

마이크로그리드용 4-Leg 방식 PCS의 각상 개별제어 알고리즘에 관한 연구

김승호^{1,2}, 최성식¹, 김승종², 노대석^{1*}

¹한국기술교육대학교 전기전자통신공학부, ²세방전기

Single-phase Control Algorithm of 4-Leg type PCS for Micro-grid System

Seung-Ho Kim^{1,2}, Sung-Sik Choi¹, Seung-Jong Kim², Dae-Seok Rho^{1*}

¹Department of Electronic and Electrical Engineering, Korea University of Technology & Education,

²Global Electricity Co. Ltd

요약 AC 방식 마이크로그리드는 다양한 DC/AC 인버터를 AC 네트워크에 연결하여, DC 방식 마이크로그리드의 약점을 극복 하고 있다. 그러나 소규모 마이크로그리드에서 일반적으로 발생하는 심각한 부하 불평형 현상에 의하여, AC 마이크로그리드 시스템의 성능을 약화시킬 수 있다. 이것은 마이크로그리드 내의 불평형 부하로 인하여 상별 에너지 흐름과 전압조정 기능이 제한되기 때문이다. 이러한 불평형 전압문제를 해결하기 위하여, 3상 4Leg 방식의 인버터가 제안되고 있지만, 이를 안정적으로 운용할 수 있는 제어알고리즘이 미비한 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 부하 불평형에 의해서 발생하는 인버터의 전압 불평형 문제를 해결하고 안정적으로 제어하기 위하여 d-q제어를 기반으로 3상4선식 인버터의 각상 개별제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이 알고리즘을 바탕으로 Matlab/Simulink를 이용하여 4-Leg 방식의 전압제어기 모델링을 수행하였다. 이 모델링과 250KW급 시험장치를 바탕으로 인버터의 출력전압 제어특성을 분석한 결과, 정상상태에서는 기존의 방식과 비슷한 특성을 보이지만, 과도상태에서는 제안한 각상 개별제어 방식이 기존의 방식보다 안정적으로 동작하여 제안한 방식의 유용성을 확인할 수 있었다.

Abstract The AC-common bus microgrid system can overcome several weaknesses of the DC microgrid system by interconnecting the DC/AC inverters used for renewable energy with an AC network. Nevertheless, the unbalanced loads inherent in the electric power systems of island and small communities can deteriorate the performance of the AC microgrid system. This is because of the limited voltage regulation capability and mixed power flow in the voltage source inverter. In order to overcome the unbalanced load condition, this paper proposes a voltage and current control algorithm for the 4-leg inverter based on the single phase d-q control method, as well as the modeling of the voltage controller using Matlab/Simulink S/W. From the S/W simulation and experiment of the 250KW proto-type inverter, it is confirmed that the proposed algorithm is a useful tool for the design and operation of the AC microgrid system.

Keywords : Energy sinking, Four-Leg Inverter, Micro-grid, Single phase control, Unbalanced Load

1. 서론

독립형 마이크로그리드는 전력계통으로부터 멀리 떨어진

어진 마을이나 섬에서 효과적인 전력공급의 대안으로 간주되어왔다. 마이크로그리드는 기본적으로 ESS, PV(태양광 발전), 풍력 및 소형 수력 발전소와 같은 신재생에

본 연구는 2014년~2017년도 한국에너지기술평가원의 연구(No20141020402450)에 의하여 수행되었음.

*Corresponding Author : DaeSeok Rho(Koreatech)

Tel: +82-41-560-1167 email: dsrho@koreatech.ac.kr

Received September 18, 2017

Revised (1st October 10, 2017, 2nd October 20, 2017)

Accepted November 3, 2017

Published November 30, 2017

너지 및 백업 디젤 발전기로 구성된 시스템이다[1, 2]. 일반적인 DC 마이크로그리드 시스템은 구성요소의 과다, 신뢰성의 병목현상 및 부하수요 증가 대비 제한된 용량 문제와 같은 단점을 가지고 있다[3, 4]. 하지만 AC 마이크로그리드는 다양한 DC/AC 인버터를 AC전원 네트워크에 연결하고 EMS(Energy Management System)를 적용하여 DC 마이크로그리드 시스템의 약점을 극복할 수 있다.

여러 대의 인버터로 연결된 AC 방식의 시스템은 전력공급 능력을 증가시킬 수 있으며, 고유의 이중화된 구성으로 시스템의 안정성을 높일 수 있다[9]. 그럼에도 불구하고, 소규모 지역전력공급시스템에서 매우 일반적으로 발생하는 심각한 부하 불평형 현상은 AC 마이크로그리드 시스템의 성능을 약화시킬 수 있는데, 이는 불평형 부하로 인한 상별 에너지 흐름의 복합변동 및 상별 전압 조정 기능이 제한되기 때문이다. 대부분의 부하는 단상 부하이며 또한, 불평형 상태로 소비되고 있지만, 대용량 PV, 풍력 및 ESS용 PCS(Power Conditioning System)는 일반적으로 3상평형 시스템으로 설계되고 있다. 따라서 단상 부하로 인한 불평형 정도가 심각해지는 경우, 3상 PV 출력이 일정 수준에 이르렀을 때 ESS의 전력흐름이 어떤 상은 방전(Suppling), 어떤 상은 충전(Sinking) 상태가 되는 상황이 발생할 수 있으며, 이로 인하여 PCS의 전압조정에 불안정성을 초래할 가능성이 있다[5]. 이러한 불평형 전압문제를 해결하기 위하여 3상 4-LEG 방식의 인버터가 제안되고 있지만, 3상 4-LEG 방식의 인버터를 안정적으로 운용할 수 있는 제어알고리즘이 미비한 실정이다.

