

에너지 저장장치의 계통 연계형 양방향 PCS 기술

The grid-connected bidirectional PCS technology of the ESS

고 봉 운*

Bong-Woon Ko*

Abstract

Grid-connected bidirectional PCS(Power Conditioning System) technology is a technology for implementing distributed renewable energy smart grid. And it is always charged by using power collected from solar modules and commercial grid power among vast smart grid systems, and stored when needed. It is a hybrid energy storage device that allows power to be released into the low voltage system. To this end, a PV input power converter with MPPT function, a bidirectional power converter for battery charging and discharging, and a DC Link input are output to a 3 phase 380V AC system, and if necessary, the bidirectional DC/DC converter. We designed and developed a PCS with three power converter structures composed of inverters that perform battery charging. Currently, this system is applied to the site of Jeju, which is vulnerable to power outages and fire accidents.

요 약

계통 연계형 양방향 PCS 기술은 분산형 신재생 에너지 스마트 그리드를 구현하기 위한 기술이며, 방대한 스마트 그리드 시스템 중 태양광 모듈로부터 수집된 전력 및 상용 계통전원을 이용하여 상시 전력을 충전하였다가 필요시 저장된 전력을 저압 계통 측으로 방출할 수 있도록 하는 하이브리드형 에너지 저장 장치이다. 이를 위해 MPPT 기능이 포함된 PV입력 전력변환기와 배터리 충·방전을 위한 양방향 전력변환기 및 DC Link 전압을 3상 380V AC 계통으로 출력하고 필요할 경우 계통전력을 AC/DC변환하여 양방향 DC/DC컨버터를 통해 배터리로 충전기능을 수행하는 인버터로 구성된 3개의 전력변환기 구조를 갖는 PCS를 설계 및 개발하였다. 현재 이 시스템을 정전 및 화재사고에 취약한 제주의 사이트에 적용하여 실증 및 운영하고 있다.

Key words : grid-connected, PCS, inverter, converter, MPPT

1. 서론

1. 개발배경

제주는 타 지역 대비 농·수·축 분야 의존도가 높은 편이다. 산업 구조상 농·수·축 시설에 안정

적인 전원 공급이 필수적이며, 생산물의 판매와 유통을 위한 냉동·냉장 등 저온 저장설비의 역할이 중요하다. 도서지역인 제주는 강풍, 태풍 등의 자연 재해에 취약하여 부분 및 광역 정전이 빈번히 발생하며, 정전 시 냉동·냉장 설비의 미 작동에 의한

* Dept. of Electrical Engineering, Jeju International University.

★ Corresponding author

E-mail : bwko@jeju.ac.kr Tel : +82-64-754-0295

※ Acknowledgment

This study was supported by the 2018-2019, "Community Business Revitalization Project" of the Ministry of Commerce, Industry and Energy (Korea Industrial Technology Development Agency).

Manuscript received Dec. 9, 2019; revised Dec. 24, 2019; accepted Dec. 26, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

경제적 피해가 막대하다. 이를 위해 제주의 카본프리 아일랜드 2030정책과 맞추어 태양광 발전을 통한 충전과 계통을 통한 충전이 상시 가능하고 정전 및 화재 등의 사고에 대처할 수 있도록 비교적 안전한 배터리팩과 양방향 충 방전을 위한 PCS (Power Conditioning System)를 채용한 하이브리드 에너지 저장 장치를 보급하고자 한다[1].

2. 시스템 구성

전체 에너지 저장장치의 구성은 그림 1과 같으며 각 부위별 구성은 다음과 같다.

- 가. 전기를 저장하는 배터리와 배터리를 안전하게 관리해 주는 배터리 관리 시스템(BMS)으로 구성된 배터리 팩Pack)
- 나. 태양광 출력을 최대출력으로 유지하며 버스 전원을 생성해주는 DC/DC 컨버터
- 다. 버스 전원으로 부터 배터리를 충전하거나, 배터리 전력을 버스로 방전 동작을 수행하는 DC/DC 컨버터
- 라. 저장된 직류 전력을 교류로 변환하여 그리드로 송전하거나, 그 반대로 그리드로부터 수전하여 배터리에 충전하는 인버터

