

에너지저장장치를 갖는 단상인버터에서 매끄러운 모드전환을 위한 알고리즘 개발

변병주¹, 서현욱¹, 조영훈[†], 최규하¹

A Seamless Mode Transfer Scheme for Single Phase Inverter with ESSs

Byeng-Joo Byen¹, Hyun-Uk Seo¹, Younghoon Cho[†], and Gyu-Ha Choe¹

Abstract - This paper proposes a mode transition algorithm between the grid-tied and the stand-alone operations for the single-phase inverter with the energy storage system. For the grid-tied operation, the dc-link voltage and the output current are required to be control. For the stand-alone mode, both the output voltage and the output current should be regulated. In order to mitigate a falling-off in control performance during transients in mode change, the load power estimation and the current selection schemes are proposed. The proposed method allows an optimized current reference is selected to reduce an output voltage drop and an excessive over-current in transient. To verify the effectiveness of the proposed method, both the simulation and the experiments for a 3kW single-phase inverter with the energy storage system have been conducted. From the results, it has been confirmed that the proposed method reduces a transient error as well as implementing smooth mode transition.

Keywords: mode transition, grid connected inverter, standalone inverter, UPS

1. 서 론

최근 에너지 위기로 인해 신재생에너지에 대한 수요가 증가하고 있고, 이에 따라서 신재생에너지를 활용하는 발전시스템의 관심도 증가하고 있다. 많은 신재생에너지원 중에서 에너지 변환의 용이성, 지속성, 그리고 경제성 측면에서 태양광을 사용하는 태양광발전시스템에 대한 연구가 많이 이뤄지고 있다. 그러나 태양광에너지를 사용하는 시스템은 밤에는 발전이 불가하고, 발전량 또한 일사량에 따라서 달라지는 불규칙적인 특성을 갖는다. 따라서 태양광 에너지를 필요로 하는 시간과 공간에 적절하게 사용하기 위하여 배터리와 연계하여 사용하는 에너지 저장장치에 대한 관심이 증가하고 있다^[1].

현재 태양광에너지 및 배터리와 연계하여 사용되는 시스템은 정전시 백업을 위하여 독립운전 기능과 계통연계기능을 수행할 수 있어야만 한다^[2]. 예상치 못한 정전 발생시 상해, 데이터 손실, 경제적 손실 등 많은 문제들이 발생할 수 있기 때문이다. 게다가 의료기관에서 사용되는 생명보조 장치, 반도체공장의 제조장비용 전원장치, 산업용 고정밀 제어기 등과 같이 민감한 부하들은 고품질의 전력을 요구하고 있다^[2]. 이러한 문제들로 인하여 최근 인버터의 제어 알고리즘의 개선을 통해 문제를 해결하기 위한 연구가 진행되고 있다^[2-6]. 이에 따라 계통연계형 인버터에서 계통연계모드와 독립운전모드의 전환 시 매끄럽게 동작할 수 있도록 하는 알고리즘에 대한 연구가 진행되었다^[1]. 그리고 모드전환 시 제어기의 과도상태로 인해 발생할 수 있는 THD(Total Harmonic Distortion)의 변화를 최소화 하기 위하여 주파수 가변 기법을 사용하였다^[2]. 참고논문 [3]에서는 중요부하들의 안전을 위하여 계통의 사고와 같은 비정상적인 조건하에서 응답시간을 고려한 모드 전환 기법에 대하여 연구하였다^[3]. 또한 모드전환 시 매끄러운 전환을 위하여 간접 전류 제어 기법을 사용하여 안정적으로 부하에 전력을 공급하는 연구도 보고되고 있다^[4]. 이 연

Paper number: TKPE-2013-18-6-10

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Konkuk University

Tel: +82-2-450-3496 Fax: +82-2-447-9186

¹ Dept. of Electrical Eng., Konkuk University

Manuscript received Sep. 4, 2013; accepted Oct. 22, 2013

— 본 논문은 2013년 전력전자학술대회 우수추천논문임

구결과에 의하면 매끄러운 모드전환이 가능하나 간접전류제어 기법의 경우 전압을 직접제어하기 때문에 유효 전력 및 무효전력을 계산하는 부분이 따로 필요하게 되는 제어가 복잡해지는 단점이 있다. 위와 같은 연구의 대부분은 계통연계형 인버터가 전력 계통에 직접 연결되어 있는 상황을 가정하여 연구가 진행되었다. 그러나 최근에는 계통측 전원뿐 아니라 신재생에너지 또는 에너지 저장장치와 같은 대체 전원이 연결되어 있으며, 이를 고려한 모드 전환 알고리즘의 개발이 요구되고 있다.

계통연계운전의 경우 양방향 전력제어를 위하여 일반적으로 입력단 전압제어와 출력단 전류제어를 사용하고, 독립운전의 경우 출력단 전압, 전류제어를 필요로 한다. 이로 인해 계통연계운전에서 단독운전 모드로 전환 할 경우 각 제어기들의 낮은 동특성으로 인하여 과도상태에서 전압강하의 문제가 발생한다. 이와 같은 문제는 각 제어기들의 제어 대역폭을 넓게 하면 해결이 가능하나 현실적으로 전체 제어 시스템의 안정성을 고려할 경우 제어 대역폭을 일정 수준 이상으로 높이는 것이 매우 어렵다. 따라서 간접 전류제어와 같은 다른 제어 기법을 사용하지 않을 경우 이를 보상해줄 수 있는 별도의 알고리즘이 필요하다^[5].

