태양광-ESS 하이브리드시스템의 토폴로지 및 제어방법에 대한 연구

김 종회, 이 경수
한국산업기술대학교 에너지·전기공학과

A study on the topology and control method of Solar Hybrid Energy Storage System

JongHoe Kim, KyungSoo Lee
Department of Energy and Electrical Engineering, Korea Polytechnic University

ABSTRACT

소규모 신재생에너지 시스템의 보급·확산과 자가발전 시스템 시장이 확대됨에 따라 친환경 에너지저장시스템(ESS, Energy Storage System)에 대한 기술 요구가 증대되고 있다. 특히 전력변환장치인 컨버터와 인버터에서 발생하는 손실은 무시할 수 없다. 본 논문에서는 태양광 ESS 하이브리드시스템 토폴로지와 제어방법의 특징 및 차이점에 대하여 시뮬레이션을 통한 분석을 진행 하였다.

1. 서론

태양광 발전시스템은 일조량에 따라 출력이 변하는 간헐적 특징을 가지고 있다. 간헐적 특징을 개선하기 위해 최근 태양광 발전시스템과 ESS를 연계한 하이브리드시스템에 관한 연구가 진행되고 있다. ESS와의 연계를 통해 안정적 출력을 유도할 수 있어 계통의 안정도를 향상시킬 수 있다. 태양광 ESS 하이브리드 시스템에서 중요시 되는 점은 안정성과 효율성이며, 이러한 시스템에서 적절한 토폴로지 선택기준은 사용용도에 따라 달라진다. 토폴로지는 크게 AC 결합방식, DC 결합방식으로 구분할 수 있다. 본 논문에서는 태양광 ESS 하이브리드 시스템의 결합방식에 대한 특징 및 제어방법의 차이점을 시뮬레이션을 통해 분석하였다.

2. 본론

2.1 AC 결합방식

그림 1은 태양광 ESS 하이브리드 시스템 AC 결합방식을 나타내고 있다. 기존에 설치된 태양광 발전시스템에 ESS의 추가 가 간편하고, 문제 발생 시 수리 및 교체가 간편하다. 그러나 PV에서 ESS로 충전 시에는 4개의 전력변환장치를 거치기 때문에 DC결합방식에 비해 효율이 가장 낮은 특징이 있다.

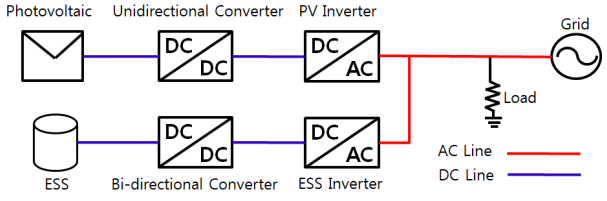


그림 1 태양광-ESS 하이브리드시스템 AC결합방식
Fig. 1 AC Coupling PV-ESS hybrid system

2.2 DC 결합방식

DC 결합방식은 AC 결합방식에 비해 ESS용 DC/AC 변환이 없으므로 AC 결합방식과 비교하여 전력 효율을 높일 수 있으며 DC Link단의 전압제어를 통해 최적 효율을 유지할 수 있게 한다. DC 결합방식은 그림 2, 그림 3, 그림 4와 같이 3가지 방식으로 나눌 수 있다. 그림 2(Method 1)는 PV 출력단과 PV용 양방향 컨버터 사이에 ESS를 결합한 방식이다. 이 방식은 PV로부터 ESS 충전시 ESS용 양방향 컨버터만 사용되므로 전력변환 효율을 높일 수 있다. 하지만 계통으로부터 ESS 충전 시 인버터와 PV용 컨버터는 양방향성을 가져야 하고, MPPT 제어 과정에서 ESS용 양방향 컨버터에 의한 영향이 존재하는 단점이 있어 실제로는 잘 사용되지 않는 방식이다.