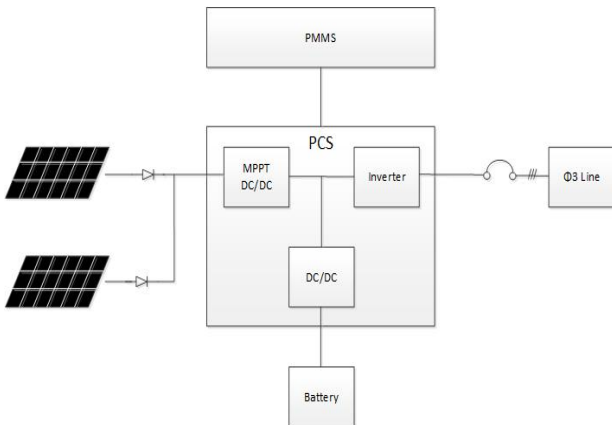


Fig. 1. Energy Storage System.
그림 1. ESS시스템 구성도

II. 본론

1. 개발 목표

전체 시스템을 통합하고 관장 할 PMS(Power Management System)와 배터리 장치를 구성할 적절한 배터리 셀을 선정하여 배터리 모듈과 BMS (Battery Management System)를 설계하고 아울러

배터리 모듈을 12개 적층하여 배터리 시스템을 제작하고 그림 2와 같이 이를 관리하는 마스터 BMS (BCU)를 개발 및 제작하였다. 특히 태양광 발전을 통한 충전과 계통을 통한 충전이 가능한 양방향 인버터를 포함한 PCS의 설계 및 개발을 목표로 하였다[2,3].

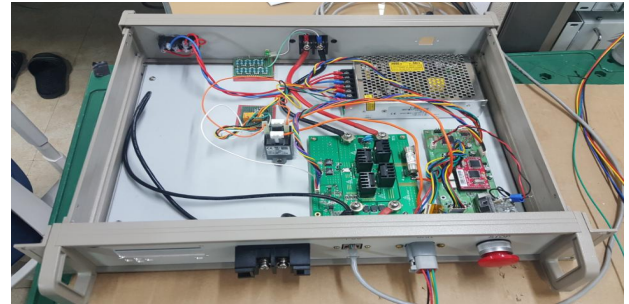


Fig. 2. BMS(Battery Management System).
그림 2. 배터리 관리 시스템(BMS)

2. 개발범위

PCS는 크게 분류하면 그림 3과 같이 3개의 전력변환기로 구성되어 있으며 첫 번째는 MPPT 기능이 포함된 PV 입력 전력변환기(DC/DC Converter 1) 두 번째는 배터리 충, 방전 양방향 전력변환기(DC/DC Converter 2) 세 번째는 DC Link 전압을 3상 380VAC 계통으로 출력하고, 필요할 경우 계통전력을 AC/DC변환하여 DC/DC converter2를 통해 배터리로 충전기능을 수행하는 인버터(양방향 인버터) 등이다. 본 논문에서는 이를 모두 설계하고 개발하였으며 PCS의 개발 내용을 중심으로 다루고자 한다.

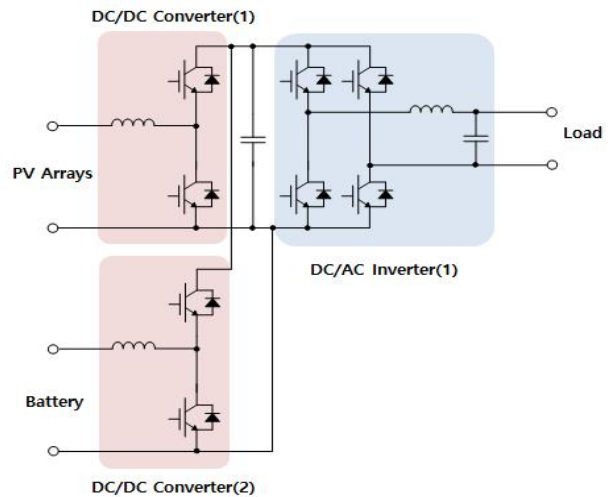


Fig. 3. Power Conditioning System.
그림 3. ESS의 PCS구성도

3. 개발 내용(PCS)

PCS(Power Conditioning System)의 전체 구성도는 다음과 같다.