그림 1은 본 논문에서 다루는 리튬이온 배터리와 태양광 패널을 연결한 에너지 저장 장치 시스템을 보여주고 있다. 또한 계통연계운전에는 출력단 전류제어를 하였고, 독립운전에서는 출력단 전압제어를 사용하여 계통연계기능과 독립운전기능이 가능하도록 하는 전체 동작 알고리즘 및 모드 전환 시 매끄럽게 동작할 수 있도록 하는 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한 제안한 알고리즘에 관한 이론적인 분석을 하였고, 이의 검증을 위하여 전력전자 해석용 소프트웨어 패키지인 PSIM을 이용한 시뮬레이션과 3kW급 시작품을 이용한 실제 실험을 실시하였다.

2. 기존의 시스템의 제어기 설계 및 모드전환 알고리즘의 문제점

본 논문에서 사용하는 에너지 저장장치 시스템은 배터리 및 신재생에너지와 연계가 가능한 시스템이다. 이에 따라 계통에 이상이 발생하여도 배터리가 방전되기 전까지 전력을 공급하는 대체 전원으로써의 기능을 갖는다. 따라서 에너지 저장장치 시스템은 계통과는 독립된 전력 공급원이 될 수가 있고, 이러한 동작을 하기 위해 인버터는 다음과 같은 세 가지 기능을 갖추고 있어야 한다.

- (1) 계통 연계 기능
- (2) 독립된 전원으로써 단독 운전 기능
- (3) 계통의 정전 및 복전 검출 기능

2.1 인버터 제어기 설계^[9~11]

에너지 저장장치 시스템은 기본적으로 전력을 전달하

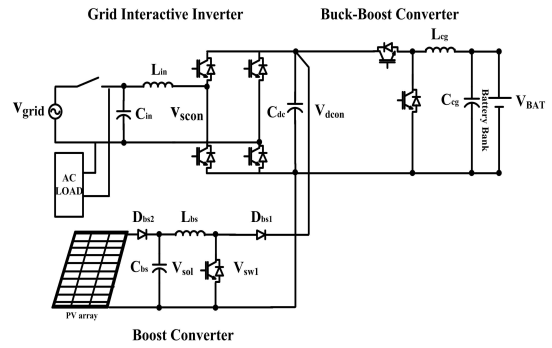


Fig. 1 Circuit of the energy storage system

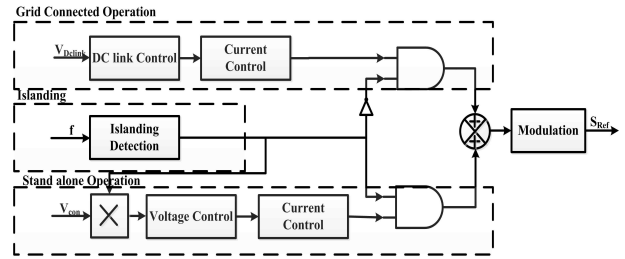


Fig. 2 Conventional mode transfer algorithm

는 기능을 주목적으로 하기 때문에 위에서 언급한 계통 연계 기능과 독립형 기능이 필수적이다.

계통 연계 모드로 동작을 할 경우 인버터는 양방향으로 전력을 전달할 수 있어야 하고, 이를 위해서 계통연계형 인버터의 제어는 직류링크단의 전압과 출력단의 전류제어를 하게 되는 이중루프 구조를 갖도록 설계해야한다. 또한 역률과 전력을 동시에 제어하기 위하여 동기좌표계에서 제어하였으며, 아래와 같이 전압과 전류의 제어 규칙을 정하여 제어기를 설계하였다^[9,10].

식 (1), (2)는 전압제어기 규칙이고 아래와 같다.

$$i_q^* = -(k_{pv} + \frac{1}{s}k_{iv}) \times (V_{dcon}^* - V_{dcon}) + I_{ff} \quad (1)$$

$$i_d^* = 0. \quad (2)$$

식 (3), (4)는 전류제어기 규칙이고 아래와 같다.

$$v_q^* = (k_{pi} + \frac{1}{s}k_{ii}) \times (i_q^* - i_q) + \omega_{ni}L i_d + e_q \quad (3)$$

$$v_d^* = (k_{pi} + \frac{1}{s}k_{ii}) \times (i_d^* - i_d) - \omega_{ni}L i_q + e_d \quad (4)$$

위의 식을 통해 극배치 기법을 사용하여 전압, 전류제어기의 계인을 구하면 아래 식 (5), (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{pv} = 2\zeta\omega_{nv}C_{dc}, k_{iv} = \omega_{nv}^2C_{dc} \quad (5)$$

$$k_{pi} = 2\zeta\omega_{ni}L_{in}, k_{ii} = \omega_{ni}^2L_{in}. \quad (6)$$

또한 독립형으로 동작을 하였을 때는 부하로 계통과 동일한 전압을 인가해줘야 하기 때문에 인버터는 전력을 단방향으로 전달해주는 구조를 갖게 된다. 따라서 출력단의 전압제어와 전류제어를 갖는 이중루프 제어를 설계해야하며, 아래와 같이 전압과 전류의 제어 규칙을 세우고 제어기를 설계하였다^[10,11].