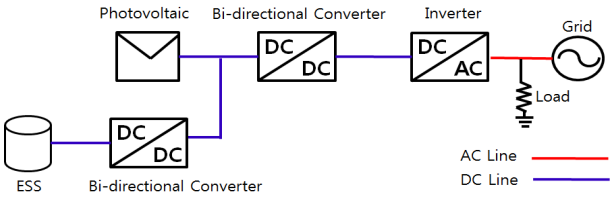


그림 2 DC 결합방식, PV 출력 단 결합 방식(Method1)
Fig. 2 DC coupling system PV output coupling(Method1)

그림 3(Method 2)은 PV용 컨버터 출력단과 인버터 입력단 사이에 ESS가 연결된 토폴로지이다. 일반적으로 태양광 ESS 발전시스템 토폴로지 가운데 많이 사용되는 방식이다. 이 방식은 PV용 컨버터에서 MPPT제어를 하여 최대출력을 냄과 동시에 인버터의 입력단의 DC Link 전압을 제어하여 ESS 충·방전에 따른 적절한 전압을 유지할 수 있어 다른 결합방식 대비 안정적이다. 하지만 ESS 충·방전 시 2대의 컨버터를 거쳐야 하므로 전력변환 효율이 좋지 않다.

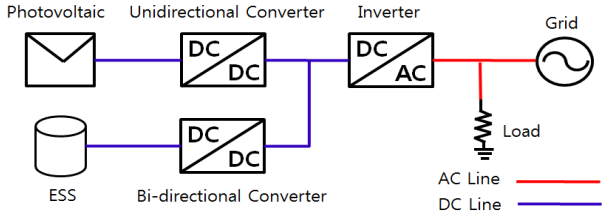


그림 3 DC 결합방식, 인버터 DC-Link단 결합 방식(Method2)
Fig. 3 DC coupling system, Inverter DC-Link coupling (Method2)

그림 4는 인버터 DC Link단 결합 방식의 모드별 전력흐름도를 나타내고 있다. (a) PV발전량이 충분한 경우 ESS에 전력

을 공급하고 남은 전력은 계통으로 공급한다. (b) ESS가 완충된 경우 PV전력은 계통으로 공급한다. (c) 일조량이 부족 한 경우 계통으로부터 ESS에 전력을 공급 및 야간의 경우 ESS로부터 계통으로 전력을 공급한다.

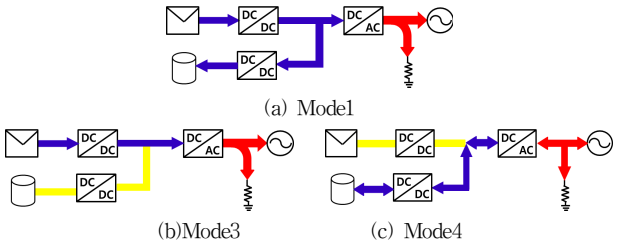


그림 4 인버터 DC-Link단 결합 방식 모드별 전력흐름도
Fig. 4 Power flow by coupling mode with Inverter DC-Link coupling (Method2)

그림 5(Method 3)은 PV출력단과 DC Link사이에 Relay 2개를 추가하여 ESS를 연결한 방식으로 앞서 설명한 Method 1, Method 2 의 단점을 보완한 구조이다.

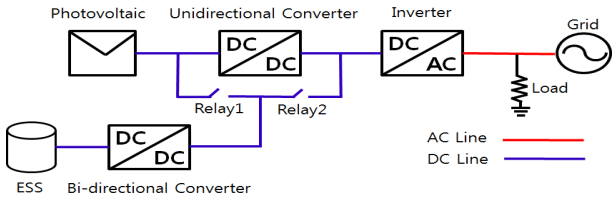


그림 5 DC 결합방식, 2개의 Relay가 추가된 결합방식(Method3)
Fig. 5 DC coupling system added 2 relay(Method3)

