

<https://doi.org/10.7236/JIIBC.2019.19.5.181>  
JIIBC 2019-5-26

## 태양광발전시스템 독립계통 안정화 기술개발

# Technology Development for Stabilization of PV Independent System

홍경진\*

Kyungjin Hong\*

**요약** 도서 지역과 같은 환경에서 기존 상용 독립계통 디젤 발전기에서 소모되는 화석연료를 저감하기 위해 독립계통 용량의 40% 이상을 부담하는 태양광발전시스템의 개발이 필요하다. 이러한 개발을 위해 우선적으로 도서 지역에 설치된 독립계통의 안정성을 향상시키고 고품질의 전력을 부하에 공급해줄 수 있는 대용량 인버터 개발이 필요하다. 또한, 독립계통 태양광 발전시스템을 위한 EMS용 발전제어 시스템은 태양광 발전원 계통과 연계된 디젤 발전기의 병렬운전 전력 제어시스템으로서 부하율과 태양광발전이 따른 디젤 발전기 출력을 제어하여 해당 부하에 전력을 안정적으로 공급하는 시스템이 필요하다. 이러한 독립계통형 태양광 발전시스템으로 인해 독립계통 지역에 대한 태양광 보급 확대 및 독립계통의 전력안정도를 증가시킬 수 있으며 독립계통의 유·무효 전력 제어에 따른 화석연료 사용 저감이 추가적으로 기대되며, PCS 사용률의 증가로 경제성 조기 확보를 기대할 수 있다.

**Abstract** In order to reduce the fossil fuels consumed in conventional commercial independent diesel generators in the same environment as the island area, it is necessary to develop a photovoltaic system that will bear more than 40% of the independent system capacity. For this development, it is necessary to develop a high-capacity inverter that can improve the stability of the independent system installed in the island area and supply high-quality power to the load. In addition, the EMS power generation control system for the independent grid photovoltaic power generation system is a parallel operation power control system of the diesel generator connected with the solar power generation system. It controls the output of the diesel generator according to the load ratio and the solar power generation. A stable supply system is needed. This independent grid photovoltaic generation system can increase the solar power supply to the independent system area and increase the power stability of the independent system and further reduce the use of fossil fuel due to the ineffective power control of the independent system. It is expected that the economy will be secured early.

**Key Words** : Independent Grid Photovoltaic Power Generation System, Diesel Generators, EMS

\*정회원, 광주대학교 전기전자공학부  
접수일자 2019년 7월 30일, 수정완료 2019년 9월 7일  
게재확정일자 2019년 10월 4일

Received: 30 July, 2019 / Revised: 7 September, 2019 /  
Accepted: 4 October, 2019

\*Corresponding Author: tronichkj@gwangju.ac.kr  
School of Electrical and Electronic Engineering,  
Gwangju University, Gwangju, Korea



그림 1. 독립계통 태양광발전시스템을 위한 고효율화 및 독립계통 안정화 기술 개념도  
 Fig. 1. Concept of high efficiency and independent system stabilization technology for PV grid system

### 1. 서론<sup>[1]</sup>

도서 지역과 같은 환경에서 기존 상용 독립계통 디젤 발전기에서 소모되는 화석연료를 저장하기 위해 독립계통 용량의 40% 이상을 부담하는 태양광발전시스템의 개발되고 있다. 기존 디젤발전시스템의 용량이 300kW를 발전하였다면, 제안 발전시스템의 부담을 디젤은 180kW(60%), 태양광은 120kW(40%), 에너지저장을 30kWh(10%) 등으로 구성할 수 있으며 이에 따른 그림 1은 독립계통 태양광발전시스템을 위한 고효율화 및 독립계통 안정화 기술 개념도를 나타내고 있다.