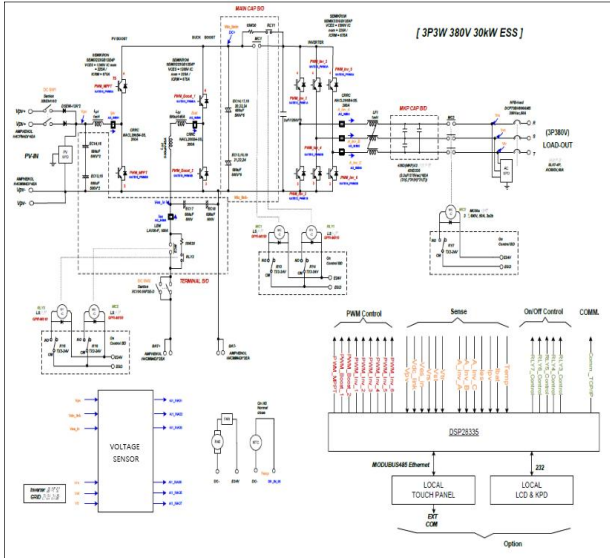


Fig. 4. Total System of PCS.

그림 4. PCS 전체 구성도

가. MPPT기능이 포함된 PV 입력 전력변환기

(DC/DC Converter 1)

(1) 요구사항

- (가) MPPT Vin Range : 350Vdc ~ 700Vdc,
- (나) Capacity : 10KWh Max
- (다) Max Output : 10KWh
(Nom : 603Vdc / 16.7Ah)
- (라) Efficiency : 95% 이상

(2) 설계 내용

태양광을 이용하여 전력을 발생하는 태양광 인버터에서 중요한 알고리즘 중에 하나가 최대전력 추종(MPPT : Maximum Power Point Tracking) 알고리즘이다. 이러한 알고리즘 중에서 가장 보편적으로 사용하는 것은 P&O(Perturbation & Observation) 방식이다[4].

계통연계 인버터는 항상 태양전지의 최대 전력 발생지점(MPPT)을 추적하는 알고리즘을 통해 계통으로 최대 발전전력을 송전한다.

최대전력 추종을 하기 위해서는 태양전지의 특성을 알아야 한다. 태양전지는 아래와 같은 전기적 특성을 가지고 있다. 가는 선이 전력의 특성을 나타내는 선이고 굵은 선이 전압과 전류의 특성 곡선

이다[5].

- 처음의 모드는 2번의 모드로 시작이 된다. 즉 태양전지 전압을 낮추는 모드부터 시작된다. 따라서 추종하고자 하는 전압을 낮추게 된다.
- 이때 현재 전력과 과거전력을 비교하여 현재전력이 크면 계속 증가하는 모드(2번모드)로 전압을 감소시킨다.
- 만약 현재전력보다 과거전력이 더 크면 최대전력 발전 지점(MPPT)을 넘어선 것이므로(4번 방향) 전압을 증가시키는 방향으로 변경한다.
- 전압을 다시 증가시키는 방향으로 진행을 했는데 과거전력이 현재전력보다 크면 최대전력 발생지점(MPPT)을 넘어선 것으로 인식한다(3번 방향). 따라서 다시 방향을 바꿔서 전압을 감소시키는 방향(2번 방향)으로 변경 운영한다.

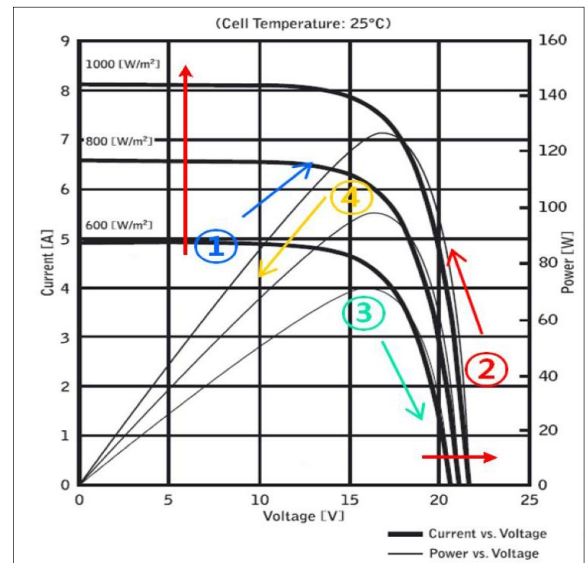


Fig 5. Electrical characteristic curve of PV.

그림 5. PV 전기적 특성 곡선

그림 5를 통해서 최대전력을 나타내는 지점이 최대전압의 80% 지점이라는 것을 알 수 있다. 따라서 태양광 인버터는 이 최대 전력을 발생시킬 수 있는 지점을 찾아가야 한다.

