

마이크로그리드에서 양방향 계통연계형 인버터의 자율적이며 끊김없는 모드전환 기법

박성열¹, 권민호², 신양진¹, 정호영¹, 강수한¹, 최세완¹
서울과학기술대학교¹, 한국전기연구원²

A Seamless and Autonomous Mode Transfer Method of Bidirectional Grid Connected Inverter in Microgrid.

Sungyoul Park, Minho Kwon, Yangjin Shin, Hoyoung Jung, Suhan Kang, Sewan Choi[†]
Seoul National University of Science and Technology, Korea Electrotechnology Research Institute

ABSTRACT

중요부하를 가지고 있는 계통연계 인버터는 계통과의 연결이 끊길 경우 중요부하에 안정적인 전압공급을 위하여 끊김 없는 모드전환 동작이 요구된다. 기존 인버터는 계통연계 시 전류제어모드, 독립운전 시에는 전압제어모드로 운영을 한다. 그래서 모드전환 시 제어기절체로 인한 출력전압에 심각한 과도상태가 발생할 수 있으며 단독운전 검출 전에도 불안정한 전압을 부하에 공급하게 되어 중요부하에 큰 손상을 입힐 수 있다. 본 논문에서는 LCL필터 뿐만 아니라 LC필터 구조에서도 적용이 가능하며, 양방향 운전 시 자율적인 모드전환이 가능한 계통연계 인버터의 모드전환 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 5kW 시작품을 제작하여 타당성을 검증하였다.

1. 서론

최근 전 세계적으로 에너지 수요증가 및 화석자원 고갈 위기로 태양광, 풍력 및 연료전지 등의 분산발전시스템과 에너지저장시스템에 대한 관심이 증가하면서 소규모전력망인 마이크로그리드에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 마이크로그리드는 평소에는 계통과 연계되어 운전하다가, 계통사고가 발생하면 계통과의 연결을 끊고 독립운전을 하게 된다. 여기서 양방향 계통연계 인버터는 중요한 역할을 수행하고 있다. 그림 1은 3상 계통연계형 인버터의 회로도로서, 계통연계 시 마이크로그리드의 전력발전량에 따라 인버터는 계통에 전력을 주입하거나 계통으로부터 마이크로그리드에 전력을 공급하는 운전을 한다. 특히 계통고장으로 인해 계통과 연결이 끊긴 경우에는 빠르게 이를 감지하여 독립운전으로 모드전환을 해서 중요부하에 끊김 없이 안정적인 전압을 공급하여야 한다. 하지만 기존 인버터시스템은 계통연계 시에는 전류제어를 하고 독립운전 시에는 전압제어를 하여 그림2와 같이 모드전환 시 제어기절체로 인한 과도상태가 크게 발생하며, 단독운전 검출 전에는 출력전력과 부하 조건에 따라서 부하 전압이 변동할 수 있게 되어 중요부하에 큰 손상을 일으킬 수 있다. 그래서 모드전환 시 끊김없이 중요부하에 안정적인 전압을 공급할 수 있는 제어기법 개발이 요구된다.

기존 인버터의 모드전환 기법으로는 PLL 기반 모드전환 기법이 있다.^[1] 이 제어기법은 전류제어기와 전압제어기의 출력을 더하여 운전모드에 따라 활성/비활성 제어기를 선택할 수 있는