따라서 본 논문에서는 AC 마이크로그리드 시스템의 장점을 최대한 활용할 수 있는 양모드/양방향 4-LEG 인버터의 전압 및 전류 제어 알고리즘을 제안한다. 여기서 PCS의 양모드 기능은 계통연계 모드(전류 제어)와 독립 운전 모드(전압 및 주파수 제어)를 원활하게 절체시킬 수 있음을 의미한다. 한편 양방향 기능은 PCS가 독립 운전 모드로 그리드에 전력을 공급(Grid Forming)하는 상태에서 동시에 그리드로부터 잉여전력을 흡수할 수 있음을 의미하며, 이는 마이크로그리드에서 마스터(CVCF) 인버터가 기저전원(Grid Forming) 역할을 하면서 신재생전원의 잉여전력을 흡수할 수 있는 기능으로서 마이크로그리드의 계통안정성에 아주 중요한 요소가 된다. 또한, 본 논문에서는 부하 불평형에 의해서 발생하는 인버

터의 전압 불평형 문제를 해결하고 안정적으로 제어하기 위하여 기존의 단상 제어 방법을 조합하여 각상을 개별 제어하는 4-LEG 인버터의 각상 개별제어 알고리즘을 제안하였으며, 이러한 알고리즘에 대해 시뮬레이션 및 하드웨어 제작에 의한 시험을 통해 그 유용성을 확인하였다.

2. 마이크로그리드의 운용특성 분석

기존의 DC 마이크로그리드 시스템에 비해 AC 마이크로그리드 시스템은 단순화된 설계, 계통연계 및 독립형으로 동작하는 능력, 전력공급 용량의 확장 용이성 및 높은 시스템 신뢰성 등의 이점을 가진다. AC 마이크로그리드 시스템에서 Grid-forming 기술은 제어관점에서 매우 중요한 요소이다. Grid-forming은 공급과 수요 사이에서 유효전력과 무효전력의 균형을 맞추어 시스템 전압과 주파수를 일정한 값으로 유지하는 것을 의미한다.

AC 마이크로그리드에서 디젤발전기는 부하변동 및 PV 출력변동에 관계없이 전압 및 속도 제어기에 의해 시스템 전압 및 주파수를 각각 일정하게 유지시킨다. 그러나 디젤발전기-PV 시스템으로 구성된 마이크로그리드의 경우, 디젤발전기는 PV 시스템의 출력이 부하보다 클 때 잉여전력을 흡수할 수 없으므로 Grid-forming용 ESS가 필요하며, 이러한 독립형 마이크로그리드 시스템을 위한 디젤 및 PV, 그리고 ESS로 구성된 하이브리드 시스템은 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 디젤발전기를 제외한 모든 에너지원은 PCS를 통해 AC-공통 부스에 연결된다. 이 경우 Grid-forming 장치는 디젤발전기 또는 ESS용 DC/AC 인버터가 그 역할을 수행한다.

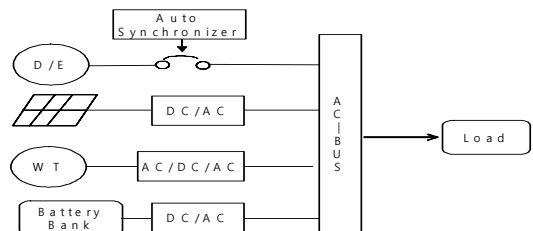


Fig. 1. AC-Common bus micro-grid system with three phase inverter

여기서, 3상 인버터는 시스템 전압과 주파수를 제어하는

동안 단상 불평형 부하로 인해 발생하는 불평형 전력흐름에 직면하게 된다. 따라서 Grid-forming용 인버터의 전압제어기는 불안정해지거나 포화되어 인버터가 트립될 수 있는데, 이것은 회전동기좌표계의 d-q 변환 기법을 기반을 둔 전압제어기가 기본적으로 전압평형 조건에서 설계되기 때문이다. 기존의 인버터는 전압을 정상분 및 역상분으로 나누고, 각 성분에 대한 개별 제어기를 사용하여 전압불평형 문제를 부분적으로 해결할 수 있으나 안정성 측면에서 문제점이 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 상기의 문제를 해결하기 위하여 4-Leg 하드웨어 기반에서 각 상의 출력전압이 일정하도록 각 상이 독립적으로 개별 제어되는 알고리즘을 제시한다.