식 (7), (8)는 전압제어기 규칙이고 아래와 같다.

$$i_q^* = (k_{pv} + \frac{1}{s}k_{iv}) \times (v_q^* - v_q) + \omega_{nvs} C_{in} v_d + I_{Lq} \quad (7)$$

$$i_d^* = (k_{pv} + \frac{1}{s}k_{iv}) \times (v_d^* - v_d) - \omega_{nvs} C_{in} v_q + I_{Ld}. \quad (8)$$

식 (9), (10)은 전류제어기 규칙이고 아래와 같다.

$$v_q^* = (k_{pis} + \frac{1}{s}k_{iis}) \times (i_q^* - i_q) + \omega_{ins} L_{in} i_d + e_q. \quad (9)$$

$$v_d^* = (k_{pi} + \frac{1}{s}k_{ii}) \times (i_d^* - i_d) - \omega_{nis} L_{in} i_q + e_d. \quad (10)$$

위의 식을 극배치 기법을 이용하여 전압, 전류제어기의 계인을 구하면 아래 식 (11), (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$k_{pv} = 2\zeta\omega_{nvs} C_{in} \quad k_{iv} = \omega_{nvs}^2 C_{in}. \quad (11)$$

$$k_{pi} = 2\zeta\omega_{nis} L_{in} \quad k_{ii} = \omega_{nis}^2 L_{in}. \quad (12)$$

2.2 기존 모드전환 알고리즘의 문제점

그림 3, 4는 위에서 설계한 인버터를 사용하여 그림 2의 기존의 알고리즘을 구성하고 시뮬레이션을 한 결과이다. 여기서 그림 3은 계통연계운전에서 독립운전으로 넘어가는 상황을 나타내고 있다. 초기에 계통연계운전으로 동작을 하고 있으며 중간에 계통에 사고(Grid Fault)가 발생하게 되었을 때, 단독운전 검출 알고리즘을 통하여 일정시간이 지난 후에 이상 검출을 한다. 또한 단독운전 검출 후 독립운전으로 운전모드 전환(SW off)이 발생하게 된다. 이때 계통의 전압강하는 단독운전을 검출하는데 걸리는 시간과 모드전환이 발생하였을 때 제어기의 과도상태가 존재하기 때문에 생기는 문제이다. 그림 4는 독립운전모드에서 연계운전모드로 전환하는 부분을 나타내고 있다. 독립운전모드에서 연계운전모드로 전환 시 계통전압과 에너지저장장치 시스템과의 위상차가 존재하는 것을 볼 수 있고, 이때 모드전환을 시도하게 되면 순간적으로 정격전류의 과전류(Over current)가 시스템으로 유입되어 최악의 경우 시스템의 소손이 발생 할 수 있다. 또한 순간적으로 시스템에서 추종하는 주파수가 크게 변동하여 계통의 사고가 발생하지 않아도 발생한 것으로 인지할 수가 있다.

3. 제안된 모드 전환 알고리즘

모드전환 시 기존의 제어기를 사용했을 때 문제가 되는 점은 제어기의 과도상태와 사고의 발생시간, 복전 시 위상 불일치이다. 이러한 문제는 계통전압의 강하와 큰 돌입전류와 같이 매끄럽지 못한 모드전환을 만드는 주요 요인이 된다. 본 논문에서는 이 문제를 해결하기 위하여 그림 5와 같은 알고리즘을 제안하였다. 그림 5는 기존의 알고리즘에서 문제가 되는 모드전환 시 계통연계운전과 독립운전 사이에 발생하는 제어기 과도상태 문제, 계통의 사고 발생 시 검출까지의 지연시간을 개선할 수 있도록 하였다.

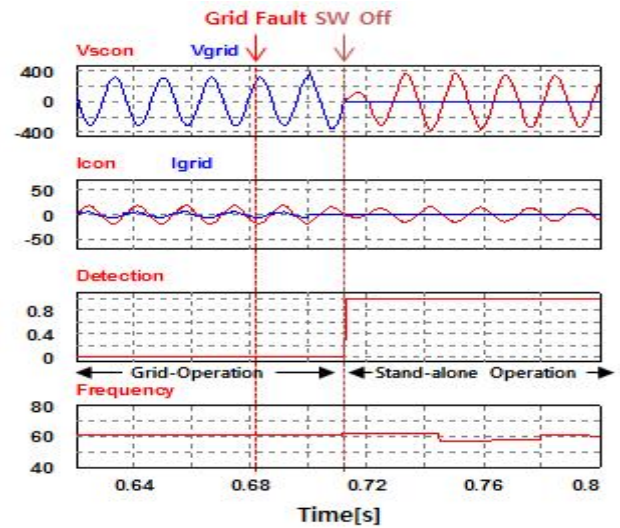


Fig. 3 Simulation waveforms of mode transfer from grid-operation to stand-alone operation using conventional mode transfer algorithm