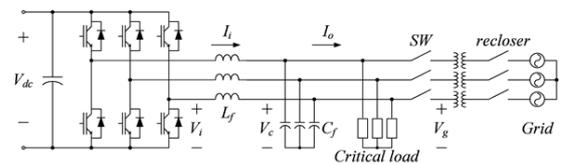


그림 1 계통연계 인버터 회로도

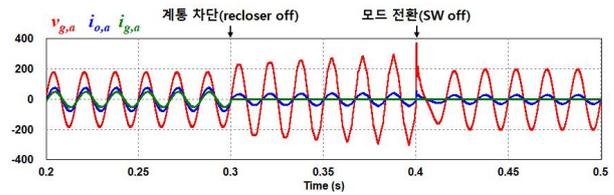


그림 2 계통사고 시 기존 계통연계 인버터의 모드전환 파형

기법으로서 모드전환 시 제어기 절체로 인한 과도상태가 발생되지 않는다. 그러나 단독운전을 검출하지 못한 clearing time 동안에는 전류제어기 출력이 포화되어 과도상태가 발생할 수 있는 문제점이 있다. 모드전환과 clearing time을 모두 고려한 제어기법으로는 간접전류기반의 알고리즘이 있다.^{[2] [3]} 이 제어기법은 계통연계 모드에서 캐패시터 전압과 계통전압의 위상과 크기 차이를 제어하여 출력전류제어를 제어하는 기법으로 내부 캐패시터 전압제어기가 존재한다. 그렇기 때문에 급작스러운 모드전환이 요구되더라도 내부의 캐패시터 전압제어기는 동작모드에 상관없이 항상 동작하기 때문에 끊김 없는 모드전환을 성취할 수 있다. 그러나 간접전류 제어기법은 기본적으로 LCL필터에 한정된 제어 알고리즘으로 LC필터를 사용하는 시스템에서는 적용할 수 없는 한계가 있다. 또한, LCL필터의 인버터측 전류가 아닌 계통측 전류를 간접적으로 제어하기 때문에 전류제어기의 차수가 높아 제어기 설계가 어려워 제어기의 대역폭을 넓게 설계하기 어렵다. 즉, 빠른 응답속도를 요구하는 응용에 적합하지 않다.

본 논문에서는 LCL필터 뿐만 아니라 LC필터 구조에서도 적용이 가능하며, 응답속도가 빠르고 양방향 운전 시 자율적인 모드전환이 가능한 계통연계 인버터의 모드전환 기법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 5kW 시작품을 제작하여 타당성을 검증하였다.

2. 제안하는 모드전환 기법

그림 3은 이상적인 상황에서의 제안하는 알고리즘으로서 내

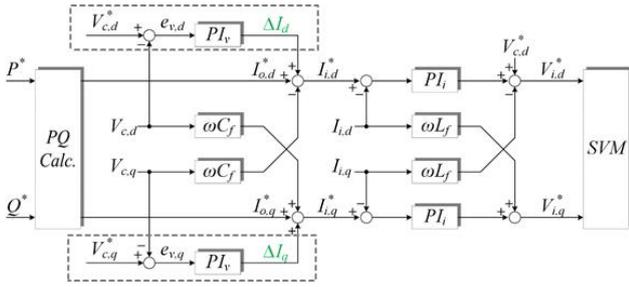


그림 3 이상적인 상황에서의 제한하는 모드전환 기법

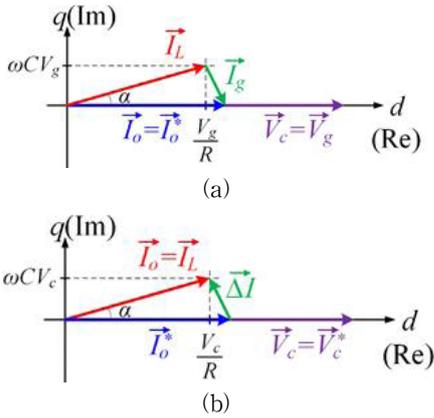


그림 4 제한한 알고리즘의 벡터도 (a) 계통이 정상일 때 (RC 부하) (b) 계통 고장 시(RC 부하)

부 인덕터 전류제어기를 공유하며 외부 루프에 출력 전류 지령을 계산하는 계통연계 블록과 캐패시터 전압을 제어하는 독립 운전 블록을 하나로 통합한 구조다. 캐패시터 전압 제어기의 출력(ΔI)은 다음과 같이 전류지령치에 더해진다.

