

30kW급 태양광전원용 회로변경장치 및 전압보상장치의 운용방안에 대한 연구

전진택, 이진호, 김지명, 박동명, 노대석
한국기술교육대학교 전기공학과
e-mail:jinfind@koreatech.ac.kr

A Study on the Operation Method of Circuit Configuration Device and Voltage Compensation Device for 30 kW PV System

Jin-Taek Jeon, Jin-ho Lee, Ji-Myung Kim, Dong-Myoung Park, Dea-Seok Rho
Dept. of Electrical Engineering, Korea University of Technology and Education

요약

최근, 정부는 2050 넷제로 시대를 대비하는 신재생에너지의 확대를 통해 전력생산에서 탈탄소화가 진행되고 있다. 하지만 신재생에너지 중 태양광전원의 특성 및 환경요인을 고려하지 않고 설계되어 발전출력이 제한되어 운용효율이 떨어지는 현상과 일부 모듈에 음영이 발생하여 인버터 동작전압 이하가 되어 인버터가 탈락하는 현상이 발생하고 있는 실정이다. 따라서, 본 논문에서는 음영 외 여러 가지 요인으로 인버터가 탈락되는 현상을 방지하고 태양광전원의 운용효율을 향상시키기 위하여 PLC부, 릴레이부, 콘택터부로 구성된 회로변경장치와 전압보상장치를 제안한다. 이를 바탕으로, 제안한 태양광전원용 회로변경장치와 전압보상장치의 운용 특성을 분석한 결과, 음영이 발생할 경우 제안한 장치는 태양광전원의 인버터가 운용한계 전압에서 벗어나지 않도록 전압을 보상하여, 인버터의 탈락을 방지할 수 있어 태양광전원의 운용효율을 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

1. 서론

최근 정부는 2050 탄소 중립 정책의 실현과 고유가 상황에 따른 경제성 향상을 위한 재생에너지 보급 확대에 태양광전원의 수요는 점차 증가할 전망이다. 하지만, 태양전지 모듈에 도달하는 태양광에너지로부터 태양광전원 시스템을 거쳐 변환되는 교류전력까지 약 25[%]의 손실이 존재한다고 알려져 있다. 태양광전원 시스템의 에너지 효율향상 및 원가 절감을 위해 국내의 민간/공공 단체에서는 각 모듈(Cell/PCS/ESS) 단위의 발전효율 향상에 집중하고 있지만, 모듈 단위로의 태양광전원 효율 향상에는 한계를 보이고 있는 실정에서 태양광전원 효율을 향상시킬 수 있는 새로운 접근 방식이 필요하다. 또한, 태양광모듈의 유지보수 및 경년열화로 인한 국내 태양광전원 시스템의 발전량 손실을 추정해 보면, 초기 발전량 대비 매년 3.7[%]의 손실이 발생(다수의 보고서에서 제시)하고 있으므로 이에 대한 대책이 시급한 실정이다. 특히, 태양광전원의 특성상 기후조건(음영, 일사량, 온도 등)의 영향을 많이 받고, 환경적인 요인(염해, 먼지 등)에 의하여 발전 출력이 제한을 받아 운용 효율이 저하될 수 있다.

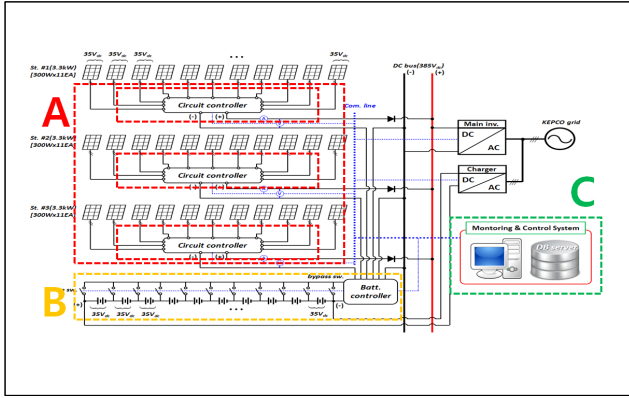
기존의 태양광전원 시스템은 여러 개의 스트링(어레이)이

DC 부스에 병렬로 접속되어 하나의 인버터에 연결되는 방식으로 구성되어, 일부 모듈에 음영이 발생하는 경우에 해당 스트링의 전압이 인버터의 동작전압 미만으로 감소되어, 해당 스트링의 전력이 인버터를 통해 전력 계통으로 전송되지 못하는 문제점이 발생하여, 태양광전원 전체 시스템의 운용 효율이 저하될 가능성이 발생하고 있다. 따라서 본 논문에서는 인버터의 동작전압이 음영 외 여러 가지 요인으로 탈락되는 현상을 방지하는 방안과 태양광전원의 운용효율을 향상시키기 위해 회로변경장치와 전압보상장치의 설치를 제안한다. 또한 회로변경장치와 전압보상장치의 특성 시험을 통해 음영이 발생시 전압이 일정하게 보상되어 태양광전원의 운용효율이 향상됨을 알 수 있다.

