Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers (2011) 25(7) : 55~62
DOI : 10.5207/JIEIE.2011.25.7.055

논문 25-7-8

마이크로그리드용 10[kW] PCS 개발 및 성능시험

(The Development & Performance Test of 10[kW] Power Conditioning System for Microgrid)

이학주* · 채우규 · 박중성 · 김주용 · 김찬영
(Hak-Ju Lee · Woo-Kyu Chae · Jung-Sung Park · Ju-Yong Kim · Chan-Young Kim)

Abstract

PCS(Power Conditioning System) is the necessary component in Microgrid, composed of multiple distributed generators and energy storage system. In this paper, the functions of PCS are defined and 10[kW] PCS for PV and BESS are developed. To apply PCSs to Microgrid, this paper presents a 3-phase inverter with the decoupling current controller, voltage controller and DPLL control system. PCSs were applied to 120[kW] pilot plant and its performance tests were carried out. Test results of PCS at each operation mode show stable in Microgrid.

Key Words : MicroGrid, Power Conditioning System, 3-phase Inverter, DPLL, Performance Test

1. 서 론

마이크로그리드 시스템은 다양한 분산 에너지원이 공존하는 시스템으로 이러한 분산 에너지원들은 통합적으로 제어, 관리되어야 하며, 각 분산전원 중에서 신재생 에너지원의 PCS(Power Conditioning System; 이하 PCS)는 마이크로그리드 시스템의 통합적인 제어 상태를 추종하는 관리가 필요하다. 마이크로그리드용 신·재생 에너지 계통연계 PCS의 전력변환, 계통연계, 전력품질 등의 기능 외에 계통의 비정상적인 상황에서 마이크로그리드 시스템이 계통과 분리되는 단독운전 상태에서 내부 부하의 안정적인 전력공급을 위하여 PCS는 중앙 제어에 따른 별도의 기능이 요구되고 있다[1].

본 논문에서는 마이크로그리드에 적용 가능한 10[kW] 태양광과 배터리용 PCS를 개발하고 시스템의 성능시험 결과를 제시하고 있다.

2. PCS의 마이크로그리드 요구기능

PCS를 마이크로그리드에 적용하기 위해서는 통신 네트워크에 의해 EMS(Energy Management System; 이하 EMS)로부터 통합제어 및 PCS의 실시간 제어가 가능하여 한다. 즉 신·재생에너지원을 활용한 마이크로그리드의 효율적이고 안정적인 운전을 위해 필요한 기능들은 다음과 같다.

* 주저자 : 한국전력공사 전력연구원 선임연구원
Tel : 042-865-5982, Fax : 042-865-5944
E-mail : juree@kepri.re.kr
접수일자 : 2011년 4월 22일
1차심사 : 2011년 4월 26일
심사완료 : 2011년 6월 2일

2.1 전력변환 기능

태양광, BESS(Battery Energy Storage System; 이하 BESS)용 PCS는 각각의 에너지원인 태양전지 어레이, 축전지 출력을 최대로 이용하고 적절한 DC링크 전압을 유지하도록 승압 기능과 직류-교류변환이 포함된다.

태양광은 단방향 부스터로 구성하고, 축전지는 충·방전으로 인해 양방향 컨버터 형태로 구성하여야 한다. 또한 PCS가 계통연계형 및 독립형 운전 절환이 가능하도록 bi-modal로 구성한다.

마이크로그리드가 독립운전으로 전환되는 경우 인버터의 전압제어는 동기발전기와 같은 전압원이 존재하지 않고 인버터 기반의 분산전원만 존재할 경우 PCS가 전압제어형으로 전환되어야 한다. 또한 필요에 따라서는 전압 고조파 억제를 위하여 출력단에 필터 커패시터를 추가로 투입할 수도 있다.

2.2 전압, 주파수 제어 기능

계통연계 운전에서 계통전압의 위상과 동기되어 전류제어 모드로 운전되며, 계통의 정전 등으로 계통전압이 상실될 경우 독립운전모드로 전환시 기준 전압원으로 동작할 수 있는 기능이 요구된다. 이는 무정전 전원장치와 같이 정전압-정주파수 운전기능으로 출력전압 제어를 하게 된다[2-3].