3. 3상 PCS의 각상 개별제어 알고리즘

3.1 기존의 3상 일괄제어 방식

그림 2는 선형/비선형 혹은 평형/불평형 부하에 적용할 수 있는 3상4선식(3-phases 4-wire) 독립형 인버터의 구조를 나타낸 것이다. 기존의 3상3선식 인버터와의 차이점은 불평형부하에 따른 선간전압의 편차를 보상하기 위하여, 인버터 브릿지에 1개의 랙(Leg)이 추가된 것이다. 이러한 3상4선식 4-Leg 방식의 인버터를 제어하기 위하여 기존에는 3상 일괄제어방식의 제어기를 사용하여 왔는데, 그 구조를 나타내면 그림 3과 같다[6]. 그러나 3상 일괄제어방식은 전압불평형 문제를 부분적으로 해결할 수 있으나 부하가 각상별로 100%, 100% 0% 또는 100%, 0%, 0% 등과 같이 심각한 불평형 조건에서, 특정상은 과전압, 특정상은 저전압이 발생하여 시스템이 정지하는 등과 같이 전압 안정성 측면에서 문제점이 발생할 수 있다.

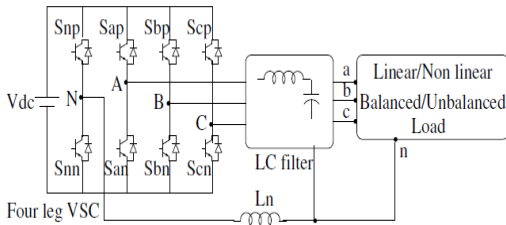


Fig. 2. Stand-alone 3phase 4wire 4-Leg inverter

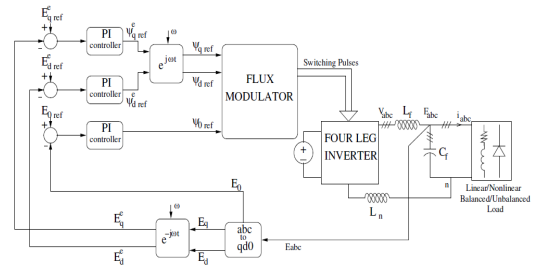


Fig. 3. Stand-alone four-LEG sinewave output inverter system

기존의 3상4선식 인버터의 4-Leg 육셋 공간벡터(Offset Space Vector)는 그림 4와 같이 육셋 전압(중성점 전압 벡터)을 구하여 각상의 전압 기준치에 더하여 각상 전압의 기준 값으로 하고, 육셋 전압을 중성점의 전압기준으로 하는 PWM 기법이다[7]. 그림 4와 같이 회전동기좌표계에서 연산한 전압 혹은 전류제어기의 출력 U_{de} , U_{qe} , U_{oe} 는 abc 3상 좌표계로 변환하면 V_{af}^* , V_{bf}^* , V_{cf}^* 가 되고, Max, Min 값(V_{max}^* , V_{min}^*)은 식 (1)과 같이 계산할 수 있다. 또한, 식 (2)에 의하여 육셋 값(v_{fo}^*)이 계산되고 이 값과 각 상의 전압기준치를 합산하여 4개의 PWM 기준신호를 만들 수 있다. 여기서, 4번째 랙의 PWM 기준신호는 육셋값(v_{fo}^*)이 된다.

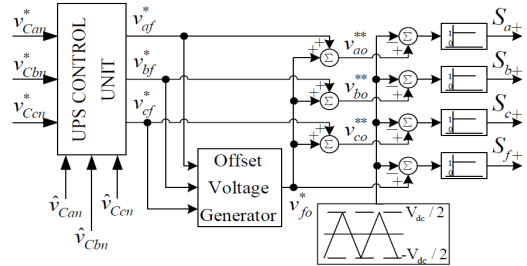


Fig. 4. Offset control of 4-Leg Inverter

$$v_{max}^* = \max(v_{af}^*, v_{bf}^*, v_{cf}^*) \quad \text{식 (1)}$$

$$v_{min}^* = \min(v_{af}^*, v_{bf}^*, v_{cf}^*)$$

$$v_{fo}^* = \begin{cases} -\frac{v_{min}^*}{2} & v_{max}^* < 0 \\ -\frac{v_{max}^*}{2} & v_{min}^* > 0 \\ -\frac{v_{max}^* + v_{min}^*}{2} & elsewhere \end{cases} \quad \text{식 (2)}$$

3.2 각상 개별제어 알고리즘

3.2.1 잉여전력의 Energy Sinking 메커니즘

단상 Half Bridge 인버터에서 에너지 흡수(Energy Sinking) 동작의 메커니즘을 나타내면 그림 5와 같다. 여기서 인버터는 전압제어모드로 운전 중이고, 출력 단에 부하(P2)가 인가되면 동일한 전력(P1)을 공급하면서 ($P1=P2$), PWM 동작에 의하여 출력전압이 일정하게 유지되도록 Q1의 펄스폭을 제어하고, 이때 인버터는 DC 공급전압에 대하여 강압형(Buck) 컨버터로 동작한다. 한편 Q2는 Q1과 교번(Toggle)으로 동작하며, Q1이 Off된 동안 Q2가 On이 되며 반대로 Q1이 On이 되면 Q2는 Off된다.