그림 6은 2개의 Relay가 추가된 결합방식의 모드별 전력흐름도를 나타낸다. (a) 일조량이 충분한 경우 PV발전전력은 Relay 1을 통해 ESS로 전력을 공급하고 ESS가 완충된 경우 생산된 전력은 모두 계통으로 공급된다. (b) PV발전전력이 ESS 충전전압 보다 부족한 경우 PV용 컨버터를 통해 MPPT 제어 후 Relay 2를 통해 ESS에 전력을 공급한다. (c) ESS가 완충된 경우 PV발전 전력은 모두 계통으로 공급한다. (d) 야간, 일조량이 저조한 경우 Relay 2를 통해 계통으로부터 ESS로 전력공급 및 방전하여 계통으로 전력을 공급한다. 따라서 PV출력 단 결합방식(Method1)과 같이 PV용 컨버터를 통하지 않고 충전하므로 전력변환 효율을 높일 수 있고, 인버터 DC Link단 결합방식(Method 2)과 달리 PV용 DC/DC 컨버터가 양방향 기능을 포함하지 않는 경우 ESS로 전력을 공급할 수 있게 된다.

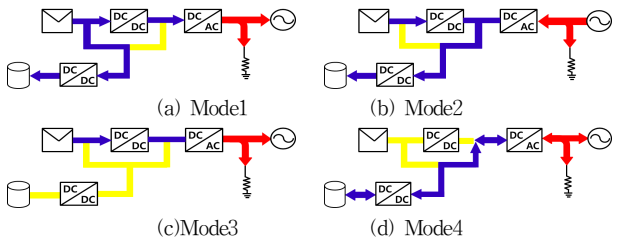
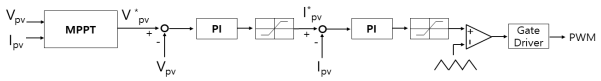


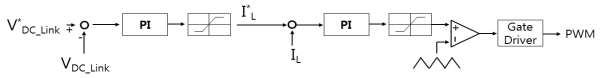
그림 6 2개의 Relay가 추가된 결합방식 모드별 전력흐름도
Fig. 6 Power flow by coupling mode with two relays added

2.3 태양광-ESS 하이브리드 시스템 제어방식

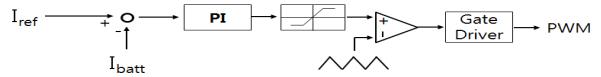
그림 7은 AC결합방식 및 DC결합방식에 적용되는 제어기에 따른 제어블록도를 나타내고 있다. (a)는 DC/DC 컨버터에 적용되는 MPPT제어 블록도이며, PV의 출력전압과 출력전류를 센싱받아 최대 전력점을 추종한 뒤 전류제어를 통해 출력전류를 인버터에 전달한다. (b)는 ESS용 Bi directional 컨버터에 적용되는 방전모드의 제어 블록도를 나타내고 있다. Bi directional 컨버터의 출력전압을 DC Link 전압으로 유지하기 위한 정전압제어(CV)와 출력전류를 인버터에 전달하기 위한 전류제어로 구성된다. (c)와 (d)는 ESS용 Bi directional 컨버터에 적용되는 충전모드 제어블록도를 나타내고 있다. 초기에 정전류제어(CC)를 진행하며 배터리를 충전하고 배터리의 완충전압에 도달하면 정전압제어(CV)로 전환되어 배터리를 충전한다. (e)는 인버터 제어 블록도를 나타내고 있다. DC Link 전압을 일정하게 유지하기 위한 전압제어와 출력전류를 계통 및 부하에 전달하기 위한 전류제어로 이루어져 있다.