2. 30kW급 태양광전원용 회로변경장치 및 전압보상장치의 구성 및 운영방안

태양광전원용 회로변경장치는 그림 1의 섹션 A으로 구성되어 있고, 전압보상장치는 그림 2의 섹션 B로 구성되어 있다. 또한, 그림 1의 섹션 C은 회로변경장치 및 전압보상장치를 실시간으로 제어할 수 있는 모니터링부로 구성하여 설계한다. 한편, 태양광 모듈의 구성은 총 3개의 스트링으로 1개

의 스트링에 12장의 모듈이 설치한다. 1스트링은 회로변경장치와 전압보상장치를 100%로 적용되게 설계하고 2 스트링은 50%의 회로변경장치와 전압보상장치가 설계한다. 그리고 3 스트링은 회로변경장치와 전압보상장치를 설치하지 않는다. 그림 2는 30kW급 태양광전원 시스템의 실제 모습이다.



[그림 1] 30kW급 태양광전원용 회로변경장치 및 제어장치



[그림 2] 실제 30kW급 태양광전원 시스템

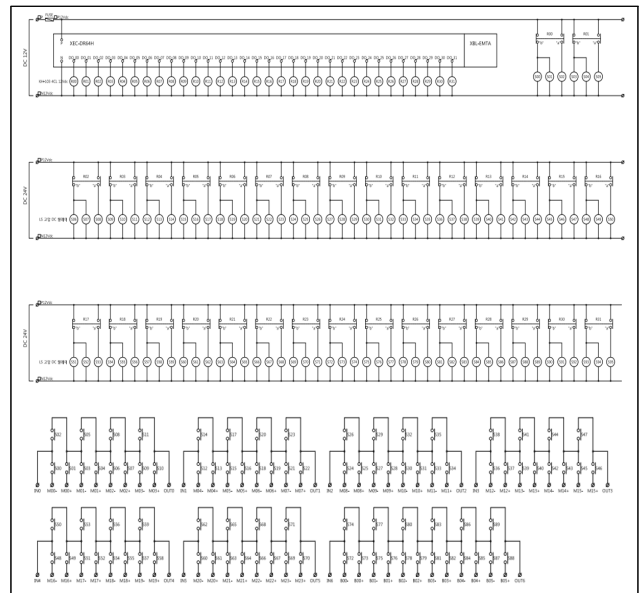
3. 30kW급 태양광전원용 회로변경장치 및 전압보상장치의 구현

3.1 회로변경장치

그림 3은 회로변경장치의 제작회로도이다. 회로변경 제어장치는 PLC부, 릴레이부, 콘택터부로 구분하여 설계한다. PLC는 DI/DO를 10kW급 모듈을 기반으로 설계한다. 400W급 태양광 모듈을 기반으로 24장의 제어가 필요하며, 4개의 모듈을 1개의 블록으로 구성할 수 있도록 설계한다. 또한, 1개의 모듈은 +와 -로 2개의 DC릴레이로 설계하고, 바이패스를 위해 1개의 DC릴레이로 설계한다. PLC의 기계적/전기적 내구도를 감안하여, 정상상태에서는 PLC의 출력을 “0”으로 설계한다. 또한 이상 상태에서 PLC의 출력을 “1”로 설계하여 보완한다. PLC는 본체와 DI/DO 추가 모듈로 구성할 수 있으

나, 외부에 제어반이 설치되는 조건을 감안하여, 본체가 64접점을 같은 PLC로 선정하여 PLC 회로를 설계한다. 릴레이부는 PLC의 기계적/전기적 내구도를 높이기 위하여 구성한다. PLC와 DC릴레이 사이에서 스위치 역할을 수행할 수 있도록 설계하였으며, PLC의 출력이 “0”일 경우 DC릴레이는 2개가 사용하고, 출력이 “1”일 경우 DC릴레이 1개를 사용하도록 설계하여, 태양광 모듈 연결용 DC릴레이와 바이패스용 DC릴레이가 혼촉되지 않도록 설계한다. 태양광 모듈의 직렬 접속 최대전압이 1000Vdc이며, 일반적인 Full-MPPT 범위가 400~800Vdc임을 감안하여, 최대 전압을 선정하고, 태양광 모듈의 최대 전류는 10A정도이나, 보상장치에 사용되는 리튬이온전지가 25A이므로, DC릴레이는 1000Vdc 40A로 선정하여 설계한다. 또한, 옥외 설치되는 태양광 모듈 및 구조물에 낙뢰 등을 감안하여 AC 3kV 1min(AC 3.6kV 1sec)의 내전압을 견딜 수 있는 제품을 적용한다.