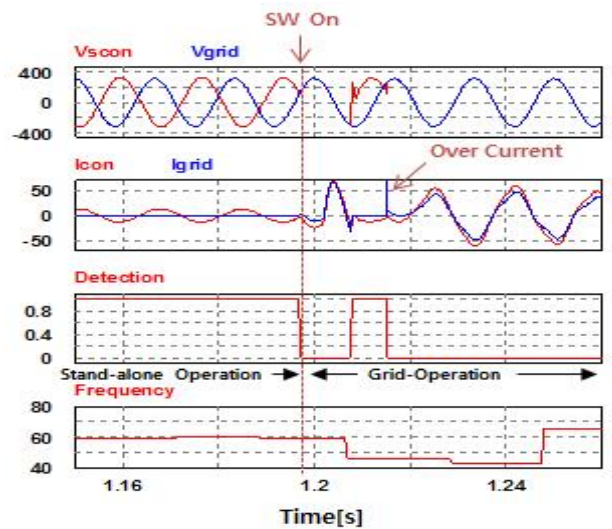


Fig. 4 Simulation waveforms of mode transfer from stand-alone operation to grid-operation using conventional mode transfer algorithm

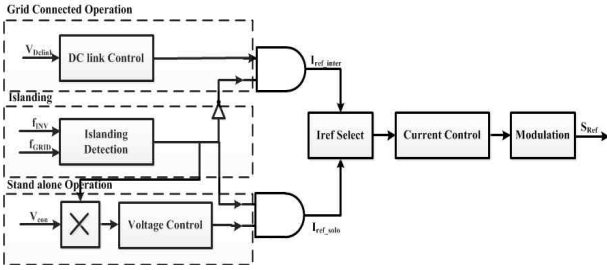


Fig. 5 Proposed mode transfer algorithm

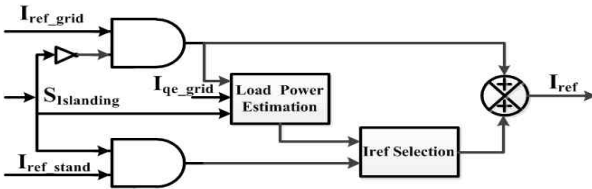


Fig. 6 Mode transfer algorithm for decreasing transient time

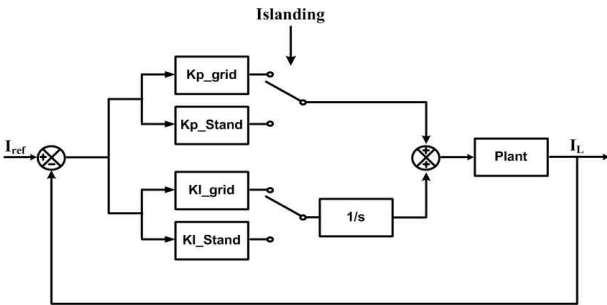


Fig. 7 Current controller block

여기서 기존알고리즘과 다른 점은 두 가지가 있다. 그 두 가지는 전압제어의 과도상태를 개선하기 위하여 전류제어기 전에 전류제어기의 지령치(Iref Select)를 선택할 수 있도록 알고리즘을 추가하였고, 전류제어기의 과도상태를 개선하기 위하여 기존의 그림 5와 같이 두 개의 전류제어기를 하나로 통합하고 제어기의 이득만 변경하도록 하였다.

3.1 전류제어기 지령치 선정 알고리즘

그림 6은 전압제어기의 과도상태를 개선하기 위한 알고리즘이다. 계통연계운전에서는 I_{ref_grid} 를 지령치로 하여 동일하게 동작을 하며, 계통에서 사고가 발생하면 $S_{Islanding}$ 의 신호가 들어오게 되고 모드가 전환이 발생하게 된다. 이때 바로 독립운전모드로 전환되는 것이 아니라 전압의 PI 제어기의 과도상태를 개선하기 위하여 부하전류를 이용하였다. 본 시스템에는 부하전류에 대한 전류 센서가 없으므로 부하전류를 추정하는 부분을 식 (13)~(15)과 같이 이용하여 추가하였다.

여기서 식 (13)인 I_{qe_ave} 는 계통전류 피크치의 평균값

을 얻기 위해서 T_s 는 샘플링 주기, n 는 상수값, I_{qe_grid} 는 계통전류의 피크치를 사용하였고, 다음과 같다.

$$I_{qe_ave} = \frac{1}{T_s n} \int_0^{T_s n} I_{qe_grid} dt \quad (13)$$

식 (14)는 추정하는 부하전류이며, I_{ref_grid} 는 인버터 전류 지령치를 사용하였고, 다음과 같다.

$$I_{Load_ob} = I_{qe_ave} - I_{ref_grid} \quad (14)$$

식 (15)는 추정하는 부하 임피던스이며 아래와 같다.

$$Z = \frac{V_{qe_grid}}{I_{Load_ob}} \quad (15)$$

이는 부하전류의 추종을 통하여 부하의 임피던스 알 수 있고 모드전환 시 단독운전으로 인해 감소하는 전압과 전압제어기의 과도상태를 보상해줄 수 있게 된다. 따라서 계통의 사고를 단독운전알고리즘에서 검출을 하게 되면, 운전모드의 전환이 발생하게 되고, 이 때 전압제어기의 과도상태가 안정화 될 때까지 계산된 부하의 전력을 발전하게 된다. 이는 본 시스템의 부하에서 요구되는 만큼의 전류 지령치를 입력해줌으로써 기존의 교류 220V를 계통 사고전과 같이 공급해줄 수 있다.