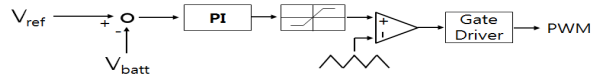
(a) MPPT 제어 블록도



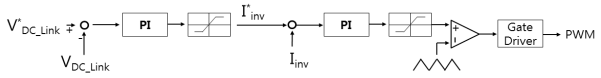
(b) 방전모드 제어 블록도



(c) 충전(CC)모드 제어 블록도



(d) 충전(CV)모드 제어 블록도



(e) 인버터 제어 블록도

그림 7 태양광-ESS 하이브리드시스템 제어블록도
Fig. 7 PV-ESS hybrid system Control block diagram

4. 시뮬레이션

시뮬레이션은 PSIM 9.3을 사용하였다. 표 1은 시뮬레이션에 사용된 태양전지 모듈 사양을 나타내며 3.15[kW]로 구성하였다. 표 2는 시뮬레이션에 사용된 배터리 사양을 나타낸다. 배터리 용량은 일반적으로 태양광발전시스템의 약 3배를 선정하므로 9[kWh]로 선정해야 하며 배터리 전압은 186.5V로 선정하였고, 50직렬, 12병렬 구성이 필요하다. 시뮬레이션에서는 PSIM에서 제공하는 리튬이온배터리 모델을 사용하였다.

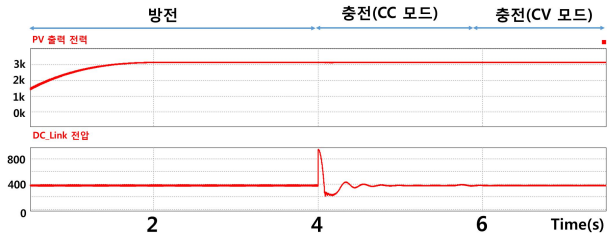
표 1 시뮬레이션에 사용된 태양전지 모듈 사양
Table 1 The Solar cell module used in the simulation

어레이 구성	5직렬 × 2병렬
최대전력 (Pmax)	315 × 10 = 3.15 [kW]
최대전압 (Vmpp)	37.3 × 5 = 186.5 [V]
최대전류 (Impp)	8.45 × 2 = 16.9 [A]
개방전압 (Voc)	45.3 × 5 = 226.5 [V]
단락전류 (Isc)	9.02 × 2 = 18.04 [A]

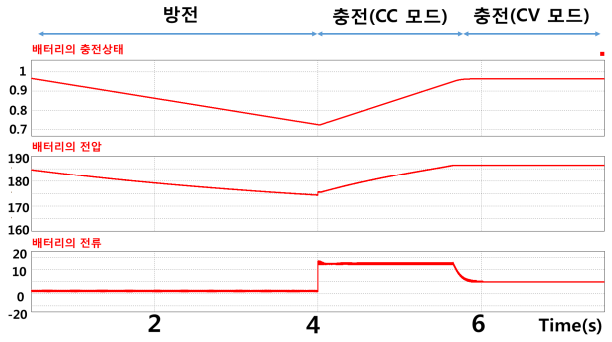
표 2 시뮬레이션에 사용된 배터리 사양
Table 2 The battery specification used in the simulation

정격전압	165.5V
방전한계전압	111V
완전충전 전압	186.5V
초기 배터리 충전상태	1(100%)

4.1 시뮬레이션 결과



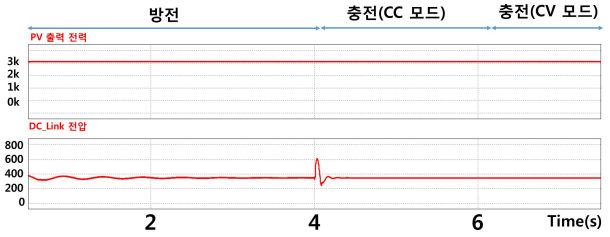
(a) PV 출력 전력, DC_Link 전압 파형



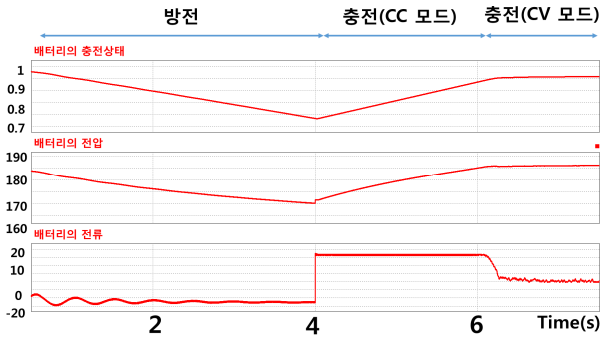
(b) 배터리 충전상태, 전압, 전류 파형

그림 8 Method 2의 PSIM 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 8 Waveform of PSIM simulation result of Method2