콘택터의 배열은 태양광 모듈 1개당 +, -, 바이패스로 구성하고, 태양광 모듈 4장의 1개의 블록으로 구성한다. 이는, 3kW급 모듈의 경우 400W급 8장을 사용하고, 10kW급의 경우 24장의 모듈을 사용하여, 소용량 및 중용량 태양광전원 단지에서 적용이 가능하도록 4장을 1개의 블록으로 설계한다. 10kW급 태양광 모듈의 1개 어레이는 3개의 블록으로 구성할 수 있도록 설계한다.



[그림 3] 회로변경장치 제작회로도

3.2 전압보상장치

전압보상장치를 설계하기 위해서 전압범위 설계, 전류 범위 설계, 보호설계가 필요하다. 전압범위 설계 시 30kW급 최적회로 제어장치에서 태양광모듈 전기적/기계적 특성에 의하여, 리튬이온전지의 전압범위는 사용 모듈의 STC 조건의

Vmp와 NMOT 조건의 Vmp 사이의 값을 적용하는 것이 합리적이다. 또한, 지역 기후조건에 따라 모듈의 발전량 특성 분석을 반영하여 리튬이온전지의 전압범위를 선정하여야 한다. 30kW급 회로 제어장치에 사용되는 태양광모듈을 기준으로 Vmp가 최저 39Vdc 정도임을 감안하여 리튬이온전지의 방전 정지 전압은 39Vdc 이상으로 설계하였으며, 최대 49.6Vdc이므로 리튬이온전지의 충전 한계 전압은 50Vdc 이하로 설계한다.

따라서, 리튬이온전지의 전압 범위는 SOC 0%(39.2Vdc) ~ 100%(58.8Vdc)로 설계하였으며, 일반적인 배터리 운전 요령에서 CC구간을 사용하고, CC구간은 80~90% 이므로 사용전압은 50.4Vdc로 설계한다. 전류 범위 설계 시 30kW급 최적 회로 제어장치에서 태양광모듈 전기적/기계적 특성에 의하여, 리튬이온전지의 전압범위는 사용 모듈의 STC 조건의 Imp와 최대 보상시간 사이의 값을 적용하는 것이 합리적이다. 30kW급 회로 제어장치에 사용되는 태양광모듈을 기준으로 Imp가 9.94A이며, Isc가 10.59A이므로, 10A를 최대값으로 설계하고, 음영이 2시간 정도 지속되므로 2h를 적용하고, DOD를 80%로 설정하여 25Ah로 설계한다. 보호 설계 시 리튬이온전지의 과충전, 과방전, 과전류, 단락, 고온보호 및 셀 발란싱기능의 Advanced BMS가 적용된 컨트롤러를 선정하였으며, 리튬이온용 50.4V 25Ah용 BMS를 적용한다.

| | | | | | | | | | | |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-------|
| 6-12 | 5-12 | 5-11 | 4-11 | 4-10 | 3-12 | 2-12 | 2-11 | 2-10 | 1-10 | |
| 6-11 | 6-10 | 5-10 | 4-12 | 4-9 | 3-11 | 3-9 | 2-9 | 1-12 | 1-9 | |
| 6-8 | 6-9 | 5-8 | 5-9 | 4-8 | 3-10 | 3-8 | 2-8 | 1-11 | 1-8 | |
| 6-7 | 5-7 | 5-6 | 5-5 | 4-6 | 4-7 | 3-7 | 2-6 | 2-7 | 1-7 | |
| 6-6 | 6-3 | 5-3 | 5-4 | 4-5 | 3-6 | 3-5 | 2-5 | 1-6 | 1-5 | 음영 구간 |
| 6-5 | 6-2 | 5-2 | 4-4 | 4-3 | 3-4 | 3-3 | 2-3 | 2-4 | 1-4 | |
| 6-4 | 6-1 | 5-1 | 4-2 | 4-1 | 3-2 | 3-1 | 2-2 | 1-2 | 1-3 | |
| | | | | | | | 2-1 | 1-1 | | |