3.2 모드에 따른 전류제어기 이득 선정

그림 7은 전류제어기의 모드전환에 따른 게인값의 변화를 고려하기 위한 알고리즘이다. 이 부분은 제한된 알고리즘을 나타내고 있는 그림 5에서 전류제어기를 통한 하기 때문에 나타내었다. 식 (6)과 (12)는 전류제어기의 게인을 나타내고 있다. 여기서 인버터 제어기를 설계하는데 있어서 계통연계형 인버터의 전류 제어기 대역폭 (ω_{ni})과 독립형 인버터의 전류제어기 대역폭(ω_{nis})은 전류제어기 성능을 결정하는 중요한 요소이다. 일반적으로는 전류제어기의 대역폭은 스위칭 주파수의 1/10~1/20로 정한다면 두 제어기의 게인은 같다고 볼 수 있지만, PI 제어기의 특성상 실제 시스템에서 제어기의 최적게인을 찾기 위하여 튜닝이 필요하다. 따라서 각 모드에 맞도록 게인을 설정하였으며, 두 가지 모드의 제어이득 값이 다르기 때문에 운전모드에 따라서 이득 변화도록 하였다.

3.3 복전 시 주파수 변경 알고리즘

그림 8은 독립운전모드에서 연계운전모드로 전환 시 위상 불일치에 관한 문제를 해결하기 위한 알고리즘이다. 독립운전모드로 동작 중에 계통이 복전 되었을 때 계통과 시스템간의 전압의 위상차가 존재하게 되고 이 때문에 모드전환을 바로 할 수 없게 된다. 따라서 시스

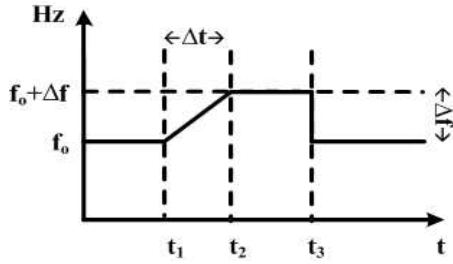


Fig. 8 Frequency variation techniques for mode transition

템은 계통의 복전을 인지하고 인지 후에 계통의 주파수를 추종하기 위하여 시스템의 전압주파수를 허용되는 범위 안에서 일정하게 증가 또는 감소시켜 일치하는 부분에서 모드전환을 하게 된다. 이를 위해서 식 (16)~(18)과 같이 재투입 신호가 들어오게 되면 일정 시간 동안 일정 비율로 증가 또는 감소가 되도록 주파수 지령치를 변동시키게 된다. 본 논문에서는 주파수의 증감의 범위는 59.7~60.3[Hz] 이내로 설정하였다. 또한 이에 따라서 위상이 변하게 되어 계통 시스템간의 위상을 같게 만들게 된다.

$$f_{Ref} = f_o(t < t_1) \tag{16}$$

$$f_{Ref} = f_o + \frac{\Delta f}{t_2 - t_1} t(t_1 \leq t < t_2) \tag{17}$$

$$f_{Ref} = f_o(t > t_3) \tag{18}$$

여기서 f_{Ref} 는 주파수 지령치, f_o 는 계통연계형 주파수 지령치, Δf 는 주파수 변화량이다.

4. 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 모드전환 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 9과 같이 전체 동작알고리즘을 구성하였으며, 시스템의 전기적 특성은 표 1에 나타내었다. 전체 시스템의 용량은 3[kW]를 기준으로 설계하였으며, 사용된 배터리는 150[V], 20[AH]의 리튬이온 배터리를 기준으로 하였다. 또한 부하는 선형부하로 하였으며 신재생에너지로부터 발전되는 발전량은 소비되는 부하와 동일하다고 가정하였다. 이는 단독운전을 고려하여 하였을 때, 계통으로부터 들어오는 유효전력이 최소일 경우 단독운전을 검출하기 어렵기 때문이다.

그림 10~11은 제안된 알고리즘을 적용한 시뮬레이션을 나타내고 있다. 부하를 2, 3kW로 변동시키면서 모드전환을 하였다. 그림 10~11(a)는 연계운전모드에서 독립운전모드로 전환하는 경우를 나타내고 있다. 여기서 계통사고 후 약 10ms 이내에 사고를 검출하였으며 전환시 전압의 과도상태가 거의 발생하지 않았다. 그림 10~11(b)는 독립운전모드에서 연계운전모드로 전환하는 경우를