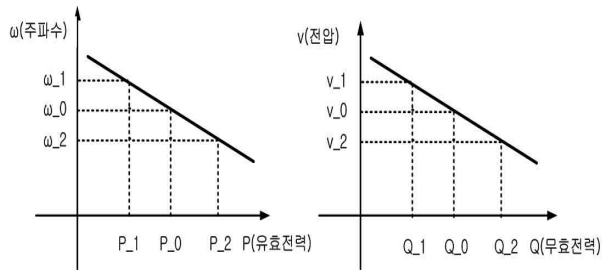

그림 1. 드룹제어
Fig. 1. Droop Control

다수의 분산전원으로 구성된 마이크로그리드의 독립운전에서는 전압과 무효전력의 난조를 방지하기 위하여 전압제어가 필요하다. 이는 분산전원들 상호간의 큰 순환전류가 흐르는 것을 방지할 수 있다. 특히 독립운전 모드에서 전압과 주파수의 유지를 위하여 그림 1과 같이 전압-무효전력, 주파수-유효전력 드룹(Droop) 기능을 가져야 한다[4-5].

2.3 보호 및 전력품질 유지 기능

PCS는 계통연계 규격에 적합한 보호기능 및 전력품질 유지기능을 내장해야 한다. 보호기능 중에서는 과부족 전압, 주파수 및 단독운전 검출기능이 포함되어야 하며, 전력품질 측면에서는 출력전류의 고조파 왜형율이 중요하다.

2.4 마이크로그리드 연계 기능

PCS가 마이크로그리드용으로 적용되기 위해서는 EMS와의 통신연계 기능을 보유해야 한다. 이는 마이크로그리드의 분산전원, 부하의 단순한 감시뿐만 아니라 운전모드 변경, 출력 제한, 유·무효전력의 급전 등을 포함한다.

3. PCS 구성 및 개발

3.1 시스템 구성과 규격

신재생에너지용 PCS는 특성과 사양에 따라 전류용량이 결정되므로 입력용량에 따라 컨버터 용량 설계, 직류 링크 전압에 의해 인버터의 전류용량을 결정한다.

태양광 PCS는 일사량에 따라 가능한 최대전력을 출력하도록 입력 컨버터가 최대 출력 추종제어를 하게 된다. 그림 2는 태양광 PCS의 블록도이다. 그림 2에서 컨버터는 DC 전원의 부스트 스위칭에 의해 전력을 전달하여, DC링크 전압이 상승한다. 또한 BESS용 PCS는 저장된 전력을 제한시간 내에 지속적인 충, 방전을 통해 마이크로그리드의 다양한 기능을 담당한다. 즉 마이크로그리드의 운전모

드에 따라 출력 분배, 드룹 특성에 의한 전압-주파수 제어를 한다.

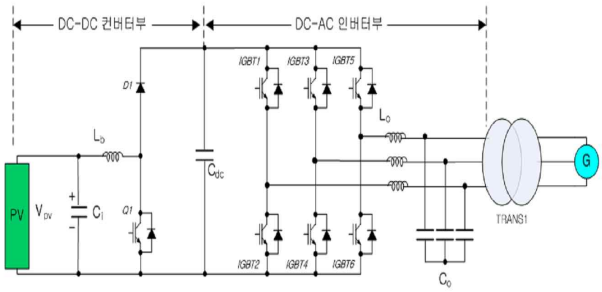

그림 2. 태양광 PCS 회로도
Fig. 2. Circuit Diagram of PV PCS

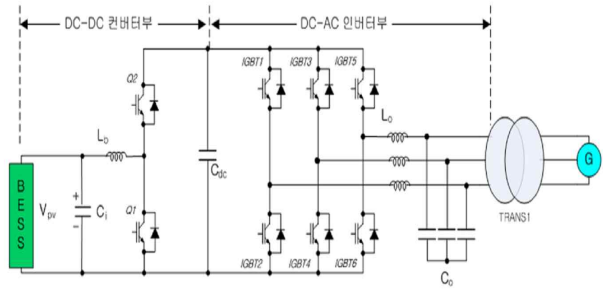

그림 3. BESS용 PCS 회로도
Fig. 3. Circuit Diagram of BESS PCS

그림 3의 BESS PCS 블록도에서 배터리가 방전되는 경우 Q1에 의해 부스트 컨버터로 동작하고, 충전 시에는 Q2의 동작으로 벅 컨버터가 된다.