전력계통 망에서 태양광발전 전력이 일정 비율(통상 15~20% 정도)을 초과할 경우 날씨 변화에 따라 불규칙하게 변동하는 태양광발전 전력에 의해 전력계통망 전체가 불안정해지는 문제가 있으며 에너지저장장치는 이러한 문제를 해결하려는 방안으로써 태양광발전 전력의 변동에 따라 전력을 충전시키거나 방전시킴으로써 불안정한 전력계통 망을 안정화시킬 수 있다. 또한, 날씨 변화가 심할 경우 태양광발전 전력량 또한 자주 바뀌게 되고, 그에 따른 에너지저장장치의 충·방전 횟수도 상대적으로 증가하게 되지만 에너지저장용으로 사용되는 Lithium 계열 Battery의 경우 충·방전 횟수에 제한이 있으므로 일정 비율 이내(약 30% 이내)의 잦은 전력 변화에 대해서는 Super Capacitor를 이용하여 완충시킴으로써

Battery Bank의 수명을 연장시킬 수 있다.

### II. 태양광발전시스템 독립계통 안정화<sup>[2]</sup>

그림 2는 본 논문에서 제시한 독립계통 안정화기술 적용 고효율 태양광발전시스템 구성도로 크게 태양광발전용 DC/DC 컨버터, 에너지저장장치용 DC/DC 컨버터, Battery Bank 및 DC/DC 컨버터, Super Capacitor용 DC/DC 컨버터로 구분하여 영역별 다음과 같은 기술을 적용할 수 있다.

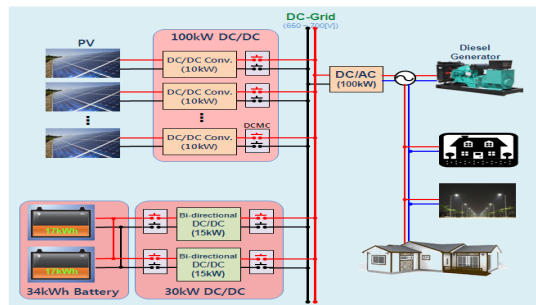


그림 2. 독립계통 안정화기술 적용 고효율 태양광발전시스템 구성도  
 Fig. 2. Independent system stabilization technology high efficiency PV system construction diagram

### 1. 태양광발전용 DC/DC 컨버터

태양광발전용 DC/DC 컨버터는 태양광 패널과 DC-Grid에 연계되어 일사량에 따라 태양광 패널에서 항상 최대 전력을 발전할 수 있도록 만드는 전력변환장치로 다양한 종류의 태양광 패널을 적용할 수 있는 넓은 입력 전압 범위를 지원해야 한다. 또한, 태양광 패널의 기생 커패시터로 인해 생긴 누설전류를 제거하는 DC/DC 컨버터를 개발함으로써 고효율 달성이 필요하다. 본 논문에서는 태양광발전시스템 독립계통 안정화와 관련하여 10kW 단위 모듈화 구성으로 태양광 패널의 발전용량에 따른 유연한 대응 기능을 할 수 있도록 적용한다.

### 2. 에너지저장장치용 DC/DC 컨버터

에너지저장장치용 DC/DC 컨버터는 Battery Bank와 DC-Grid에 연계되어 배터리의 충-방전 제어 및 태양광 발전량 변동, 부하변동에도 DC-Grid를 안정시킬 수 있는 전력변환장치로 고승압 비절연 DC/DC 컨버터를 개발함으로써 낮은 배터리 전압을 이용하여 BMS 가격 저감이 가능하도록 한다. 또한, 배터리 충전 및 방전 모드 전환 시 DC-Grid 전압 안정화를 위한 과도상태가 없는 모드전환 알고리즘을 적용한다.

### 3. Battery Bank 및 DC/DC 컨버터

Battery Bank 및 DC/DC 컨버터는 각각 15kWh 용량의 모듈 단위로 직병렬 교차구성을 통하여 유사시(한 모듈 장애 발생 시)에도 충-방전 기능이 지속할 수 있도록 한다.

### 4. Super Capacitor 용 DC/DC 컨버터

Super Capacitor 용 DC/DC 컨버터는 Super Cap. Bank와 DC-Grid에 연계되어 일정 비율 이내의 잦은 태양광 발전량 변동에 대하여 우선적으로 Super Cap.의 충-방전 제어를 통해 DC-Grid를 안정화할 수 있는 전력변환장치이다. DC/DC 컨버터는 15kW 용량의 모듈 단위로 구성하며, Super Capacitor Bank는 15kW 용량의 전력을 10sec 동안 충-방전할 수 있는 값으로 선정한다.

