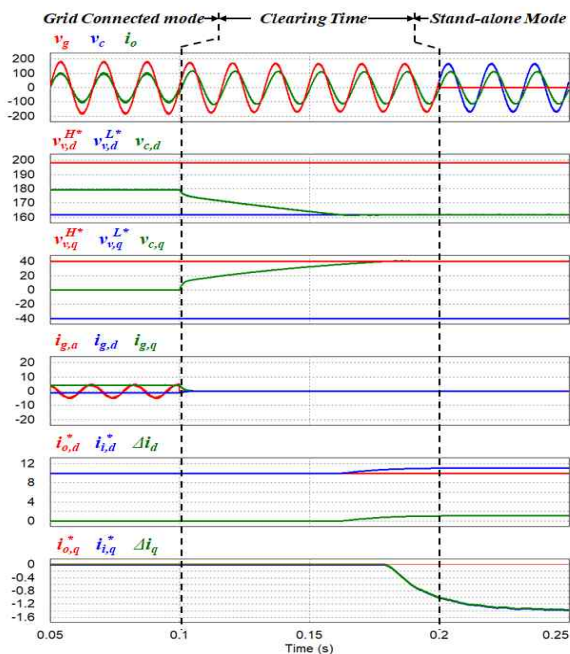


그림 5 무효전력에 대한 모드 전환 모의 실험 파형

#### 4. 결론

본 논문에서는 ESS용 인버터가 계통 연계 운전과 동립 운전의 모드 전환 시 독립운전 검출없이 자율적으로 모드 전환을 위한 알고리즘 연구를 진행하였다. 제안된 알고리즘은 리미터를 이용하여 내부 루프에 전류 제어를 공통으로 갖는 출력전압 제어루프와 DC전압 제어루프를 통합한 알고리즘을 제안했으며, 시뮬레이션을 통해 제안한 알고리즘을 검증했다. 향후 실제 실험을 통하여 검증하겠다.

#### 참고 문헌

- [1] S. Kim, M. Kwon, and S. Choi, "Operation and control strategy of a new hybrid ESS-UPS system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 33, no. 6, pp. 4746 - 4755, Jun. 2018
- [2] 박성열, 권민호, 신양진, 정호영, 강수한, 최세완, "마이크로 그리드에서 양방향 계통연계형 인버터의 자율적이며 끊김 없는 모드전환 기법," 전력전자학회 학술대회 논문집, pp. 36-38, 2018