여기서 중요한 것은 어떻게 하면 전압을 줄이느냐는 것인데 그것은 PWM 스위칭의 듀티비(Duty Ratio)를 증가시켜서 전류를 증가 시키고 전압을 감소시킨다. 스위칭의 듀티비란 스위치를 켜다(OFF)가 켜다(ON)하는 비율을 말하는데 듀티비의 증가란 켜는 시간을 증가시킨다는 것이다. 그렇게 되면 전압은 계속 감소하고 전류는 증가하게 된다[6].

(3) 구성회로(블럭도) 및 해석

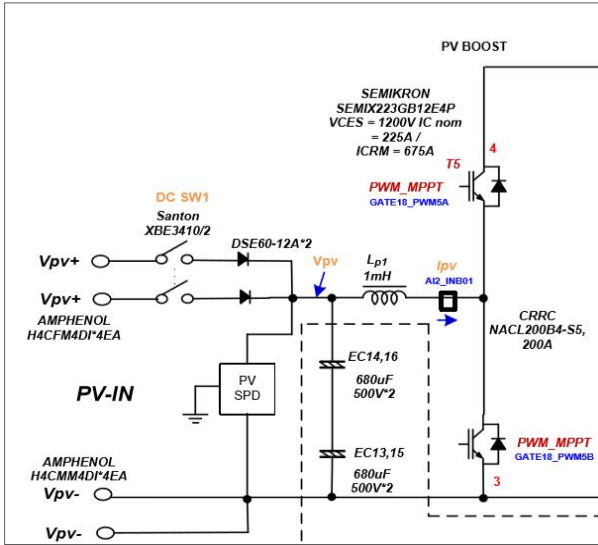


Fig. 6. Circuit diagram(DC/DC Converter 1).
그림 6. 구성회로(DC/DC Converter 1)

(가) Boost Converter

주어진 DC 입력전압 이상으로 승압하는 구조를 갖는 승압초퍼로서 단일전압을 출력한다. 주로 단일 부하용의 DC Power Supply나 DC Motor의 회생 제동 등에 사용된다.

Boost Converter가 CCM(Continuous Conduction Mode)에서 운전될 경우 출력전압 V_o 및 입력전압 V_d 의 관계식은 다음으로 표현 된다.

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_d \quad (1)$$

단, D : Duty Ratio

또한, 부하 전류가 I_{oBmax} 이하로 될 경우 DCM (Discontinuous Conduction Mode)으로 운전되므로 이때의 출력전압 V_o 는 입력전압 V_d 에 대해 다음과 같이 비선형 특성을 갖게 된다.

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oBmax}} \right]^{1/2} \quad (2)$$

$$\text{단, } I_{oBmax} = 0.074 \frac{T_s V_o}{L} \quad (3)$$

출력전압을 일정하게 제어할 경우 Duty비와 출력전류에 따른 입출력전압의 관계는 그림 7과 같이 되며 주어진 동작영역에서 CCM으로 운전되도록 설계한다.

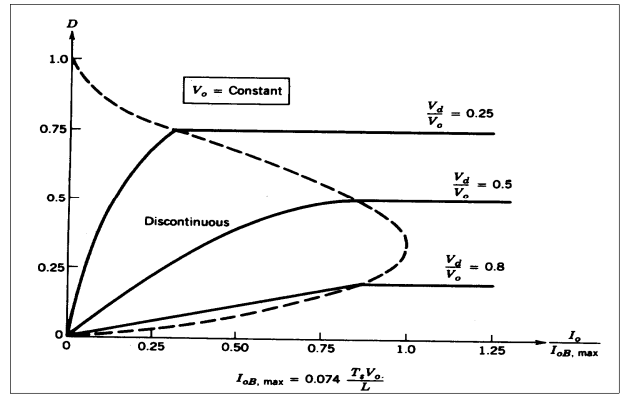


Fig. 7. Boost Converter Characteristics keeping V_o Constant.
그림 7. Boost 컨버터의 V_o 특성

(4) 기술개발 결과물

(가) Open Loop Test 1

Table 1. Result of DC/DC converter 1 test.

표 1. DC/DC converter 1의 시험 결과

No	Vin	Vout	Max Output	Efficiency
1	560Vdc	720Vdc	10KW	97.98%
2	585Vdc	720Vdc	10KW	98.10%
3	604Vdc	720Vdc	10KW	98.24%
4	655Vdc	720Vdc	10KW	98.50%
5	685Vdc	720Vdc	10KW	98.51%

(나) 최종 시험결과

- PV DC 입력전압(585.6V)인가 시 시료정격 출력 전압(DC752.5V), 출력 전력(10.084KW) 부하 연결 후 1시간 동안 Aging 실시하였다. 이때 DC/DC Converter의 DC 입력전력은 (10.223KW) 및 DC 출력전력은 (10.084KW) 측정되었다.