추후 실증운용을 통하여 태양광발전 전력량 변동에 따른 Diesel Generator의 부하 추종 소요시간을 측정하여 적절한 용량으로 변경하며(단위 모듈 가감으로 변경) Super Cap. 충전 및 방전모드 전환 시 DC-Grid 전압 안정화를 위한 과도상태가 없는 모드전환 알고리즘 적용한다.

## III. 태양광발전시스템 독립계통 안정화

### 요구사항 및 기술<sup>[2-4]</sup>

#### 1. 도서 지역에 설치된 독립계통의 안정성을 향상시키고 고품질의 전력을 부하에 공급해줄 수 있는 대용량 인버터 개발

- 부하들은 계통으로부터 신뢰성 높은 전압을 요구하며, 비선형적인 특성을 가지고 있으므로 계통의 높은 고조파 성분을 가지는 노이즈를 발생시켜 주변 제품들에 영향을 미치게 되는데, 이러한 것을 해결하고 고품질의 전력을 공급해줄 수 있는 DC/AC 인버터
- 계통 전압의 강하 또는 상승과 같은 변동의 발생에도 신뢰성 있는 전력을 공급할 수 있는 DC/AC 인버터와 계통 전원 외에도 자체적으로 분산전원을 가지고 있으므로 이를 이용하여 계통 전압에 문제가 생겼을 때, 모드전환을 통해 독립적으로 이전과 같은 전원공급이 가능
- 도서 지역에 설치되기 때문에 계통연계형 운전모드와 독립형 운전모드가 모두 동작이 가능하도록 하며, 고품질의 전력을 공급할 수 있는 시스템

#### 2. 국제적 수준의 방법론을 적용하여 신뢰도를 높이고 다양한 설비에 확장성과 보안이 강화된 독립계통 태양광 발전시스템 EMS

- 기존 도서 지역에 설치된 디젤 발전설비와 함께 신규 설치되는 태양광 발전시스템을 실시간으로 연동하여 가장 효율적인 발전뿐만 아니라 계통의 안전성을 확보할 수 있는 신뢰성 높은 독립계통 EMS 발전시스템
- 전 세계적으로 다양한 스마트그리드 장비에서 통신 표준으로 채택되고 있는 국제표준 에너지 프로토콜 SEP 2.0(Smart Energy Profile 2.0)을 탑재하여 상호운용성 및 확장성이 보장되어 시스템 확장 시 저 비용 투자 및 증설 시간의 단축이 가능함
- 보안기술 적용을 통한 End-To-End 암호화 및 내부 및 외부 공격으로부터 시스템을 보호 가능하며 SEP 2.0의 보안 스택과 연계하여 통신 구간 암호화로 시스템의 안전성 제고
- 에너지 발전 현황 및 설비 운전현황의 실시간 모니터링을 통한 설비 유지보수 초동대처가 가능하여 운영 효율화를 통한 발전시스템의 발전효율 제고

가 가능하며 운영자가 비상시에 신속한 대처는 물론 전체 발전시스템의 운전상황 이력 확인 및 추적이 가능함

3. 부하율과 태양광발전에 따른 디젤 발전기 출력을 제어하여 해당 부하에 전력을 안정적으로 공급하는 시스템

- 불규칙한 태양광 발전원 특성과 부하라인을 감시하여 병렬운전 발전기의 출력과 운전 발전기를 조절하여 태양광 발전전력을 계통에 투입 시킬 때 디젤 발전기의 발전전력 특성을 안정적으로 제어
- 부하의 무정전으로 투입함으로써 양질의 전력을 공급하며, 일정하지 않은 신재생 발전원과 부하수전 계통을 안정적이고 효과적으로 조절하여 발전기의 연료 절감과 계통상의 위험요소를 제거하는 역할