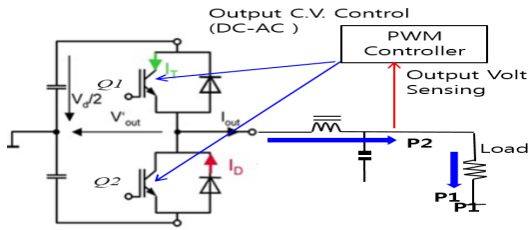


Fig. 5. Constant voltage operation of single phase Half Bridge inverter

한편, 그림 6과 같이 이 인버터의 출력 단에 MPPT 운전을 하는 분산전원이 연계되는 경우, 분산전원의 출력(P3)은 부하(P2)를 우선 공급하고 남은 잉여전력 ($P3-P2=P4$)은 전압제어모드로 운전되는 인버터의 내부 (배터리)로 유입되게 된다. 그러나 이렇게 전력이 유입되어도 Q1의 Diode를 거친 정류전압이 통상 DC 전압보다 높지 않으므로 에너지가 DC 측으로 흘러가지 못한다. 그러나 Q2가 스위칭 동작을 할 경우, 출력 측의 L에 의해 승압작용이 일어나므로 DC 전압이 상승하여 잉여전력이 인버터의 AC 측에서 DC 측으로 흡수되는 Boost 현상이 일어나게 된다.

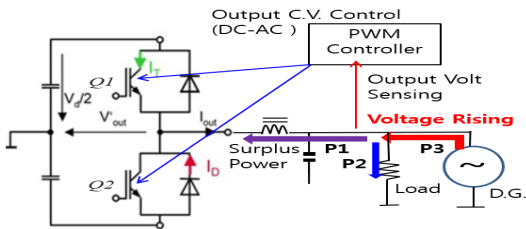


Fig. 6. Energy sink operation of single phase Half Bridge inverter

한편, 분산전원의 출력 P3에 의한 잉여전력의 에너지 흡수 과정에서 인버터의 AC 측에서 다소의 전압상승이 발생하지만, 인버터 제어회로는 출력전압이 일정하도록 PWM 제어를 수행하므로 Q1의 펄스폭을 줄이는 방향으로 제어가 이루어지며, 반대로 Q2의 펄스폭은 증가하는 방향으로 동작하여 Boost 컨버터의 역할을 하며, 따라서 Q2는 점점 더 많은 에너지를 흡수하게 된다. 이와 같은 Energy Sinking 과정은 일반적으로 전압제어 모드로 운전되는 DC-AC 인버터에서 잉여전력을 흡수할 수 있는 동작이 가능함을 의미한다. 실제로 별도의 에너지 흡수에 대한 제어기능이 없는 전압제어모드 인버터에서도 이러한 에너지 흡수 기능이 가능하며, SVM 인버터에서는 전압제어기와 전류제어기의 P-Gain과 I-Gain 등의 파라미터에 대한 Tuning의 영향을 받는다.

3.2.2 d-q제어 기반 각상 개별제어 알고리즘

본 연구에서는 3상4선식 독립형 인버터를 안정적으로 제어하기 위하여, d-q제어를 기반으로 인버터 출력의 각상을 개별로 제어하는 알고리즘을 제시한다. 이러한 d-q 제어 기반의 각상 개별제어 방식은 일반적인 SVM 방식에 비해 제어기의 수량이 많아지고 변환과정이 복잡한 단점을 가지고 있으나, 기본적으로 전력흐름과 전압 불평형을 각상별로 개별 제어함으로써 제어 특성을 극대화할 수 있다. 또한, 토폴로지상 3상 4-Leg 인버터는 3개의 단상 인버터와 동일한 특성을 나타내므로 여기서는 단상 인버터의 제어 방식을 적용하였다. 이를 통해 4-Leg 인버터는 각상전류 또는 전압을 개별적으로 제어할 수 있다.

4-Leg 인버터용 PWM 기법은 Carrier-based PWM 방식을 적용하며, 이는 3.1항에서 제시한 각상 전압 (V_{an}, V_{bn}, V_{cn})과 육상 전압(V_{fo})을 이용하여 4쌍의 스위치를 제어하는 방법이다. 여기서 dqo 변환은 단상 인버터에 적용할 수 없으므로 전역통과필터(APF)를 사용하여 단상 전압을 3상 전압으로 변환하였으며, 이를 통해 단상 전압도 $\alpha\beta$ 변환을 할 수 있다[8]. $\alpha\beta$ 를 dqo로 변환하면 단상 인버터를 3상 인버터처럼 제어할 수 있으며, 구체적으로 전압 및 전류 제어에 대한 블록 다이어그램으로 나타내면 그림 7과 같다.