본 논문에서 개발한 마이크로그리드용 PCS는 직류 리액터를 포함하는 컨버터와 출력 교류 필터를 포함한 인버터, 출력측 3상 Δ-Y 절연변압기 및 제어용 DSP 보드, 아날로그 인터페이스, 상위 통신과 HMI(Human Machine Interface), 제어전원 공급용 직류전원장치로 구성하였다. 또한 PCS의 실시간 제어 성능과 펌웨어 개발의 편의성을 위하여 부동소수점 연산속도가 빠르고, 3상 PWM 구현이 용이한 TI사의 TMS320F28335를 적용하였다.

표 1은 10[kW] 태양광 및 BESS PCS의 상세한 사양이며 그림 4는 개발된 태양광 PCS의 하드웨어이다.

표 1. PCS 개발 사양
Table 1. The Specification of 10[kW] PCS

항 목		태양광(PV) PCS/ BESS PCS
특 징		1 DC-DC 컨버터 + 인버터 1 (충전: BESS) Buck 컨버터 1 (방전) Boost 컨버터
입력방식	입력 전압 범위	DC 입력(PV) : 최대 500 VDC DC 입력(BESS) : 최대 300 VDC
	동작 전압 범위	PV : 220~450 VDC BESS : 150~300 VDC
출력사양	정격출력용량 ([kW])	10.0
	정격출력전압	AC 380V (±10[%] : ±38[V])
	정격출력주파수	60Hz ± 0.2Hz
	상 수	3상
	효율	92[%] 이상
	출력 역률	0.95 이상
	출력 왜율 (AC전류 THD)	종합 왜율 5[%] 미만 개별 왜율 3[%] 미만
	과부하 능력	110[%]에서 10분 운전허용
마이크로 그리드	EMS 연계	PCS 제어 및 정보 교환

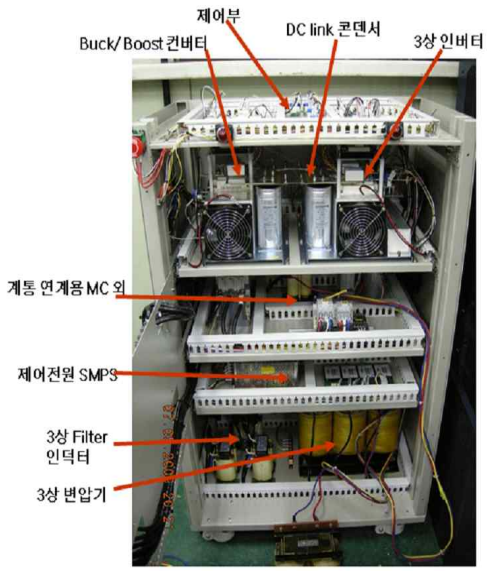

그림 4. 10[kW] PCS 하드웨어
Fig. 4. Prototype hardware of 10[kW] PCS

3.2 계통연계형 인버터 제어기 구성

그림 5는 마이크로그리드용 PCS의 인버터 제어구성도이다. 제어시스템은 계통 전압, 위상 동기를 위한 DPLL(Digital Phase Locked Loop; 이하 DPLL), 직류링크전압 제어기, 회전좌표계의 d, q축 직류 전류제어기 및 공간벡터 PWM 등으로 구성된다[6].