Fig. 8. Display of test result.
그림 8. 최종 시험 결과 화면

- DC/DC Converter의 효율 산출
 효율 = DC 입력전력 / DC 출력전력 * 100
- 측정 효율 : 98.637%

나. Bi-Directional DC/DC Converter 2

- (1) 요구사항
 - (가) Capacity : 30.72KWh(614.4V/50Ah)
 - (나) Current : 50(Ah)
 - (다) Voltage : 614.4V(500V ~ 700V)
 - (라) Battery : 2.5V*192EA=480V,
 3.2V*192EA=614V,
 3.65V*192EA=700.8V
 - (마) Soc Cut : 20%(방전), 95%(충전)

(2) 설계 내용(토폴로지 분석)

(가) Buck Converter

Buck Converter는 강압초퍼로서 출력전압은 DC 공급전압 이하로 강압되어 단일전압을 출력한다. 이러한 Buck Converter는 주로 단일 부하용의 DC Power Supply나 DC Motor Speed Control 시스템에 주로 사용된다. Buck Converter는 부하전류의 상태에 따라서 인덕터 전류 연속모드(CCM) 및 전류 불연속모드(DCM)에서 운전되게 되며 이에 대한 출력전압은 다음과 같이 나타난다.

$$V_o = DV_d \tag{4}$$

단, D : Duty Ratio

이때 부하 전류가 I_{LBmax} 보다 낮아질 경우 Buck Converter는 DCM(Discontinuous Conduction Mode)으로 운전되며 출력전압 V_o 와 입력전압 V_d 의 관계식은 다음과 같이 비선형 특성을 갖게 된다.

$$\frac{V_o}{V_d} = \frac{D^2}{D^2 + 1/4(I_o/I_{LBmax})} \tag{5}$$

$$\text{단, } I_{LBmax} = \frac{T_s V_d}{8L} \tag{6}$$

따라서 출력전압을 일정하게 유지하면서 제어할 경우 Duty비와 출력전류에 따른 입출력전압의 관계는 그림 9와 같이 되며 스위칭 주파수와 인덕턴스의 용량을 CCM(Continuous Conduction Mode)에서 운전되도록 설계하게 된다.

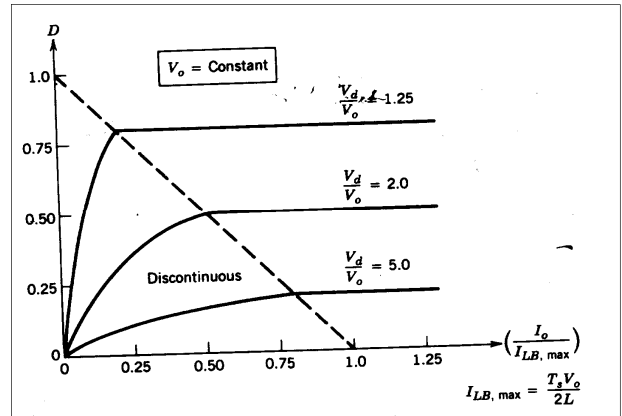


Fig. 9. Buck Converter Characteristics keeping Vo Constant.
 그림 9. Buck 컨버터의 Vo 특성

(나) Boost Converter

Boost Converter가 CCM에서 운전될 경우 출력전압 V_o 및 입력전압 V_d 의 관계식은

$$V_o = \frac{1}{1-D} V_d \tag{7}$$

단, D : Duty Ratio

이때 부하 전류가 I_{oBmax} 이하로 될 경우 DCM(Discontinuous Conduction Mode)으로 운전되므로 이때의 출력전압 V_o 는 입력전압 V_d 에 대해 다음과 같이 비선형 특성을 갖게 된다.