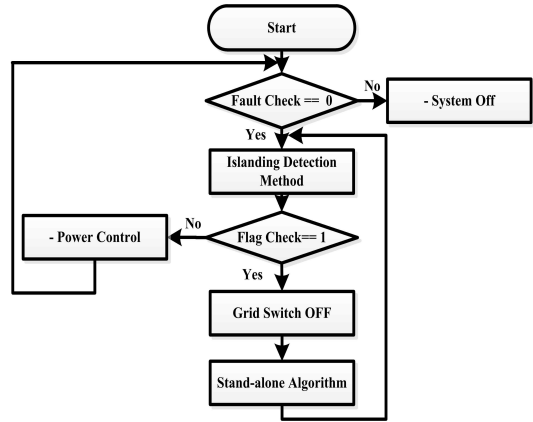


Fig. 9 Operation algorithm for ESSs

Table 1 Parameter of ESSs

Parameter	Value
$P_{inverter}$	5kW
$P_{DC/DC}$	3kW
P_{sol}	3kW
DC link Voltage	380V
Grid Voltage	220Vac, 60Hz
Battery Voltage	140~160V
Solar Voltage	280V
Inverter frequency	10kHz
DC/DC frequency	20kHz
Boost frequency	20kHz

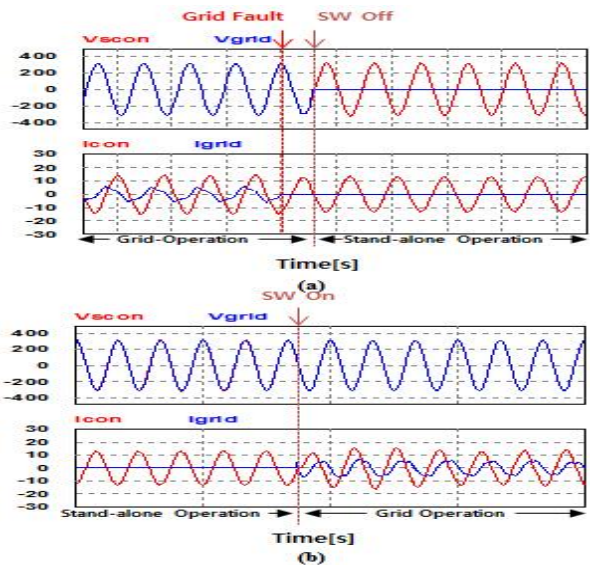


Fig. 10 Simulation waveforms of proposed algorithm at 2kW Load

나타내고 있다. 이때 계통전압과 인버터의 전압의 위상이 맞는 것을 확인할 수 있고, 모드 전환 시 계통으로부터 돌입전류가 발생하지 않았으며 매끄럽게 전환 되는 것을 확인할 수 있다.

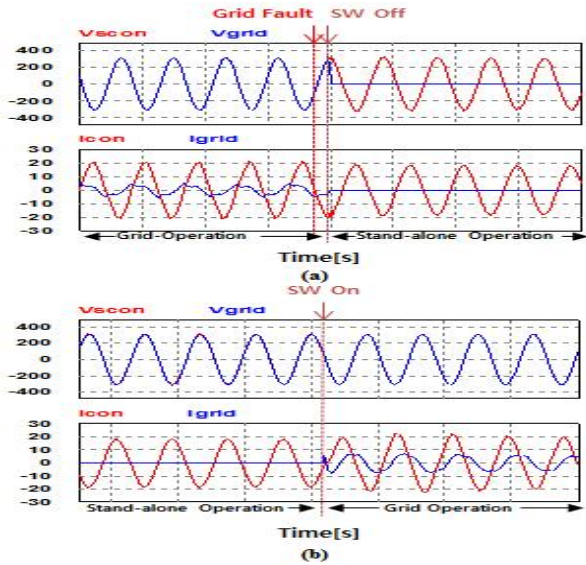


Fig. 11 Simulation waveforms of proposed algorithm at 3kW Load

5. 실험 및 결과 분석

본 논문에서 제안된 모드전환 알고리즘을 검증하기 위하여 그림 12와 같이 계통연계형 인버터, 양방향 DC/DC 컨버터, 승압형 DC/DC 컨버터를 제작하였다. 또한 전체 시스템의 용량은 3[kW]를 기준으로 제작하였으며, 사용된 배터리는 150[V], 20[AH]의 리튬이온 배터리 사용하였다.

그림 13~16는 제안된 알고리즘을 검증하기 위하여 같은 조건하에서 부하를 2, 3kW로 변경시키면서 제안된 알고리즘을 사용하여 실험한 결과이다. 그림 13, 14는 2kW 부하에서 부하추정알고리즘의 적용 전과 후를 나타내고 있다. 그림 13, 14(a)에서는 계통연계 운전 모드에서 독립운전 모드로 전환시 제안된 알고리즘의 추정