$$\begin{bmatrix} I_{i,d}^* \\ I_{i,q}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega C_f \\ \omega C_f & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{c,d} \\ V_{c,q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_{o,d}^* \\ I_{o,q}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

유무효전력의 지령치(P^* , Q^*)는 상위제어기로부터 지령 받은 값이며, 캐패시터 전압의 지령치(V_c^*)는 계통의 공칭전압으로 설정한다. 계통이 정상일 때 차단기가 닫히면 캐패시터 전압은 계통 전압과 동일하고, 캐패시터 전압지령치(V_c^*)가 계통 전압(V_g)과 정확히 동일하다고 가정하면 전압 오차(e_v)는 0이므로 전압제어기의 출력(ΔI) 또한 0이 된다. 따라서 외부 전압 제어 루프는 아무런 영향을 주지 않게 되고 그림 3(a)와 같이 인버터는 교류 전류원으로 동작한다. 인버터가 전류 제어 동작을 수행하던 중 차단기를 개방하면 그림 5와 같은 경향으로 캐패시터 전압에 변동이 생긴다. 여기서 차단기를 개방하기 전 계통전류는 4사분면에 있었기 때문에 V_c 의 실수값(d)은 증가하여 음의 오차가 발생하고 허수값(q)은 감소하여 양의 오차를 발생시킨다. 그러면 외부 전압 보상기(PI_v)는 이 오차를 제거하기 위한 보상 값(ΔI)를 출력하여 인버터 전류지령치에 더해진다. 따라서 인버터의 출력 전류는 다음과 같이 결정된다.

$$\vec{I}_o = \vec{I}_o^* + \Delta \vec{I} \quad (2)$$

여기서 ΔI 의 정상상태 값은 차단기가 개방되기 직전의 계통 전류와 크기는 동일하고 방향은 반대가 되며 다음과 같이 표현

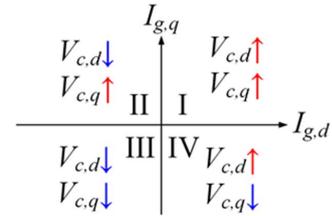


그림 5 계통차단 시 전압변동 경향

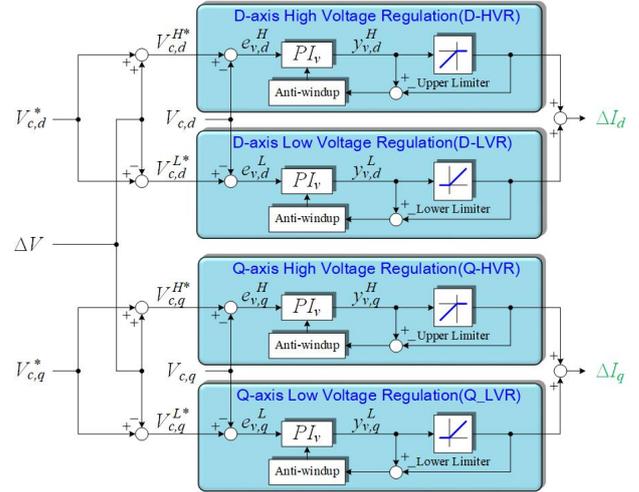


그림 6 제한하는 모드전환 기법의 외부 전압제어 루프

할 수 있다.

$$\Delta \vec{I} = -\vec{I}_g \quad (3)$$

그림 4(b)는 제한하는 알고리즘의 벡터도를 보여준다. 출력 전류 지령치 변동 없이 자율적으로 부하의 전류를 추종하여 출력 전압을 일정하게 제어한다.