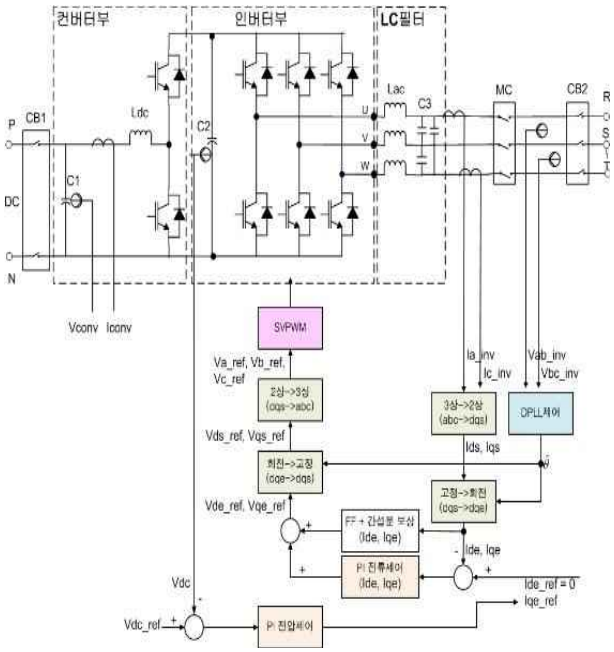

그림 5. 3상 인버터의 제어 블럭도
Fig. 5. Block Diagram of 3-phase Inverter Control

3.2.1 전류제어기

동기 회전좌표계에서의 계통연계 인버터의 전압 방정식을 정리하면 식 (1), (2)와 같다[7].

$$V_{de} = L\frac{di_{de}}{dt} - \omega L i_{qe} + E_{de} \tag{1}$$

$$V_{qe} = L\frac{di_{qe}}{dt} + \omega L i_{de} + E_{qe} \tag{2}$$

여기서 ω는 계통의 각주파수, L은 출력 필터의 인덕턴스, E_{de}, E_{qe}는 회전좌표계의 계통전압, V_{de}, V_{qe}는 회전좌표계의 인버터 출력전압, i_{de}, i_{qe}는 회전좌표계에서의 인버터 출력전류이다. 식 (1)과 식 (2)에서 계통전압의 유효분만 고려하면 $E_{de}=0$, $E_{qe}=E$가 된다. 이를 정리하면,

$$V_{de} = L\frac{di_{de}}{dt} - \omega L i_{qe} + 0 \tag{3}$$

$$V_{qe} = L\frac{di_{qe}}{dt} + \omega L i_{de} + E \tag{4}$$

식 (3)와 식 (4)에서 회전좌표계의 항들이 서로 간섭되는 것을 알 수 있다. 계통에 전달되는 전력의 역률은 최대한 1에 가깝게 제어되어야 하므로 d축 전류제어기의 지령 $i_{de}^{*}=0$로 제어하여야 한다. 또한 i_{qe}^{*}는 직류링크전압(V_{dc}) PI제어기의 출력이 된다. 인버터 출력 필터의 인덕터(L)성분에 대해 $d-q$축 각각의 PI 전류제어기를 동작시키고, $-\omega L i_{qe}$와 $\omega L i_{de}$의 간섭항에 보상항을 추가하며, 계통전압(E)는 피드-포워드항으로 더해 전체 전류제어를 수행하게 된다.

$$V_{de}^{*} = PI_CUR(i_{de}^{*}=0, i_{de}) - \omega L i_{qe} \tag{5}$$

$$V_{qe}^{*} = PI_CUR(i_{qe}^{*}(V_{dc}Ctrl), i_{qe}) + \omega L i_{de} + E \tag{6}$$

식 (5)과 식 (6)에 의한 비간섭 전류제어기는 그림 6과 같다.

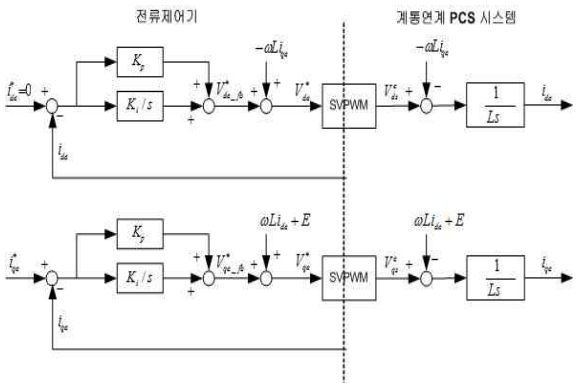

그림 6. 비간섭 전류제어기
Fig. 6. Decoupling Current Controller

3.2.2 위상 동기 시스템

본 논문에서 구성하는 계통연계 인버터는 계통 전압과 위상 동기를 위하여 그림 7과 같은 DPLL 제어를 이용하였다. 이는 V_{de}, V_{qe}를 이용하여 계통의 전압벡터가 회전좌표계 q축에 일치하여 $V_{de_{ref}}=0$가 되도록 제어함으로써 주파수 변동분을 계통 주파수에 더한 후 추종위상각을 구한다.