Fig. 12 Experimentation set

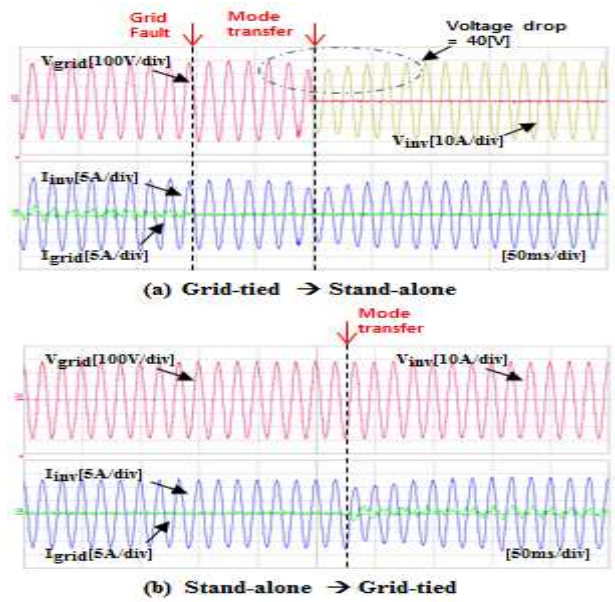


Fig. 13 Experimental waveforms without proposed algorithm at 2kW Load

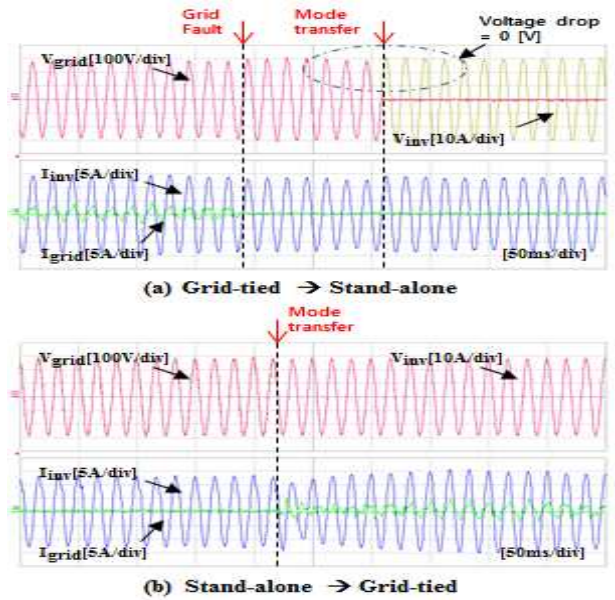


Fig. 14 Experimental waveforms with proposed algorithm at 2kW Load

의 유무에 따른 모드전환시 출력되는 전압의 변동을 나타내었다. 적용 전에는 약 3주기의 과도상태가 발생하였으며, 전압강하가 약 40[V]정도가 발생하였다. 그러나 적용 후에는 전압강하가 거의 발생하지 않았다. 그림 13, 14(b)는 독립운전 모드에서 계통연계 운전 모드로 전환시 파형을 나타내고 있다. 제안된 알고리즘에 따라 계통전압과 시스템에서 발전하는 전압의 위상이 정확히 일치하는 것을 확인 할 수 있고, 전환 시 계통에서 전류의 돌입이 없는 것을 확인 할 수 있다. 그림 15, 16는 3kW 부하에서 부하추정알고리즘의 적용 전과 후를 나

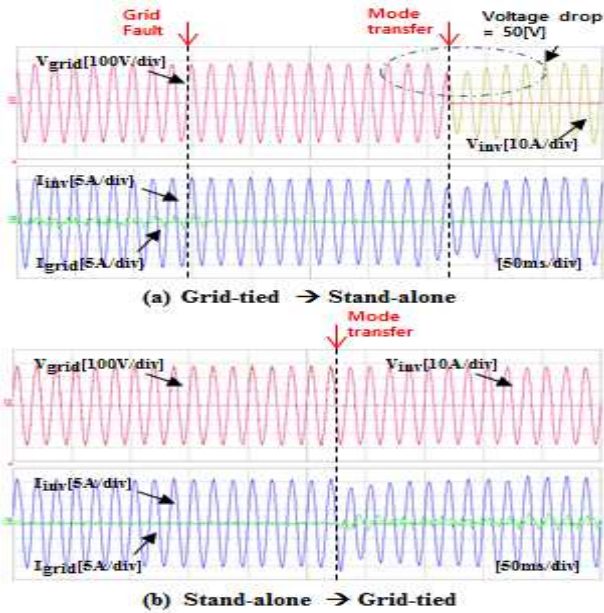


Fig. 15 Experimental waveforms without proposed algorithm at 3kW Load

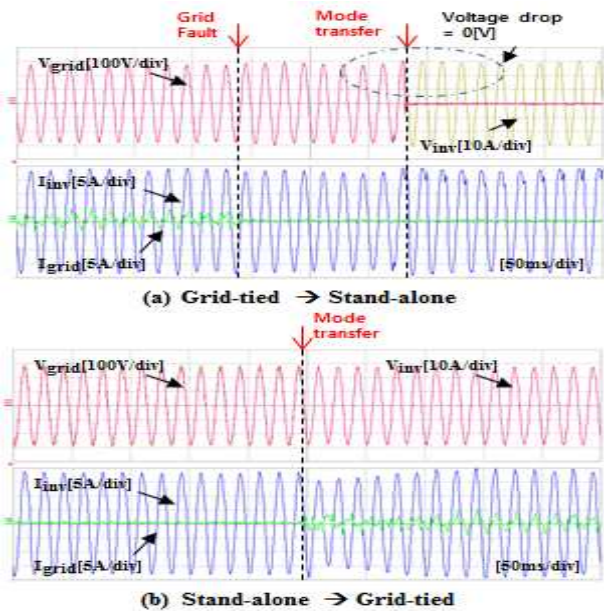


Fig. 16 Experimental waveforms with proposed algorithm at 3kW Load

태내고 있다. 그림 15, 16(a)는 제안된 알고리즘의 적용 전과 후를 나타내고 있으며, 적용 전에는 약 50[V]정도 전압강하가 발생하였고, 적용 후에는 거의 전압강하가 발생하지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 그림 15, 16(b) 또한 위상 추종이 제대로 수행되고 있는 것을 확인 할 수 있으며 절환시 계통으로부터 돌입되는 전류가 없는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 전체 시스템이 허용되는 전체 부하에서 매끄러운 모드절환이 가능한 것을 확인하였다.