4. 통합형 저손실 PCS 일체형 배전반 개발

- 기존 독립계통형 태양광에 적용된 수배전반 시스템은 효율, 크기에 따른 경제적 손실 등을 고려하지 않았으나, 독립계통형 태양광 시스템에서 DC Grid 및 EMS, Battery, PCS를 종합적으로 고려하고 최적화된 배전반 설계 및 제작
- IEC 61439-1, IEC 61439-2 규격에 따른 배전설비 설계 및 제작
- DC Grid와 AC Grid를 연계하는 PCS, EMS 통합형 대한 Compact 화 설계 및 제작
- 변전, 배전에 따른 전기적, 열적 loss 배제, 설계된 수배전반 내부의 열적 유동해석을 통한 전기기구 수명 증대 및 사고 방지, Maxwell, Flux 등 정전, 정자, 유동 전자해석 프로그램을 통한 내부 절연 확보, 단선 지락 등 사고 등 미연에 방지

IV. 태양광발전시스템 독립계통 설계<sup>[4~6]</sup>

1. 독립계통형 100kW급 고효율 태양광발전용 PCS

그림 3은 독립계통형 100kW급 고효율 태양광발전용 PCS 회로 및 구성도로 다음과 같은 내용으로 연구 및 설계한다.

- NPC 3-Level IGBT Inverter 제품화 개발
- 단위 20kW×5EA 순환구조 병렬운전형 태양광발전

용 PCS 설계

- 전력변환효율 98%↑, THD 3%↓, IP65, 무변압기형
- NPC 3-Level IGBT 회로설계
- 고성능 AC 출력필터
- PCS 제어용 고성능 DSP Control B/D 및 B/D 설계
- 고성능 DSP Control B/D 개발
- 스위칭 소자 자가진단 및 보호 기능을 갖는 Gate-Drive B/D 설계
- DC-Ground-Fault 검출 제어기 설계
- PCS 고성능, 고신뢰성 제어알고리즘 연구
- MATLAB에 의한 제어기 모델링 및 설계
- 고성능 PLL, 유·무효 정력제의 알고리즘 최적화
- 순환구조 병렬운전 알고리즘 적용 및 최적화

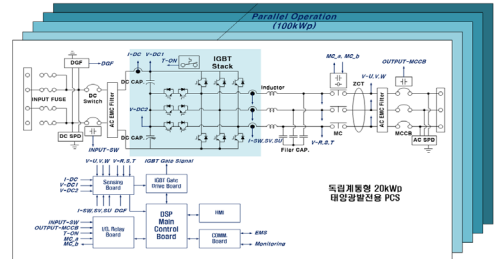


그림 3. 독립계통형 100kW급 고효율 태양광발전용 PCS 회로 및 구성도

Fig. 3. Independent system 100kW class high efficiency PCS circuit for Solar PV generation and construction

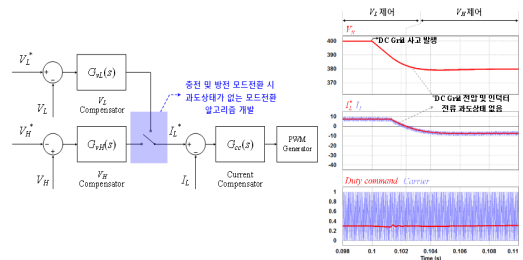


그림 4. 모드전환 블록 다이어그램 및 과도상태가 없는 DC-Grid 전압 및 인덕터 전류파형

Fig. 4. Mode switching block diagram and DC-Grid voltage and inductor current waveforms without transients

2. 태양광발전용 DC/DC 컨버터 유로 효율 개선 연구

- DC/DC 컨버터 Pulse skipping PWM 기법 연구
- Pulse skipping PWM 기법 비교·분석
- 시뮬레이션 및 3kW급 축소시작품 검증
- 100kW Pulse skipping PWM 기법 검증

### 3. 에너지저장장치용 DC/DC 컨버터 제어성능 개선

그림 4는 에너지저장장치용 DC/DC 컨버터 제어성능 개선을 위한 모드전환 블록 다이어그램 및 과도상태가 없을 때 DC-Grid 전압 및 인덕터 전류 파형으로 아래의 내용으로 연구 및 설계한다.

- DC-Grid 안정화를 위한 무순단 모드전환 알고리즘
  - . 무순단 모드전환 알고리즘
  - . 시뮬레이션 및 3kW급 축소시작품 검증
  - . 100kW 무순단 모드전환 알고리즘 검증

### 4. 독립계통 태양광발전시스템 EMS 실증 시스템 현장 구축 및 운영

그림 5는 독립계통형 태양광발전시스템 EMS 통신 구조도로 실증단지 EMS 설치 및 시험 운영과 최종 시스템 점검 영역별로 다음과 같이 연구를 한다.