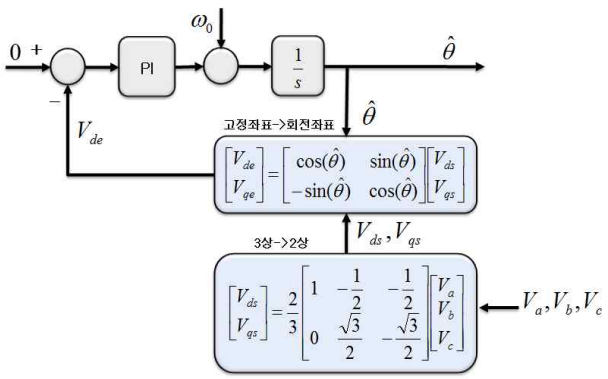

그림 7. 위상동기검출 블럭도
Fig. 7. Block Diagram of DPLL

4. 마이크로그리드 적용 성능평가

4.1 마이크로그리드 플랜트 구성

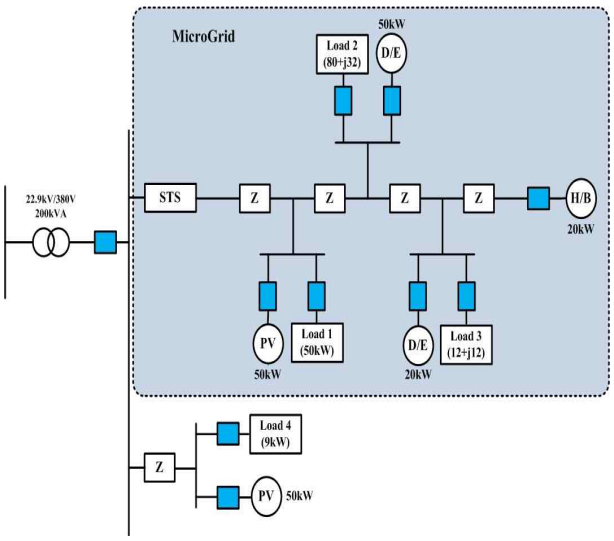

그림 8. 120[kW] 마이크로그리드 플랜트 구성도
Fig. 8. Configuration of 120[kW] Microgrid Plant

본 논문에서 개발한 10[kW] PV, BESS PCS의 마이크로그리드 적용 성능평가를 위하여 국내에 설치된 120[kW]급 플랜트를 대상으로 PCS 기능을 중심으로 하여 마이크로그리그 운전모드별 성능평가를 하였다. 플랜트의 전원은 소형 열병합발전 모의가 가능한 각 50[kW], 20[kW]의 디젤발전, 12[kW] 태양광발전, 태양광과 풍력용 하이브리드 시뮬레이터 및 독립운전을 고려한 20[kW]의 BESS로 그림 8과 같이 구성하였다[8].

4.2 PV용 PCS 성능시험

4.2.1 계통연계 성능시험

태양광 PCS는 MPPT(Maximum Power Point Tracking)제어, 3상 출력 측에 절연변압기를 적용하였으며, 그림 9는 계통연계 3상 전압, 전류파형으로 출력전압 및 전류는 각각 215.5[V], 15.03[A]이다. 정격출력 전압, 전류 THD(Total Harmonic Distribution)는 각각 2.05[%], 2.6[%]이며, 출력전력이 9.7[kW]로 효율은 90.4[%]이다.

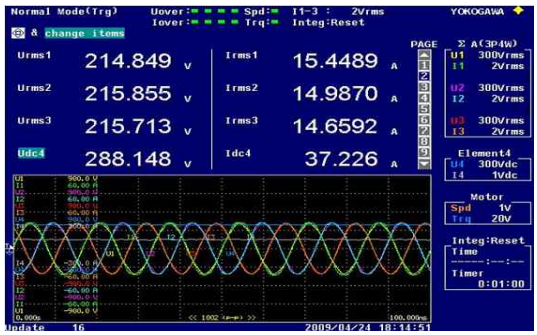

그림 9. 10[kW] PV PCS 출력
Fig. 9. Output of 10[kW] PV PCS

4.2.2 EMS에 의한 PCS 제어

태양광 PCS는 EMS 지령에 의해 게이트가 On되어 영전류 상태가 된 이후 EMS의 출력 지령치에 의해 동작하게 된다. 그림 10은 태양광 PCS의 계통연계 특성시험 파형으로 20[sec]동안 출력이 유지 확인을 통해 마이크로그리드 EMS에 의해 태양광 PCS 제어 가능을 확인하였다.