$$D = \left[\frac{4}{27} \frac{V_o}{V_d} \left(\frac{V_o}{V_d} - 1 \right) \frac{I_o}{I_{oBmax}} \right]^{1/2} \tag{8}$$

$$\text{단, } I_{oBmax} = 0.074 \frac{T_s V_o}{L} \tag{9}$$

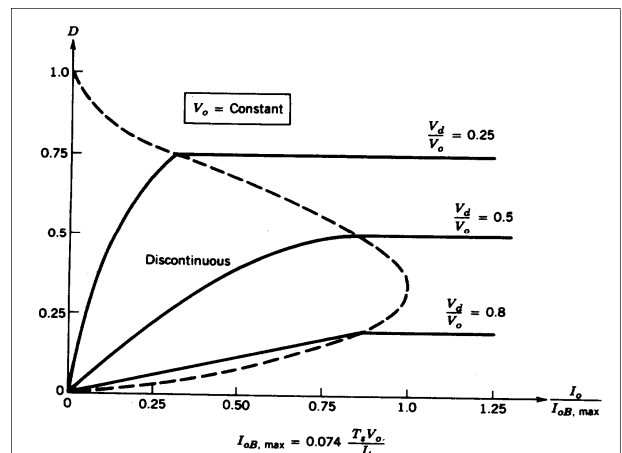


Fig. 10. Boost Converter Characteristics keeping Vo Constant.

그림 10. Boost 컨버터의 Vo 특성

(3) 구성도(블럭도)

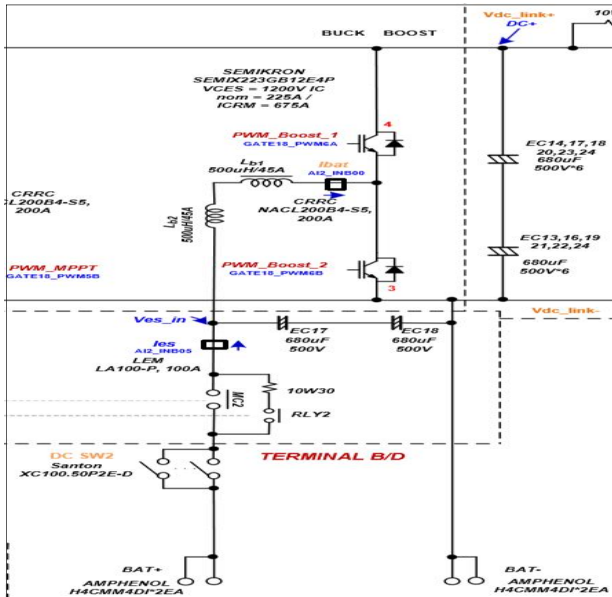


Fig. 11. Circuit diagram(DC/DC Converter2).
그림 11. 구성회로(DC/DC Converter 2)

(4) 기술개발 결과물

(가) Open Loop Test 1

Table 2. Result of DC/DC converter 2 test.

표 2. DC/DC converter 2의 시험 결과

No	Vin	Vout	Max Output	Efficiency
1	560Vdc	720Vdc	28.1KW	98.61%
2	585Vdc	720Vdc	28.1KW	98.72%
3	604Vdc	720Vdc	28.1KW	98.80%
4	624Vdc	720Vdc	28.1KW	98.90%
5	640Vdc	720Vdc	28.1KW	98.51%
6	664Vdc	720Vdc	28.1KW	99.03%
7	685Vdc	720Vdc	28.1KW	99.08%

다. Bi-directional Inverter

(1) 요구사항

- (가) Capacity : 30KW
- (나) Power Rating : 380Vac 3Phase
- (다) Frequency : 50Hz ~60Hz(±0.2Hz)
- (라) Switching Frequency : 10.0~ 20.0(KHz)
- (마) Phase : (3Phase) Transformer_less
- (바) Power Factor : More than 0.99
- (사) Current THD : Total : Under 5%
(Each Phase : Under 3%)
- (야) Efficiency : 98.0%Max.@ Inverter, 95.0%

(2) 설계 내용(토폴로지 분석)

DC Link 전압을 3상 380VAC 계통으로 출력하고, 필요할 경우 계통전력을 AC/DC변환하여 DC/DC converter2를 통해 배터리로 충전기능을 수행하는 인버터(양방향 인버터).

(가) PWM 전력변환기

부하에 가해진 전압의 유무에 대한 비율, 또는 정·부의 전압이 가해진 시간적인 비율에 비례하는 평균전압이 되므로 전력용 반도체 스위치에 의한 전압의 가변은 스위치들의 통전 기간에 따르게 된다.