(a) 음영구간 선정



(b) 그늘막 설치

[그림 4] 음영구간 조건

4. 시험 결과 및 분석

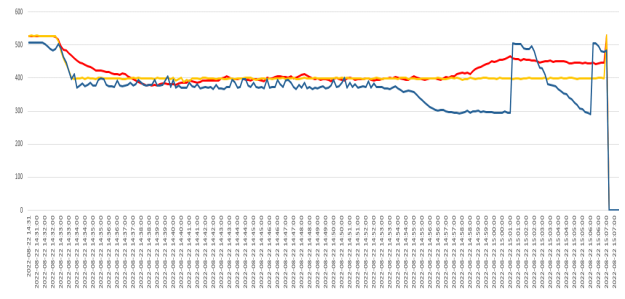
4.1 시험조건

30kW급 태양광전원의 특성을 분석하기 위해 배전반을 태양광전원연계용, 기기 제어전원용, 센서 제어전원용, 시스템 제어전원용으로 구분하며, 각 1개의 예비 회로로 구성한다.

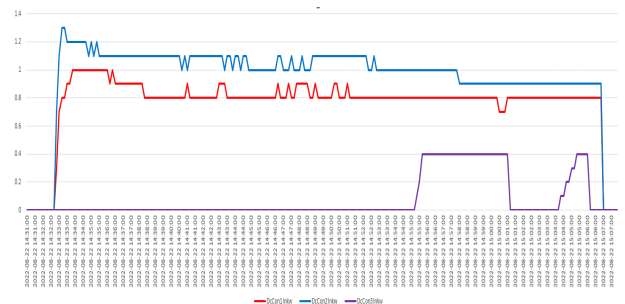
1개의 스트링에 12장의 모듈을 설치하고, DC/DC 컨버터 1개당 2개의 스트링을 연결하기 위하여, 72장의 모듈을 그림 4의 (a)와 같이 배열한다. 음영 장치는 그늘막을 사용하여 그림 4의 (b)와 같이 설치한다.

4.2 회로변경장치 운용 특성

14시 31분부터 약 30분간 최적회로 제어장치 특성시험을 수행하였다. DC/DC Con1에는 최적회로가 100% 적용된 1번, 2번 스트링으로 구성하고, DC/DC Con2에는 3번, 4번 스트링에 각각 최적회로 50%로 구성하며, DC/DC Con3에는 5번, 6번 스트링을 회로를 적용하지 않는다. 각 스트링에 음영을 발생하여 최적회로가 구성되도록 시험하였다. DC/DC Con1은 1번 및 2번 스트링의 정상 부분을 1개의 스트링으로 구성하며, DC/DC Con2는 50% 적용된 부분이 탈락하고 회로를 적용하지 않는 부분은 1개의 스트링으로 구성됨을 확인할 수 있었다. 그림 5의 (a)와 같이 모듈 전압은 400Vdc를 유지하나, 발전량은 그림 5의 b과 같이 DC/DC Con2가 가장 높은 것으로 분석한다.



(a) 전압(Vdc) 트렌드

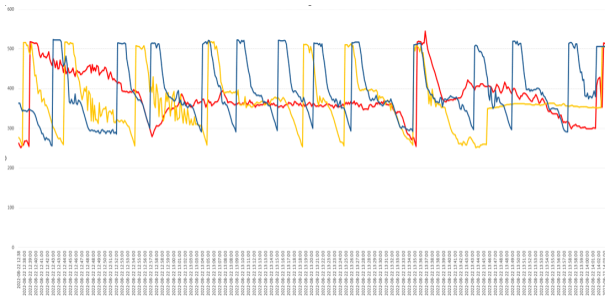


(b) 발전(kW) 트렌드

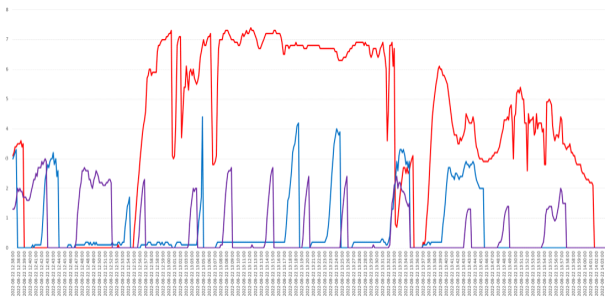
[그림 5] 회로변경장치 특성시험 트렌드

4.3 전압보상장치 운용 특성

DC/DC Con1에는 1번, 2번 스트링에 각각 1kWh 리튬이온 배터리 3개씩 연결되어 있고, DC/DC Con2에는 3번에 3개, 4번에 0개가 연결되어 있다. 또한 DC/DC Con3에는 리튬이온 배터리가 연결되어 있지 않다. 그림 6의 (a)와 같이 DC/DC Con1은 배터리에 의해 전압이 유지가 되지만, DC/DC Con3의 경우 운전전압 미만이 주기적으로 반복됨을 확인한다.