6. 결 론

본 논문에서는 에너지 저장장치 시스템에서 연계운전과 독립운전의 모드절환 시 발생할 수 있는 과도상태를 개선하기 위한 연구를 진행하였다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증이 되었고, 다음과 같이 두 가지로 요약하였다.

- 기존의 사용되는 알고리즘을 통하여 모드절환을 하였을 경우의 계통연계 운전 모드에서 독립운전 모드로 절환시 발생하는 문제점과 독립운전 모드에서 연계운전 모드로 절환시 문제점에 대하여 확인하였다.
- 제안된 알고리즘을 통하여 적용 전과 후를 비교하였을 때, 적용 전에는 약 전압강하가 40~50[V]가 발생하였으며, 적용 후에는 전압강하가 거의 없어지는 것을 확인하였다.

본 연구에서는 모드 절환에 따른 매끄러운 운전이 가능한 알고리즘에 대하여 연구를 하였고, 제안된 알고리즘에 대한 유효성을 입증하였다. 향후 대용량 및 부하 조건을 다양하게 하여 좀 더 신뢰성을 높일 수 있는 연구가 필요하다.

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No.C0041237)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] D.J. Lee, L. Wang, "Small-Signal Stability Analysis of an Autonomous Hybrid Renewable Energy Power Generation/Energy Storage System Part I: Time-Domain Simulations," *IEEE Trans. on energy conversion*, Vol. 23, pp. 311-320, 2008.
- [2] M.N. Arafat, S. Palle, Y. Sozer, I. Husain, "Transition Control Strategy Between Standalone and Grid-Connected Operations of Voltage-Source Inverters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 48, pp. 1516-1525, 2012.
- [3] T.S. Hwang, S.Y. Park, "A Seamless Control Strategy of a Distributed Generation Inverter for the Critical Load Safety Under Strict Grid Disturbances," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 28 pp. 4780-4790, 2013.
- [4] J.B. Kwon, S.J. Yoon, S.W. Choi, "Indirect Current Control for Seamless Transfer of Three-Phase Utility Interactive Inverters," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 27 pp. 773-781, 2012.
- [5] H.M. Oh, S.W. Choi, T. H. Kim, "Anti-islanding Method by Harmonic Injection for Utility Interactive Inverter with Critical Load," *Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, pp. 315-321, Aug. 2012.

- [6] W.P. Zhang, D.H. Xu, X. Li, R. Xie, H.J. Li, "Seamless Transfer Control Strategy for Fuel Cell Uninterruptible Power Supply System," *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 28, pp. 717-729, 2013.
- [7] G.H. Choe, B.G. D, Y.J. Lee, D.H. Han, B.H. Jeong, H.S. Kim, "Characteristics Analysis of RPV and AFD for Anti-Islanding in Active Method," *The transactions of korea institute of power electronics*, Vol. 2, pp. 160-167, April 2009.
- [8] H.S. Kim, H.G. Kim, G.H. Choe, J.C. Kim, Y.H. Choi, "An Analysis and Design of RPV and AFD Method for Anti-Islanding of Single-Phase UIPV System under The Test Condition Recommended by IEEE 929-2000," *The transactions of korea institute of power electronics*, Vol. 1, pp. 37-49, Feb. 2007.
- [9] H.S. Kim, "Design of A New Controller for 3-Phase Utility Interactive Photovoltaic System," Ph. D. Dissertation, Konnkuk University, 1998.
- [10] J.S. Gho, "Optimal Design of Controller for PWM Converter and Inverter System," Ph. D. Dissertation, Konnkuk University, 2001.
- [11] J.S. Cho, "A Study on Modified Deadbeat Digital Controller for Constant Voltage Output Characteristics of 3-Phase UPS," Ph. D. Dissertation, Konnkuk University, 1999.



변병주(邊秉柱)

1988년 12월 10일생. 2011년 건국대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석박사과정.



서현욱(徐玄旭)

1989년 1월 2일생. 2011년 건국대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석박사과정.



조영훈(曹永勳)

1980년 2월 4일생. 2002년 건국대 전기공학과 졸업. 2004년 서울대 전기공학과 졸업(석사). 2012년 버지니아공대 졸업(공학박사). 2004년~2009년 현대모비스 기술연구소 주임연구원. 2012년~2013년 에너트로닉스 책임연구원. 2013년~현재 건국대 전기공학과 조교수.



최규하(崔圭夏)

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 전기공학과 Post-Doc. 1998년~1999년 버지니아주립대 교환방문교수. 1996년~현재 건국대 산업기술연구원 인버터제어기술연구센터 소장. 현재 건국대 전기공학과 교수. 2007년~2008년 당 학회 회장역임.