그림 3의 제어블록은 계통전압과 캐패시터 전압지령치가 정확히 동일할 때만 유효하다. 그래야만 계통연계 모드에서 전압 오차(e_v)가 0이되고 전류제어 지령치에 간섭이 없다. 그러나 실제로 계통전압을 정확히 예측하는 것은 매우 어려울뿐더러 계측할 때의 노이즈 및 미소 변동분(small perturbation)으로 인해 전압 오차(e_v)를 0으로 만들기는 거의 불가능에 가깝다. 이 오차는 전압보상기(PI_v)를 거쳐 전류지령치에 외란으로 작용한다. 이러한 문제를 보완하기 위하여 그림 3의 외부 전압 제어 루프를 그림 6의 제어기로 대체하였다. 제한하는 전압제어 루프는 네 개의 전압 제어 루프로 구성되어 있고 각 보상기 출력에 상한리미터(Upper limiter)와 하한리미터(Lower limiter)가 존재한다. 전압 지령치(V_c^*)는 이전과 같이 계통의 공칭전압으로 설정하고 실제 전압제어기의 지령치는 다음과 같다.

$$V_{c,dq}^{H*} = V_{c,dq}^* + \Delta V \quad (4)$$

$$V_{c,dq}^{L*} = V_{c,dq}^* - \Delta V \quad (5)$$

여기서 ΔV 는 전압 제어 밴드이며 계통 전압의 허용 변동 범위 안에서 설정되어 한다. 계통연계 상황에서 캐패시터 전압은 항상 두 지령치 사이에 있기 때문에 D HVR과 Q HVR 루프의 보상기에는 양의 값의 오차가 누적되고 D LVR과 Q LVR 루프의 보상기에는 음의 값의 오차가 누적된다. 이로 인해 각

보상기의 출력은 각각 양의 값과 음의 값으로 포화된다. 각 보상기 출력에 있는 상한리미터와 하한리미터의 제한 값은 0으로 설정한다. 따라서 네 루프의 출력 모두 0이므로 ΔI 또한 0이 된다. 그러므로 전류 제어 루프에 전혀 영향을 주지 않는다. 그러다 계통 차단기가 개방되어 캐패시터 전압에 변동이 발생하면 그때 D축 루프와 Q축 루프 각각 하나씩 활성화되고 나머지는 포화 상태를 유지하며 영향을 주지 않는다. 전압 보상기가 활성화될 때 빠르게 활성화 되도록 하기 위해서는 안티와인드업 기법이 반드시 필요하다. 동작 모드는 그림 5에 따라 계통전류에 따른 DQ전압변동 경향에 의해서 각 DQ전압제어 루프가 하나씩 활성화 되면서 동작을 하게 된다.

3. 실험 결과

제안한 알고리즘을 검증하기 위하여 표1과 같은 사양을 갖는 5kW 3상 인버터 시작품이 사용되었다. 부하는 저항으로 구성되어 있으며 전압제어기의 4가지 동작모드를 검증하기 위하여 출력 전류지령치의 크기와 위상을 다르게 하였다. 계통연계 중 임의의 시간에 재폐로 차단기(recloser)를 개방하여 정전을 모사하였고, 본 실험에서 단독운전 검출 기능은 적용하지 않고 재폐로 차단기의 점점 신호를 받아 약 100ms 후 계통 차단기를 개방하였다.

표 1 시스템 사양

P	5kW	V _g	220V	f _g	60Hz
L _i	556μH	C _f	16μF	f _{sw}	10kHz

그림 7 10 실험파형의 첫 번째 파형은 계통 전압과 전류를 보여주며 두번째 파형은 캐패시터 전압과 출력 전류를 보여준다. 마지막 세번째 파형은 DAC를 이용하여 출력한 ΔI_{dq} 값을 보여준다. 계통연계 중 전압제어기는 비활성화 되어있기 때문에 ΔI 의 값은 0이며 단독운전이 발생한 직후 각 상황에 따라 자율적으로 전압제어기가 활성화되면서 전압제어를 위한 값을

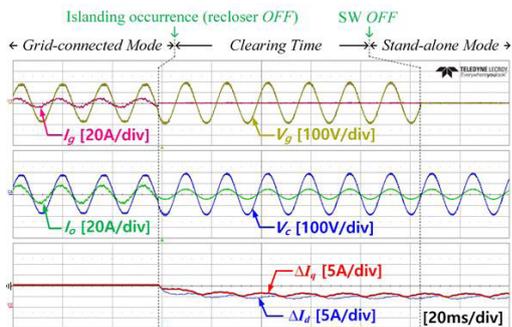


그림 7 모드 전환 실험파형(계통전류 1사분면)