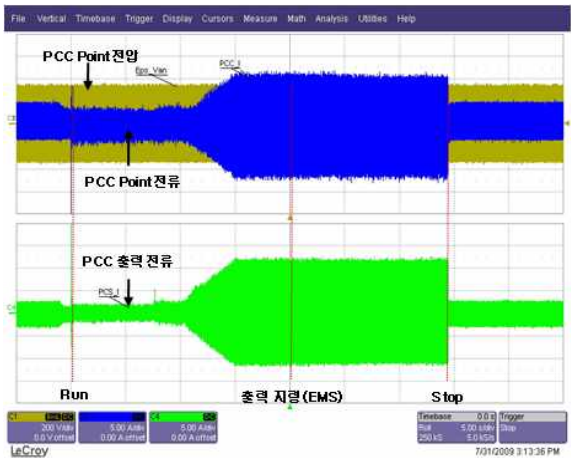

그림 10. 태양광 PCS 기동 및 정지 시험
Fig. 10. Test of PV PCS Starting & Stop

4.3 BESS용 PCS 성능시험

4.3.1 출력 Dispatch

마이크로그리드 EMS에 의해 BESS PCS의 무효전력이 0→5[kVar]→-5[kVar]→0[kVar]가 되도록 출력 제어 기능을 시험하였다. 그 결과 파형은 그림 11로 BESS가 계통연계 모드 운전에서 EMS로부터 전송된 유, 무효전력의 명령치에 따라 BESS의 출력이 제어됨을 통해 개발된 BESS PCS의 드룹제어 성능을 확인하였다.

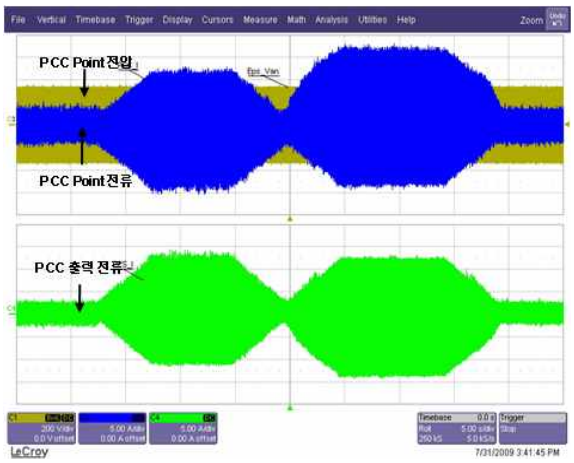

그림 11. BESS PCS의 무효전력 제어
Fig. 11. Reactive Power Control of BESS PCS

4.3.2 독립운전에서의 전압-주파수 제어

마이크로그리드는 독립운전 모드에서 전압, 주파수 제어에 의한 전력수급 유지가 가장 중요하다. 따라서 본 논문에서는 BESS용 PCS의 f-P, V-Q 드룹제어에 의한 유·무효전력의 제어 시험을 통해 분산전원의 출력변동과 부하변동의 조건에서 마이크로그리드의 안정적 동작을 위한 PCS의 제어기능을 시험하였다. 그림 8의 마이크로그리드에서 20[kW] 디젤발전기 주파수, 전압 변동에 비례하여 BESS PCS의 f-P, V-Q 드룹 제어시험을 하였다. 그림 12와 같이 5[sec]이후 마이크로그리드를 계통과 분리 운전 시에 전압변동이 220±10[V], 주파수는 60±0.2[Hz] 이내로 전력수급 밸런스를 유지하였다. 이를 통해 PCS에 의한 BESS 출력제어를 통해 마이크로그리드가 독립운전모드에서도 안정적인 운전이 가능하다.