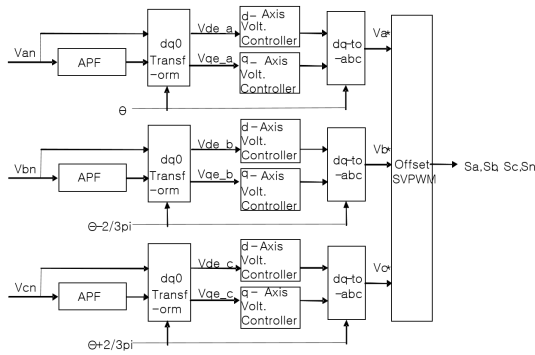


Fig. 7. Block diagram of voltage controller by single phase control method

4. Matlab에 의한 전압제어기 모델링

본 논문에서 제안한 각상 개별제어 알고리즘의 제어 특성을 분석하기 위하여, Matlab S/W를 이용하여 4-Leg 방식의 인버터와 전압제어기 모델링을 수행하였다.

4.1 기존의 3상 일괄제어 전압제어기 모델링

본 연구에서 제안한 각상별 제어방식과 기존의 제어 방식을 비교하기 위하여 기존의 일괄 dqo변환 방식의 전압제어기를 그림 8와 같이 Matlab Simulink를 이용하여 모델링을 수행하였다. 기존의 일괄 dqo변환 방식은 3상 전압을 회전동기좌표계로 변환한 Vde, Vqe, Voe 피드백 전압을 바탕으로 각각 전압제어를 수행하며, 그 출력인 Vde*, Vqe*, Voe*를 dqo-to-abc 좌표계로 역변환하고, 그것을 Offset PWM을 적용하여 4-Leg의 스위칭 패턴으로 제어하는 방법이다.

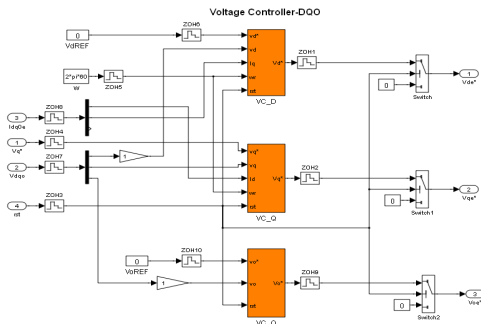


Fig. 8. Voltage controller of conventional three phase control

4.2 각상 개별제어 전압제어기 모델링

본 논문에서 제안한 단상 제어기법 3개를 이용하여 3상 전압을 제어하는 각상 개별 전압제어기를 나타내면 그림 9와 같다. 각 상전압인 Van, Vbn, Vcn에 대해서 전역통과필터를 이용하여 $\alpha\beta$ 성분으로 변환하고, 이를 각 상 전압의 위상을 기준위상으로 하여 dqo 변환을 수행하며, 각 상에 대하여 dq 전압을 산정하여 이를 피드백 신호로 사용한다. 또한, 전압제어기는 각 상에 대하여 각각 d-축, q-축 전압제어기를 구성하였으며, 각 전압제어기에서 전류보상은 하지 않았다. 각상의 전압제어기의 출력인 Vdx*, Vqx*(여기서 x는 a, b, c)를 abc 좌표계로 역변환하여 Va*, Vb*, Vc*를 구하며, 옵셋 PWM 블록에서 4개 Leg의 스위칭 패턴으로 사용한다.

한편, 3상4선식 인버터에서의 전압 불평형의 문제점을 해결하기 위하여, 제안한 전압제어와 PWM제어 알고리즘이 적용된 4-Leg 방식 인버터의 전력회로를 그림 10과 같이 나타낼 수 있다.

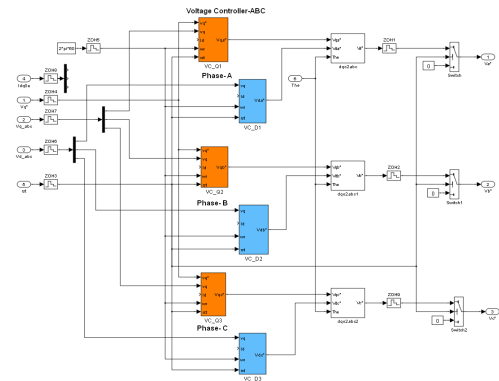


Fig. 9. Voltage controller of proposed single phase control

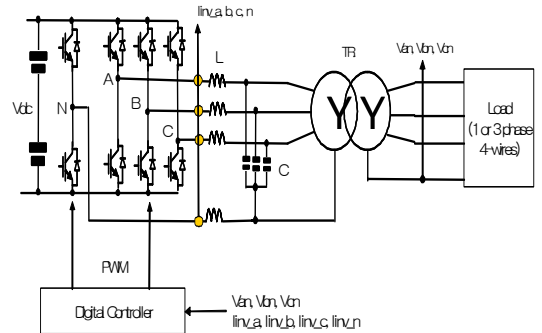


Fig. 10. Three phase four leg inverter circuit for simulation

5. 시뮬레이션 결과 및 분석

5.1 시뮬레이션 조건

그림 10에서 부하는 단상 혹은 3상의 R-L 부하이며, Energy Sinking 모드를 모의하기 위하여 인버터의 출력단에 출력전압과 동일위상의 전류원을 추가하여, 태양광 발전과 같은 신재생전원용 인버터를 연계하였다. 또한, 본 논문에서 제안한 4-Leg 방식 인버터의 각상 개별 제어 알고리즘의 유용성을 확인하기 위하여 3장에서 수행한 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 수행하였다. 여기서, 4-Leg 방식 인버터는 700V의 DC 입력, 10kHz의 스위칭 주파수를 적용하였으며, 이에 대한 상세 사양은 표 1과 같다.