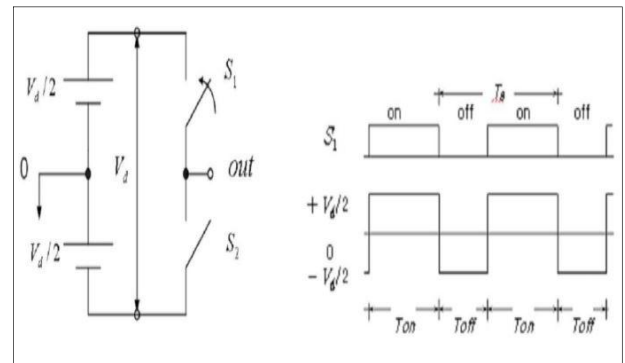


Fig. 12. Output waveform by s/w.

그림 12. 스위치에 따른 출력 파형

그림 12에서 스위치 S1과 S2는 서로 반대로 온, 오프(on, off)를 하도록 되어 있으며 스위칭 주기에서 출력의 평균전압은 전원의 기준점(0 전위점)에 대하여 1주기 평균을 하면 되므로 다음과 같이 계산되어 진다.

$$\begin{aligned}
 V_{out} &= \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} v_{out} dt \\
 &= \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{T_{off}} -\frac{V_d}{2} dt + \int_{T_{off}}^{T_s} \frac{V_d}{2} dt \right) \\
 &= \frac{V_d}{2T_s} (T_{on} - T_{off}) \\
 &= V_d \left(-\frac{1}{2} + \frac{T_{on}}{T_s} \right)
 \end{aligned} \tag{10}$$

스위치의 주기에 대한 통전 기간의 조절로 가변 전압을 얻는 방법을 PWM 방법이라고 하며 출력은 기준점(0 전위점)에 대하여 임의의 주파수와 임의의 전압(단상 교류)을 만들 수 있으며 2개의 상을 추가하면 3상의 가변주파수, 가변전압을 얻을 수 있다.

(3) 구성도(블럭도)

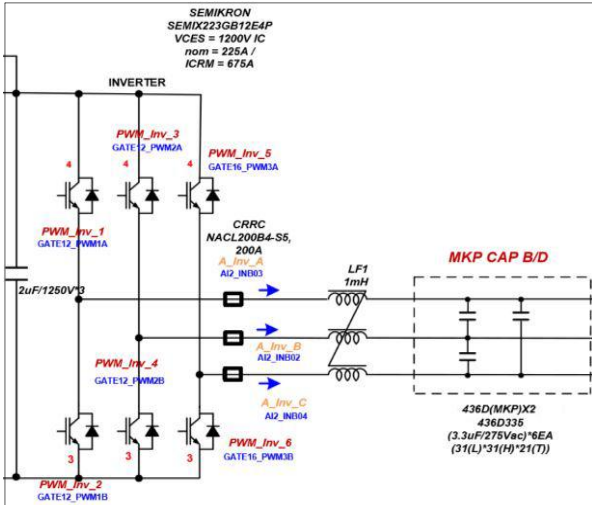


Fig. 13. Circuit diagram(3phase PWM inverter).
그림 13. 구성회로(3상 PWM 인버터)

(나) 컨버터의 제어

교류측의 전력은 전원전압, 변환기의 교류측 전압과 위상각 및 리액턴스에 의한 식 (11)로 된다.

$$P_a = \sqrt{3} \frac{VE}{X} \sin\alpha \tag{11}$$

컨버터는 교류 측을 고 역률의 상태로 운전하는 경우 직류 출력 전압은 교류 전원의 전압보다 높은 전압으로 되므로 전압 형 컨버터는 일정한 전압을 출력하는 변환기가 된다.

(다) 전력변환기 PI제어

P-I 제어기에 의하여 리액터 양단의 전압을 제어하여 목적인 크기의 전류가 흐르도록 할 수 있다.

$$V_L = V - E = XI^* + \left(\frac{ki}{s} + kp\right)(I^* - I) \tag{12}$$

전력변환기의 교류 측 전압은 직류전압과 PWM 변조율에 의하여 자유롭게 변화시킬 수 있으므로 식 (12)에서

$$V_L = V - E = XI^* + \left(\frac{ki}{s} + kp\right)(I^* - I) \tag{13}$$

을 얻는다. 식 (13)에서 우변 1항은 전원전압에서 리액턴스 강하를 뺀 전압이므로 정상상태에서 전력변환기의 전압벡터를 의미한다. 우변 제2항은 이 제어기의 동작으로 설정한 전류가 되도록 리액턴

스의 전압을 제어한다.

$$\begin{bmatrix} e_{vd} \\ e_{vq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -X i_q^* \\ V_q \end{bmatrix} \tag{14}$$

식 (12)에서 우변 제2항에 의한 전류제어로 불평형 보상이 이루어진다.