4.3.3 계통분리 운전

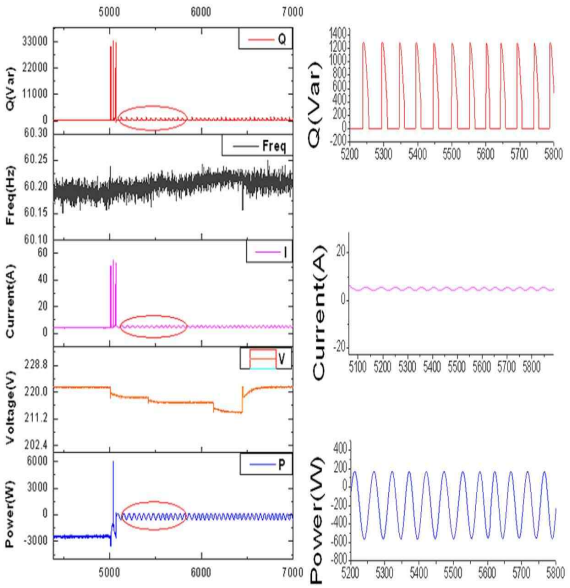

그림 12. Droop(f-P, V-Q) 제어 시험
Fig. 12. Test of Droop Control

마이크로그리드는 EMS의 계통 분리 명령이 전달되면 STS(Static Transfer Switch;이하 STS)가 오프되어, 계통전압과 마이크로그리드 전압의 위상차가 발생

하고 STS 출력단에 더 이상 전류가 흐르지 않는다. 이에 대한 시험에서 계통연계 운전에서 독립운전 모드로 전환할 경우 계통으로 전달되는 3[kW] 전력으로 인해 주파수가 상승하게 된다. 이 경우 BESS PCS의 주파수-유효전력 드룹제어로 인해 충전전류가 증가하고 있음을 그림 13에 보이고 있다.

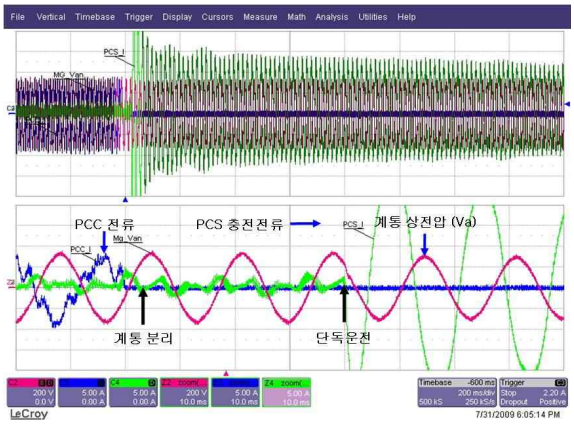

그림 13. 마이크로그리드 단독운전 시 PCS 제어 시험
Fig. 13. PCS Control Test in Islanding Mode Microgrid