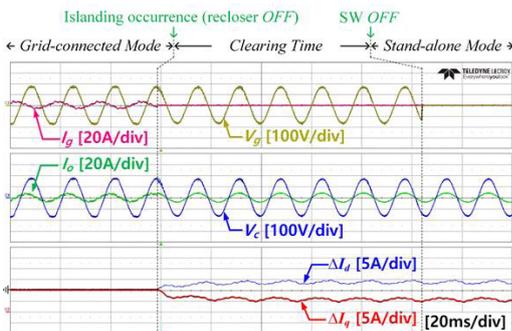


그림 8 모드 전환 실험파형(계통전류 2사분면)

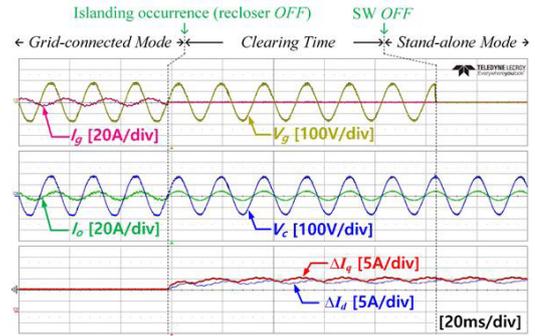


그림 9 모드 전환 실험파형(계통전류 3사분면)

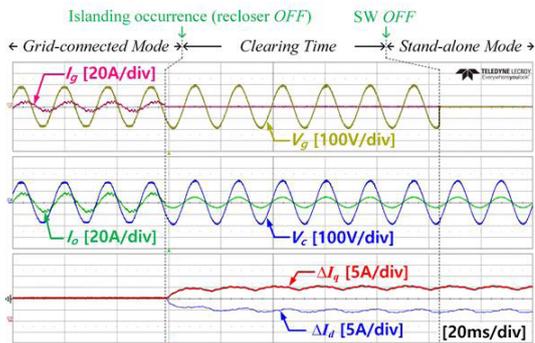


그림 10 모드 전환 실험파형(계통전류 4사분면)

출력하는 것을 확인할 수 있다. 그래서 단독운전을 인지하지 못한 clearing time 동안에도 정상동작 범위 내에서 전압제어기가 되며, 독립운전 모드로 전환 시(SW OFF)에도 과도상태 없이 전환되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 계통연계인버터의 모드전환 제어기법을 제안하였다. 제안하는 기법은 계통연계 모드와 독립운전 모드의 제어 블록을 하나로 통합한 방식이다. 이상적인 상황을 가정한 제어 블록을 통해 제안하는 기법의 개념 및 동작원리를 설명하고 실제 적용 가능한 제어 기법을 제안하였다. 그리고 인버터 출력 전력과 부하 상태에 따른 경향을 이론적으로 분석하고 동작 모드를 정의하여 출력 전류 방향과 부하에 상관없이 적용이 가능한 제어 기법을 제안하였다. 5kW 3상 인버터 시작품을 통하여 제안하는 기법의 타당성을 증명하였다.

참고 문헌

- [1] T. Tran, T. Chun, H. Lee, H. Kim, E. Nho, "PLL Based Seamless Transfer Control Between Grid Connected and Islanding Modes in Grid Connected Inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, 2014.
- [2] S. Yoon, H. Oh, S. Choi. "Controller Design and Implementation of Indirect Current Control Based Utility Interactive Inverter System". *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 28. pp. 26 30 Jan 2013
- [3] J. Kwon, S. Yoon, and S. Choi, "Indirect current control for seamless transfer of three phase utility interactive inverters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, no. 2, pp. 773 781, Feb. 2012.