(4) 기술개발 결과물

(가) Open Loop Test 1

Table 3. Result of test3phase PWM inverter.

표 3. 3상 PWM 인버터 시험

No	Vin	Vout	Max Output	Efficiency	THD	Frequency
1	380Vac	600Vdc	20KW	98.13%	3.22%	8KHz
2	380Vac	600Vdc	30.2KW	98.00%	3.56%	8KHz
3	380Vac	720Vdc	30.2KW	97.76%	3.50%	10KHz

III. 결론

본 시스템에서는 에너지 저장 매체로 2차 전지 중에서 에너지 밀도가 상대적으로 높으면서도, 다른 리튬이온전지(폴리머 포함) 등과 비교 시 발열성이 없어 가연성 또는 폭발 등을 일으키지 않음으로써 안전성이 탁월한 리튬인산철(LiFePO4) 배터리를 채택하여 에너지 저장 시스템을 구성하였다. 또한 리튬인산철 배터리는 직류 측 입력전압 변동이 작아서 PCS 설계가 용이하고 ESS 절연전압도 낮출 수 있는 효과가 있으며 온도특성이 매우 좋아 자체 발열이 거의 없어서 주위 온도에 영향을 주지 않는 장점이 있다. 이러한 배터리 팩을 채용한 ESS에 MPPT기능이 포함된 PV 입력 전력변환기(DC/DC Converter 1), 배터리 충, 방전 양방향 전력변환기(DC/DC Converter 2), DC Link 전압을 3상 380VAC 계통으로 출력하고, 필요할 경우 계통 전력을 AC/DC변환하여 DC/DC converter2를 통해 배터리로 충전기능을 수행하는 양방향 인버터 등의 3가지 전력변환기를 탑재한 PCS개발을 통하여 ESS의 용량 확장성은 물론 배터리로부터 저장된 에너지를 380V 3상 교류로 변환하여 전력 계통에 연계하는 계통 연계형 전력변환 시스템의 기능도 갖추게 되었다. 태양광 발전을 통해 낮 시간 부하 측에 안정적인 전력을 공급하고 남은 전력은 배터리에 저장할 수 있으며, 일사량이 없는 저녁시간

에도 배터리를 통해 부하 측에 안정적인 전력을 공급하거나, 전력요금이 저렴한 심야전력을 활용하여 배터리를 충전할 수 있도록 충·방전 일정을 조정 가능하도록 설계하였다. 추후 제주의 사이트에 일정 시간 실증과 운영을 통하여 취득한 데이터를 활용하여 배터리의 안정성과 시스템의 경제적 효과를 검증하고자 한다.

References

- [1] B. W. Ko, H. Y. Choi, "A study on applying research and development results of university industry academia cooperation to social enterprise and its economic feasibility," *ASIA LIFE SCIENCES, Supplement*, Vol.20, No.1, pp.85-94, 2019.
- [2] C. H. Park, M. S. Cho, J. U. Park, H. C. Noh, J. U. Lee, and S. H. Park, "Electric load forecasting based on short-and long-term modeling of time series data," in *Proc. of the KCC 2019*, pp.409-411, 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.3.852
- [3] H. K. Choi, B. H. Chang, and K. H. Kim, "Comparative study of short-term load forecasting with deep learning algorithm," *The 50th KIEE Summer Conference*, pp.664-665, 2019.
- [4] B.-W. Ko, H.-Y. Choi, H.-S. Kim, "Using of small scale Pv lighting system for emergency power supply styl ESS construct and design of monitoring system," *The 50th KIEE Summer Conference*, pp.166-167, 2019.
- [5] L-H, Hwang, "A study on the characteristics of PCS Using a Solar Cells Generation of Optimal Integrated" *IKEEE*, Vol.23, no.3, pp.1003-1014, 2019. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.3.1003
- [6] H-G, Jang, J-Y, Lim, "A study on the charge controller for Solar Street Lamp by Direct Duty Ratio Control," *IKEEE*, vol.19, no.1, pp.118-123 2015. DOI: 10.7471/ikeee.2015.19.1.118

BIOGRAPHY

Bong-Woon Ko (Member)



1987 : BS degree in Electrical Engineering, MyongJi University.
 1990 : MS degree in Electrical Engineering, Konkuk University.
 2004 : PhD degree in Electrical Engineering, Konkuk University