Table 1. system parameter

DC input	700Vdc
Switching frequency and method	10kHz, Space Vector PWM
Inverter serial filter	2mH
Filter capacitor	20uF
Transformer	380/380V, Y-Y connection

여기서 Matlab Simulink는 계산 시간을 최소화하기 위해 전압제어 모드 인버터를 제외하고는 단순화 시켜 모델링을 수행하였다. 예를 들어, PV 인버터는 정전류 소스로 간단히 모델링되었고, 전압제어 모드 인버터는 샘플링 시간 등을 고려하여 상세하게 모델링하였다.

5.2 Matlab Simulink에 의한 특성분석

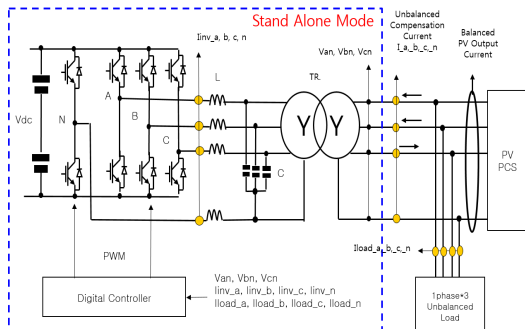


Fig. 11. Modeling for phase by phase unbalanced energy sink during stand-alone mode

그림 11은 마이크로그리드의 독립운전 모드에서 전압 제어 모드로 운전하는 경우, 3상 PV 인버터가 MPPT 운전에 의하여 3상 평형전력이 공급되는 한편 부하는 불평형 상태로 운전되면, 전압제어 모드 인버터는 2상의 전류는 충전, 나머지 한상의 전류는 방전하는 극단적인 불평형 상태가 발생하여 에너지 Sink 현상이 이루어지는 메커니즘을 모의한 것이다.

한편, 그림 12와 그림 13은 이러한 조건에서 각상 개별 제어방식과 기존의 3상 일괄 제어방식의 성능을 나타낸 것으로 위에서부터 출력 상전압, 부하 전류, 계통전압의 dqo 성분, 부하 전류의 dqo 성분을 나타낸다. 또한 좌로부터 50% 평형부하, 불평형부하, 100% 평형부하 및, 불평형 Sinking 상태 등으로 조건을 변경해가며 4가지 과정을 측정된 결과이다.

이 그림에서와 같이, 불평형 부하에 대한 인버터의 출력전압은 정상상태에서는 비슷한 특성을 나타내고 있지만, 과도상태에서는 원형점선으로 표시한바와 같이 계통전압 dqo의 변동 측면에서 각상 개별 제어방식을 적용한 3상 4-Leg 인버터의 특성이 개선되었음을 확인하였다. 이것은 불평형 부하조건에 있어서, 각 상에 대한 직접 보상이 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다. 즉, 기존의 방법은 3상을 일괄 제어함으로써 불평형 부하 조건에서는 제어능력의 제약이 발생하기 때문이다.

또한, 그림 12, 13의 사각형 점선부분은 전압제어 모드 인버터에 2상의 전류는 충전, 한상의 전류는 방전하는 극단적인 부하 불평형 조건에서 Energy Sinking 상태가 이루어지는 메커니즘을 나타낸 것이며, 두 경우 모두 세 번째 계통전압의 dqo 성분 및, 네 번째 부하 전류의 dqo 성분이 공진을 일으키거나 발산하지 않고 안정적으로 수렴하는 등 전압제어기가 안정적으로 수행되고 있음을 확인하였다.