(a) PV 출력 전력, DC_Link 전압 파형



(b) 배터리 충전상태, 전압, 전류 파형

그림 9 Method 3의 PSIM 시뮬레이션 결과 파형

Fig. 9 Waveform of PSIM simulation result of Method3

표 3 시뮬레이션 시나리오

Table 3 Scenario of the simulation

모드	시간(s)
방전	0 ~ 4
충전(CC 모드)	4 ~ 6
충전(CV 모드)	6 ~

4.3 시뮬레이션 결과

표 3은 시뮬레이션 시나리오를 나타내고 있다. 방전모드와 충전모드로 구분하며, 그림 8은 DC 결합방식 중 인버터 DC Link단 결합방식(Method2)토폴로지의 출력파형을 나타내고 있다. PV발전 전력은 MPPT제어를 통해 2[sec]부터 최대전력인 3.15[kW]로 추종하는 것을 확인할 수 있다. 4[sec]까지는 방전모드이므로 배터리는 전압강하의 형태를 나타내며 4[sec]부터 충전모드로 전환되며 전압상승의 형태를 나타낸다. 배터리의 전류방향은 충·방전모드의 전환에 따라 음의형태에서 양의형태로 전환되며 6[sec]까지 CC모드를 유지하며 CV모드로 전환됨과 동시에 배터리가 천천히 완전충전으로 되며 0이 되는 것을 확인할 수 있다. 배터리의 충전상태는 배터리의 최대 충전량 대비 현재 충전량으로 나타낼 수 있다. 그림 9은 DC 결합방식 중 2개의 Relay가 추가된 결합방식(Method3)토폴로지의 출력파형을 나타내고 있다. 방전모드에서 Method2와 Method3은 2대의 전력변환장치를 거쳐 계통에 출력을 내보내기 때문에 그림 8과 9는 유사하다는 특징이 있다. 그러므로 그림 8과 9의 방전시 파형은 앞서 Method2에서 설명한 것과 동일하다. 그러나 Method3의 충전시에는 양방향 DC/DC 컨버터만을 통해 충전되므로 시뮬레이션 시간 6[sec]를 전후로 전압제어모드로 변경되는 시간차이가 있음을 확인할 수 있다.

3. 결론

본 논문에서는 태양광 ESS 하이브리드시스템 토폴로지와 제어방법의 특징 및 차이점에 대하여 시뮬레이션을 통한 분석을 진행하였다. AC 결합방식과 DC 결합방식 중 주로 쓰이는 토폴로지를 선별하였으며 토폴로지 별 출력파형을 확인하였다. 충·방전 모드 전환시 DC Link의 전압의 Peak값이 상승하는 문제점을 확인하였다. 향후에는 모드 전환시 Peak값의 억제를 위한 제어기 설계와 새로운 태양광 ESS 하이브리드시스템 토폴로지를 제안하고자 한다.

이 논문은 2017년도 에너지기술평가원의 연구비 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.
(No. 20173030068990)

참 고 문 헌

[1] M.K. Kim, et al, "A study on the Comparative Analysis of BESS according to Position", The Symposium of Koera Institute of Electrical Engineers, pp. 365 367, 2011.

[2] B.H. Park, et al, "Design of Hybrid System for Battery Charge·Discharge using Photovoltaic/Fuel cell", Journal of the Korean Solar Energy Society Conference, pp. 123 129, 2014.

[3] Hesse, Holger C., et al. "Lithium Ion Battery Storage for the Grid A Review of Stationary Battery Storage System Design Tailored for Applications in Modern Power Grids." Energies Vol. 10, No. 12, 2107.

[4] Weniger, J., and T. Tjaden. "Performance Simulationsmodell für AC gekoppelte PV Batteriesysteme (PerModAC Version 1.0)", Hochschule für Technik and Wirtschaft HTW Berlin, 2017.