- 실증단지 EMS 설치 및 시험 운영
  - . EMS 기능별 동작 테스트 방법론 및 시나리오 개발 및 테스트 수행
  - . 기능별 테스트 시나리오 개발
  - . 에너지기기 별 테스트 시나리오 개발
  - . 전체 통신 테스트 시나리오 개발
  - . 운영 시나리오별 테스트 시나리오 개발 및 테스트
  - . 오류 발견 및 안정화를 위한 수정 및 개발

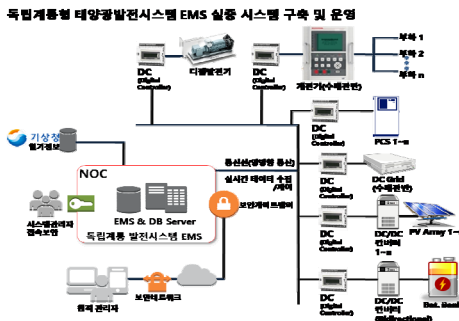


그림 5. 독립계통형 태양광발전시스템 EMS 통신 구조도  
 Fig. 5. Independent grid PV system EMS communication structure diagram

- 최종 시스템 점검
  - . 시스템 테스트 시나리오 작성
  - . 시스템 테스트 점검 리스트 작성
  - . 운영 시나리오별 테스트 점검 항목 리스트 작성
  - . 제어 시나리오별 테스트 점검 항목 리스트 작성
  - . 시스템 점검 수행
- EMS DB 구축(100kW 사이트)

- . DB 플랫폼 구축
- . 요구사항 분석 및 정의
- . 개념적 및 논리적 설계 및 구현
- . 사용자 view 설계 및 구현
- . 물리적 설계 및 구현
- . 에너지 데이터 연계 시험
- . 에너지 데이터의 저장 및 추출 시험
- . BDD(Behavior Driven Development)에서 권장하는 given, when, then 형식기반의 테스트 코드 작성 및 테스트 수행

### 5. 독립계통 발전시스템 EMS의 발전제어 시스템평가 및 실증

그림 6은 실무하에 따른 병렬 발전기 전력제어로 발전기 제어 시스템평가 및 태양광 배전 계통 연계기술 현장 실증, 부하율 반응 발전기 병렬제어 시스템 현장 평가 및 실증을 연구한다.

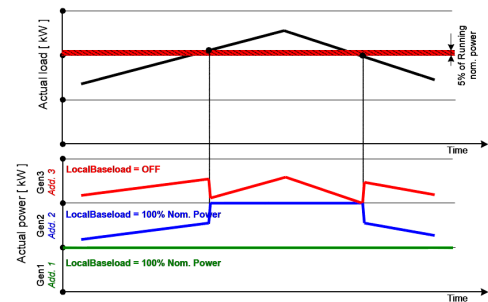


그림 6. 실무하에 따른 병렬 발전기 전력제어  
 Fig. 6. Parallel generator power control based on actual load

- 발전기 제어 시스템(발전제어 수단, 선로제어 수단) 평가 및 태양광 배전 계통 연계기술 현장 실증
  - . 발전 전력정보를 태양광 배전 계통에 일치시키기 위한 발전기 제어수단 현장 시스템평가 및 실증
  - . 태양광 배전 계통의 안정성을 고려한 발전전력 투입 기술 현장 평가 및 실증
  - . 태양광 배전 계통 무정전연계 기술 평가 및 실증
- 부하율 반응 발전기 병렬제어 시스템 현장 평가 및 실증
  - . 병렬운전 발전기 제어기술 현장 평가 및 실증
  - . 배전 계통 부하율 분석 기술 현장 평가 및 실증
  - . 배전 계통 부하율에 따른 발전기 기동 제어기술 현장 평가 및 실증