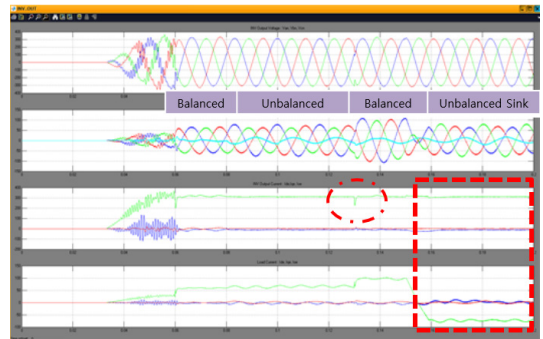


Fig. 12. With proposed single phase control method

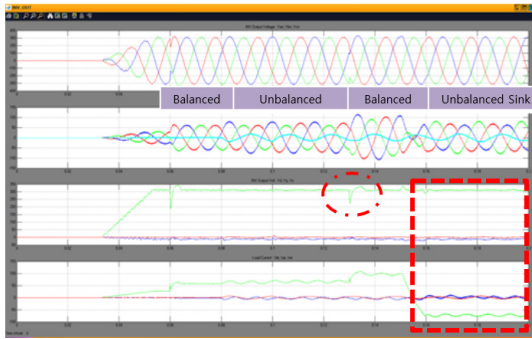


Fig. 13. With conventional three phase control method

5.3 250KW급 시험장치에 의한 특성분석

표 2 및 그림 14와 같이, 250KW급 3상4선식 인버터를 구현하여 시험을 수행하였으며 시뮬레이션 결과와 비교 분석하였다.

Table 2. System parameter

Input voltage	3 phase 4 wire system 380/220Vrms, 60Hz
IGBT	1200V 450A
Input inductor	0.5mH
Input filter Cap.	30uF
Rated output Cap.	250kW
DC-link voltage	550~850V DC
DC-link Cap.	2*4700uF/String*5 parallel
Switching freq.	4kHz

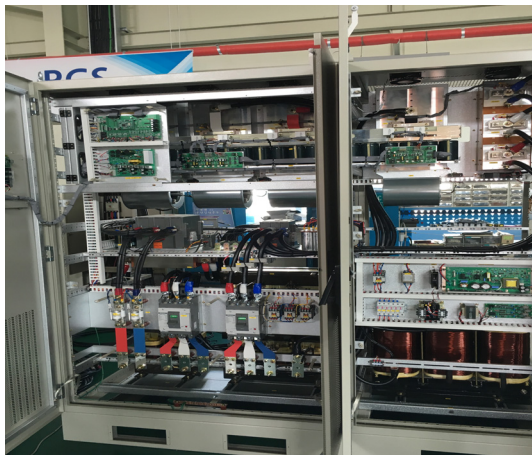


Fig. 14. Prototype of 250KW 4-Leg inverter with proposed single phase control method

그림 15는 PCS가 전압제어 모드로 독립운전을 하는 상황에서 부하를 3상 100KW 인가하고, 3상 PV 인버터가 MPPT 운전으로 3상 100KW를 공급하는 경우, 부하의 R상을 차단시킨 회로구성을 나타낸 것이다. 그림 16, 17은 R상에서 33.3KW의 잉여전력이 발생하여, 전압제어 모드 인버터의 2상의 전류는 0이 되고, 나머지 한상의 전류는 인버터 내부로 유입되는 Energy Sinking 상태를 나타낸 것이다. 그림 16과 같이 전압 불평형율은 0.48%, 전압 변동율은 0.52% 이내로 양호하게 유지되고 있음을 확인하였다. 한편, 그림 17에서 R상은 전압 및 전류가 역위상으로 충전상태를 나타내며, S상과 T상의 전류는 0이 되어 무부하 상태를 나타낸다.

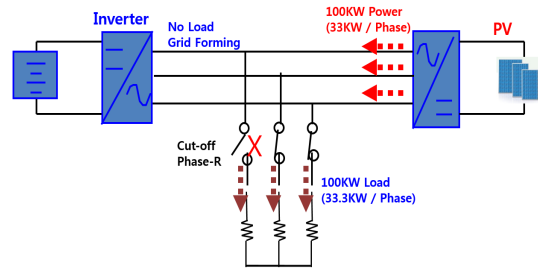


Fig. 15. Circuit diagram for unbalanced energy sink during output constant voltage operation

MAIN	INST.	CIRCUIT1	2016-05-12
U1	382.37 V	I1	0.1531kA
U2	380.08 V	I2	0.0231kA
U3	380.43 V	I3	0.0262kA
Uave	380.96 V	Iave	0.0675kA
P1	-33.50kW	Q	28.08kvar
P2	-0.59kW	S	44.62kVA
P3	-0.58kW	PF	0.7771
P	-34.67kW	f	59.981 Hz
WP+	0.000kWh		0:00:00

Fig. 16. Power flow at inverter output of Fig. 15

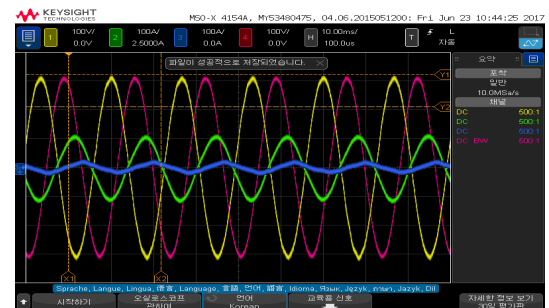


Fig. 17. Voltage and current waveform of Fig. 15.
X: 100V/Div.(Ch 1, 4) 100A/Div.(Ch 2, 3) Y: 100mS/Div.