(a) 전압(Vdc) 트렌드

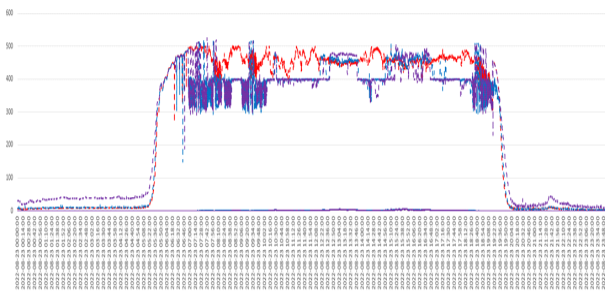


(b) 발전(kW) 트렌드

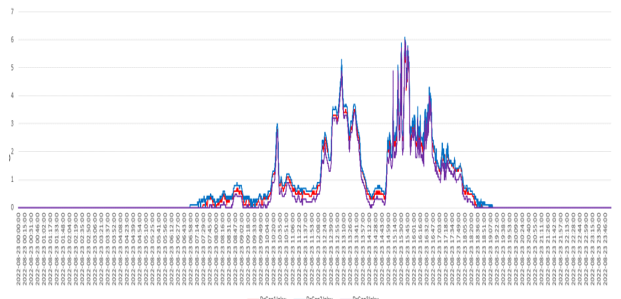
[그림 6] 전압보상장치 특성시험 트렌드

4.4 종합 분석

2022년 08월 23일 00시 00분 ~ 23시 59분까지 1일간 특성시험을 수행한 결과, 스트링 전체에 제어장치를 적용한 DC/DC Con1 보다 음영지역만 설치한 DC/DC Con2의 효율이 우수한 것을 알 수 있다. 이를 분석해 보면, 그림 7의 (a)와 같이 전압은 DC/DC Con1이 DC/DC Con2보다 높게 형성되고, 그림 7의 (b)와 같이 DC/DC Con2가 DC/DC Con1보다 높게 발전됨을 확인한다. DC/DC Con1은 음영에 영향이 없는 모듈까지 제어회로가 구성되어 있고, DC/DC Con2는 음영에 직접적으로 영향을 받는 모듈에 제어회로가 구성되어 있다. 따라서, DC/DC Con1은 모든 조건에서 제어회로가 동작하고 있으며, DC/DC Con2는 직접적인 음영에 대해서만 동작하므로, 일반적인 음영(구름 및 순간 음영)에 대하여 DC/DC Con3과 같은 패턴을 보여줌으로써, 제어장치에 의한 제어 횟수가 감소하여, 발전량이 DC/DC Con1보다 높게 형성된 것으로 분석할 수 있다.



(a) 전압(Vdc) 트렌드



(b) 발전(kW) 트렌드

[그림 7] 일간 특성시험 트렌드

5. 결 론

본 논문에서는 30kW급 태양광전원 시스템에 회로변경장치와 전압보상장치를 설치하여 음영이 발생시 운영효율을 분석하기 위해 실제로 Test Bad를 설계하여 특성시험을 수행하였다. 이에 대한 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 제안한 태양광전원의 회로변경장치를 100% 적용한 1스트링의 전압이 다른 스트링의 전압에 비해 가장 높고, 400Vdc를 유지하여 태양광전원의 운영효율을 큰 폭으로 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

(2) 제안한 태양광전원의 전압보상장치를 이용하여 시험한 결과, 전압보상장치를 100% 적용한 1스트링의 전압은 배터리에 의해 전압의 시간이 50%로 적용한 2스트링의 전압에 비해 지속성이 높음을 알 수 있다. 또한, 전압보상장치를 0%로 적용한 3스트링의 경우 인버터 운전전압 미만으로 주기적으로 반복되어 인버터 탈락됨을 알 수 있다. 따라서, 제안한 방식에 의하면, 태양광 모듈이 인버터에서 탈락되지 않고 지속적으로 출력을 유지하여, 운영효율이 향상됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구(No.20213030160080, No.20214910100010)로서, 관계부처에 감사드립니다.

참고문헌

[1] Ministry of Trade, Industry and Energy, Renewable Energy 3020 Plan, <https://www.etrans.or.kr/policy/04.php>, 2017

[2] Dong-Hyun Tae, Byung-Mok Kim, Hu-Dong Lee, Kab-Seok Kang, Dae-Seok Rho, "A Study on Implementation of Power Regulation Device for Residential PV Module Using Li-ion Battery" Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society 21, no. 8, pp. 17 - 25, August 31, 2021