6. 태양광발전시스템 시설에 대한 시설지침(안) 개발

- 태양광발전시스템 기계 기구 선정, 배선, 접지, 계통연계, 전력품질, 단독운전, 안전표시 등 상세 시설지침
- 독립계통형 태양광발전시스템 계통 및 ESS 연계, DC grid 시설지침

비용적 시간적 절감효과 유발로 경쟁력 상승 기대  
- 다양한 에너지설비 및 기기와 연동이 용이하여 에너지 저감 모델의 개발이 가능

IV. 결 론

1) 독립계통 전력시스템 분야

- 독립계통형 태양광발전 시스템 개발
  - 도서 지역과 같은 독립계통 시스템 지역의 전력안정도를 해결할 수 있는 기술을 태양광 발전시스템과 접목되어 독립계통의 전력안정도를 높일 수 있으며, 태양광발전과 같은 신재생 에너지원의 추가적인 구성이 가능한 형태를 이룰 수 있음
  - 에너지 저장장치뿐만 아니라 다른 신재생 에너지원의 DC-Grid를 통한 연계제어 기술을 통해 산업 기술의 파급효과가 클 것으로 예상
- 독립계통형 태양광 PCS 개발
  - 독립계통에 DC-Grid 기반의 연계가 가능한 PCS의 개발 및 SEP2.0의 확장성으로 인해 스마트그리드 및 마이크로그리드의 연계가 가능한 기술 확보
  - 독립계통 전력의 다양한 수요에 대응할 수 있도록 EMS를 기반으로 한 유·무효 전력 제어 및 계통안정화 기술의 확보가 가능

2) EMS 분야

- 국내 EMS 기능 중 취약한 분석, 통계, 및 예측 엔진 기술개발
  - 외산 EMS와 경쟁하여 시장 진입이 쉬워짐은 물론 수출도 가능할 전망
  - 보안기술의 강화로 안전한 시스템 운영이 가능
  - 기존 에너지설비 EMS와 쉽게 Integration이 가능하여 에너지 이용자가 EMS 확대 구축 시 편의성 극대화
- 국제표준 프로토콜 기반의 미들웨어 개발
  - 국제표준 프로토콜 기반의 EMS 개발로 확장성 및 상호 호환성의 확보로 에너지 이용자의 설비 확장 등에

References

[1] I. H. Hwang, S. J. Seong, "Design and Operation Performance Analysis of Stand-alone Type Photovoltaic Generation System," Trans. KIEE. Vol. 45, No. 7, pp. 942~946, 1996.

[2] K. H. Kim, H. S. Kim, J. H. Park, "Maximum Power Point Tracking using Double Fuzzy Logic Controller for Grid-connected Photovoltaic System," Trans. KIEE. Vol. 60, No. 3, pp. 471~478, 2011.

[3] J. N. Weon, W. K. Chae, H. J. Lee, J. B. Sim, C. H. Shin, "An Economic Evaluation and Sensitivity Analysis of Remote MicroGrid According to Design Objectives," Trans. KIEE. Vol. 66, No. 6, pp. 892~897, 2017. DOI: <http://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.6.892>

[4] S. W. Hwang, W. K. Chae, H. J. Lee, S. Y. Yun, and J. H. Kim, "A Study on the Optimal Resource Configuration Considering Load Characteristics of Electric Vehicles in Micro Grid Environment", Trans. KIEE., Vol. 64, No. 2, pp. 228-231, 2015. DOI: [10.5370/KIEE.2015.64.2.228](http://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.2.228)

[5] K. H. Kim, "Internet Management System for an Intelligent Remote Control and Monitoring", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 10, No. 4, pp. 1-5, 2010. DOI:[http://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00153-5](http://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00153-5)

[6] Y. S. Hong, C. S. Kim, B. J. Yun, "A Management Method for Solar Photovoltaic Power Generation System Using Intelligence", The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication(JIIBC), Vol. 6, No. 2, pp. 35-41, 2006.

저 자 소 개

홍 경 진(정회원)



- 전남대학교 전기공학과(공학박사)
- 일본 국립과학기술청 물질연구소 외래연구원
- 현재 : 광주대학교 전기전자공학부 교수
- 주관심분야 : 신재생에너지

※ 이 연구는 2019년도 광주대학교 대학 연구비의 지원을 받아 수행되었음.