6. 결론

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드용 4-Leg 방식의 인버터가 불평형 부하에 의하여 발생하는 전압 불평형 문제를 개선하기 위하여, 4-Leg 인버터의 각상 개별 제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 제안한 알고리즘의 유효성을 확인하기 위하여, Matlab/ Simulink를 이용하여 전압제어기의 모델링을 수행하였다. 이 모델링을 기반으로 시뮬레이션을 수행한 결과, 불평형 부하에 대한 인버터의 출력전압 제어 특성이 정상상태에서는 기존의 방식과 비슷하지만, 과도상태에서는 본 논문에서 제안한 각상 개별 제어기법이 우수함을 확인할 수 있었다.

250kW급 시제품에 의한 시험을 통하여 충방전 운전 시 평형부하에 대하여 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다. 특히 방전운전시에 한상의 부하를 0으로 한 극단적인 불평형 부하 조건에서도 양호한 상전압 제어특성을 나타내어, 상용전원 수준의 전력품질을 유지할 수 있음을 확인하였다. 또한, 전압제어 운전 중 가장 가혹한 조건인 2상은 방전, 한상은 충전하는 극단적인 불평형 조건에서도 THD는 0.99%, 전압불평형율은 0.6%, Sinking 되는 상의 전류 THDi는 2.92%를 유지하며 인버터가 정상적으로 동작함을 확인하였다.

References

- [1] T. K. Panigrahi, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, N. Chakraborty, Y. H. Song, "Control & reliability issue of efficient microgrid operation using hybrid distributed energy resources", *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition(PSCE 2006) proceedings*, pp. 797-802, October 29 - November 1, 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1109/PSCE.2006.296417>
- [2] M. A. Pedrasa, T. Spooner, "A Survey of Techniques Used to Control Microgrid Generation and Storage during Island Operation", AUPEC 2006.
- [3] Guerrero J. M., Vasquez J. C., Matas J. et al, "Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids - A general approach toward standardization", *IEEE Trans on Ind. Electronics*, vol. 58, no. 1, pp. 158-172, 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066534>
- [4] G. DING, F. GAO, S. ZHANG, P. C. LOH, F. BLAABJERG, "Control of hybrid AC/DC microgrid under islanding operational conditions", *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 2, pp. 223-232, September 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s40565-014-0065-z>
- [5] Reekers, Jürgen, "AC coupled Hybrid systems and Mini

Grids - key components & Applications", CIGRE: International Conference on Large High Voltage Electric Systems, May 2007.

- [6] Dhaval C. Patel R. R. Sawant, M. C. Chandorkar, "Control of Four-Leg Sinewave Output Inverter using Flux Vector Modulation", IEEE 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IECON.2008.4758027>
- [7] EYYUP DEMIRKUTLU, "Output voltage of control of a four-leg inverter based three-phase UPS by means of stationary frame resonant filter banks", A thesis submitted to the graduate school of natural and applied sciences of middle east technical university, December 2006.
- [8] S. Poopathi, "A Simple Structure and Fast Dynamic Response for Single-Phase Grid-Connected DG Systems", *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, vol. 1, no. 3, May 2014.
- [9] Jae-Min Kwon, Kyung-Jung Lee, Hyun-Sik Ahn, "Controller Scheduling and Performance Analysis for Multi-Motor Control", *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication (IIBC)*, Vol. 15, No. 6, pp.71-77, Dec. 31, 2015.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7236/IIBC.2015.15.6.71>

김 승 호(Seung-Ho Kim)

[종신회원]



- 1986년 2월 : 서울산업대학교 전기 공학과 (공학학사)
- 2013년 8월 : 서울과학기술대학교 대학원 전기공학과(공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 대학원 전기공학과 박사 과정
- 1981년 6월 ~ 1989년 2월 : 이화 전기공업(주) UPS 개발부
- 1989년 3월 ~ 현재 : 세방전기(주) 연구소장

<관심분야>

ESS, PCS, 마이크로그리드, 스마트그리드, 전력전자

최 성 식(Sung-Sik Choi)

[정회원]



- 2010년 5월 : 한국기술교육대학교 정보통신공학부(공학사)
- 2014년 8월 : 동대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 동대학원 전기공학과 박사과정 재학중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 마이크로그리드, ESS

김 승 종(Seong-Jong Kim)

[정회원]



- 2001년 2월 : 동국대학교 공과대학교 전자공학과 (공학사)
- 2005년 2월 : 서울산업대학교 공과대학교 전자공학과 (수료)
- 2007년 7월 ~ 현재 : 세방전기 주식회사 연구소 재직중

<관심분야>

배전계통 운용, 신재생에너지, 스마트그리드, 품질 해석

노 대 석(Dae-Seok Rho)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 전기공학과(공학사)
- 1987년 2월 : 동대학원 전기공학과(공학석사)
- 1997년 3월 : 일본 북해도대학교대학원 전기공학과(공학박사)
- 1987년 3월 ~ 1998년 8월 : 한국전기연구소 연구원/선임연구원
- 1999년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 전기전자통신공학부 교수

<관심분야>

전력/배전 계통, 분산전원연계, 전력품질해석