4.3.4 계통 연계

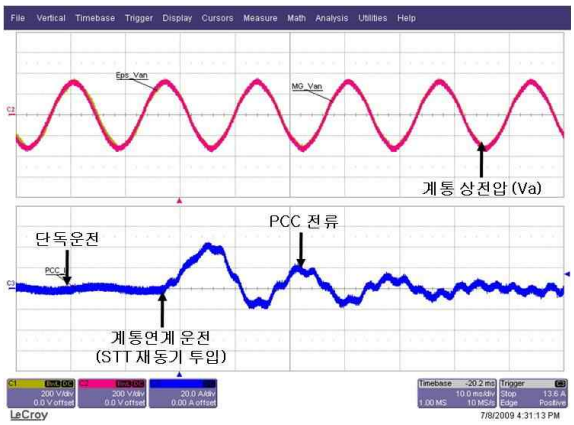

그림 14. 재동기 이후 연계점의 전압, 전류
Fig. 14. PCC Voltage & Current after STS Re-Syn

이 시험은 독립운전 모드에서 STS에 의해 마이크로그리드의 계통연계 운전 상태로의 전환 시에 순시 전압 측정을 통해 요소기기의 안정적인 운전 상태를 판단하는 시험이다. 이 시험결과인 그림 14는 독립운전 상태에서 STS 스위치가 재투입되었을 때 PCC (Point of Common Coupling)의 전류파형이다. 동기투입 동작시점에서 위상오차는 0.02[cycle]이며, 주파수는 0.3[Hz] 이내의 변동, 전압변동은 10[V]이내에서 안정적인 계통연계모드 운전을 보이고 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로그리드 시스템에 적용 가능한 10[kW]급의 태양광 및 BESS PCS를 개발하고 이를 신재생에너지와 분산전원으로 구성된 120[kW]급 마이크로그리드 플랜트의 적용을 통해 PCS 성능시험, 연계 및 독립운전 등의 운전모드 전환과 계통 재동기 투입에서의 동작시험을 통해 BESS PCS가 드룹제어에 의해 마이크로그리드가 전력수급 밸런스를 유지하고, 마이크로그리드의 자율운전 제어가 가능하게 됨을 보였다. 향후 통신기능과 마이크로그리드 전용의 다양한 제어기능을 개발은 물론 마이크로그리드 시스템 운용과 요소기기의 표준화가 정립되면 전력계통의 마이크로그리드 확대 수용은 물론 마이크로그리드의 안정적인 운전을 통해 기존 전력계통과의 조화로운 공존이 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2010T100200161).
이 논문은 한국조명 · 전기설비학회 2010년도 추계학술대회(2010.9.29, COEX)에서 발표하고 우수추천논문으로 선정된 논문임.

References

〔1〕 이학주, "마이크로그리드 운영시스템설계 및 개발", 1단계 연구보고서, 2009년 8월.
〔2〕 정일엽, 원동준, 문승일, "다중 분산전원으로 구성된 마이크로그리드의 유무효전력 제어원리연구", 대한전기학회 논문지, 57권, 4호, pp. 582-588, 2008년 4월.
〔3〕 R. Lasseter, P. Piagi, "Control and design of Microgrid Components", Power System Engineering Research Center, final project report, Jan. 2006.

[4] E.Barklund; et al, “Energy Management in Autonomous Microgrid Using Stability-Constrained Droop Control of Inverters”, IEEE Trans. on Power Electronis, Vol. 23, NO. 5, 2008.
[5] N. Pogaku, M. Prodanovic, and T. Green, “Modeling, Analysis and Testing of Autonomous Operation of an Inverter-based Microgrid”, IEEE Trans. on Power Electronis, Vol. 22, NO. 2, Mar. 2007, pp.613-625.
[6] 김영철, 정명웅, 서기영, 이현우, 우정인, “3상 계통연계 태양광발전시스템의 운전특성”, 대한전기학회 논문지, 49B권, 8호, pp. 536-544, 2000년 8월.
[7] 서현우, 권정민, 권봉환, “무변압기형 3상 계통연계 PV PCS”, 전력전자학회 논문지, 12권, 5호, pp. 355-362, 2007년 10월.
[8] 전기연구원, “마이크로그리드 성능평가 기술 및 실증 Plant 구축”, 1단계 연구보고서, 2009년 8월.

◇ 저자소개 ◇

이학주(李鶴周)
1966년 12월 5일생. 1989년 충남대학교 전기공학과 졸업. 1991년 충남대학교 전기공학과 졸업(석사). 2003년 충남대학교 전기공학과 졸업(박사). 1995년～현재 한전 전력연구원 선임연구원.

채우규(蔡又圭)
1977년 4월 22일생. 2004년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 2007년 충북대학교 전기공학과 졸업(석사). 2004년～현재 한전 전력연구원 선임연구원.

박중성(朴重城)
1978년 4월 17일생. 2004년 홍익대학교 전자전기공학부 졸업. 2006년 홍익대학교 전기공학과 졸업(석사). 2006～2010년 효성 중공업연구소 선임연구원 2010년～현재 한전 전력연구원 연구원.

김주용(金周勇)
1969년 9월 27일생. 1992년 경북대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전력연구원 송배전연구소 선임연구원.

김찬영(金燦泳)
1962년 9월 6일생. 1989년 인하대학교 전기공학과 졸업. 1994년 Colorado School of Mines 재료공학과 졸업(석사). 1997년 Colorado School of Mines 재료공학과 졸업(박사). 현재 우석대학교 소방안전학과 교수.