

PV와 슈퍼캐패시터 하이브리드에너지시스템 모델 및 제어·운영기술

(Modeling and Operation of Hybrid Energy System with Supercapacitor Bank and PV System)

조재훈(충북대학교)* · 홍원표*(한밭대학교)

(Jea·Hoon Cho, Won-Pyo Hong)

Abstract

Economic and environmental concerns over fossil fuels encourage the development of photovoltaic(PV) energy systems. Due to the intermittent nature of solar energy, energy storage is needed in a stand-alone PV system for the purpose of ensuring continuous power flow. Grid-connected PV system that supply power in a critical load demand require to curb power fluctuation. In this case, SCB is a effectiveness in controlling power variation due to intrinsic PV system. We propose the Matlab/Simulink dynamic model and power flow characteristics of a hybrid energy system with PV and SCB.

1. 서론

에너지 자원의 고갈 및 지구환경 문제를 동시에 해결할 수 있는 보다 적극적이며 유일한 해결방법은 청정 자연에너지를 이용하는 대체에너지 기술개발과 시범 적용 및 표준화를 통한 대량 보급화 방안이다. 모든 건물의 냉난방, 급탕, 조명 에너지로 소비되는 화석에너지를 거의 수입에 의존하고 있는 국내실정을 볼 때 태양에너지를 비롯한 청정 자연에너지의 건물 복합 응용기술의 연구개발은 국민경제향상과 대체에너지자원의 안정적 확보 및 지구환경 보전이라는 측면에서 시급한 문제라 하겠다.

80년대부터 꾸준히 진행되어온 자연에너지의 건물 적용 노력은 대표적 대체에너지원인 태양에너지를 이용한 냉·난방 온수급탕 시스템, 자연채광 시스템 등이 주를 이루어 왔으며, 90년대 후반부터는 태양광발전 시스템에 대한 관심 및 투자가 급속히 증가하고 있다.

태양광발전(PV; Photovoltaic)은 특별한 유지관리, 공해 및 재료의 부식 없이 간단하게 태양광을 이용하여 전기를 생산하는 기술로 다양한 응용분야가 있지만, 그 중에서도 특히 PV 모듈을 건축물의 외피 마감재료로 대체하는 건물일체형 태양광발전(BIPV, Building Integrated PV)에 대한 기술개발이 전 세계적으로 급속히 확산되고 있다. 건물의 외피를 구성하는 요소로 통합된 PV시스템은 전력생산이라는 본래의 기능에, 건물의 외피재료로서의 새로운 기능을 추가함으로써 PV 시스템의 설치에 드는 비용을 절감하는 이중 효과를 기대할 수 있다. 또한 기존의 독립형(stand alone) PV시스템과 같이 설치공간을 위한 별도의 부지확보가 필요 없기 때문에 더욱 경제성 측면에서 유리한 기술이다.

태양광 발전시스템은 태양빛이 공급되는 낮에만 발전할 수 있고 밤에는 발전할 수 없는 단점이 있어 시스템 구성이나 부하의 종류에 따라서 독립형, 계통연계형과

하이브리드 시스템으로 분류한다. 계통연계형은 단방향의 전력 조류만을 허용하던 기존의 배전 계통에 태양광 발전시스템이 추가됨으로써 배전계통의 보호, 및 운영관리, 품질 등에 다양한 영향을 미치게 된다. 또한 PV시스템이 풍력장치 또는 디젤 발전장치와 같은 다른 전원과 병렬운전하는 경우 이를 태양광 발전 복합시스템이라 한다. 계통연계형시스템의 경우 한국전력공사 전력계통이 에너지 저장소 기능을 수행한다. 우리나라의 PV시스템은 대부분 계통연계형이다. 유럽과 북미에서는 계통연계형 PV시스템이 더 확대될 것으로 보이며 개도국 중심으로 독립형 시스템 수가 크게 증가하고 있으며 태양광 홈시스템이라고 알려진 소형개별전원장치는 가정의 부하에 전력을 안정하게 제공할 수 있으며 3kW 범위를 갖는 자체 전원공급장치를 보유하는 마을도 점점 늘어나고 있다. 본 연구에서는 빌딩마이크로그리드에서 건물에 적용되는 BIPV시스템가 현재 광범위하게 설치되고 있어 빌딩에너지시스템 구성에 중요한 마이크로소스로 그 위치를 차지하고 있어 이를 빌딩마이크로그리드에 적용하기 위하여 태양광발전시스템의 Matlab/Simulink 모델을 개발하고 그 특성을 모의하였다. 이를 위하여 전력제어가 불가능한 PV시스템의 전력변동 보상을 위하여 하이브리드 에너지시스템을 구성하고 그 효과를 검증하였다[1,2].

2. PV시스템의 Matlab/Simulink모델링

2.1 PV시스템의 모델

태양으로부터 전력을 발생하는 태양전지 어레이(array)는 전압, 전류 및 용량을 얻기위하여 여러장의 태양전지 모듈(solar cell modules)을 직·병렬로 연결하여 이용한다. 직류부하만을 사용할 때는 여기에 축전지만 연결되지만 교류부하를 사용하는 경우는 반드시 직·교류변환장치, 인버터를 필요로 한다. 전력변환장치는 태

양광발전시스템의 특성을 결정하는 주요설비로 단순히 직류전기를 교류로 변환하는 기능 외에 태양광발전시스템 용도에 맞는 제어 성능 예를 들면 계통보호기능 및 연계기능 등을 갖추어야한다. 태양전지는 태양광발전시스템의 용량을 결정하는 중요한 요소이다. 여기에는 태양전지의 물리적구조와 태양전지 모델링을 위한 등가회로와 수학적 모델에 대하여 간략히 설명한다. 또한 시스템 구성에 있어 태양전지 어레이 산정법에 대하여 설명한다.

(1) 태양전지 모델

태양전지에 대한 간단한 수식모델은 식 (1.1)과 (1.2)로 각각 나타낼 수 있다. 이는 일반적으로 간략화된 one-diode 모델이다[2].

$$I_d = I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right] \quad (1.1)$$

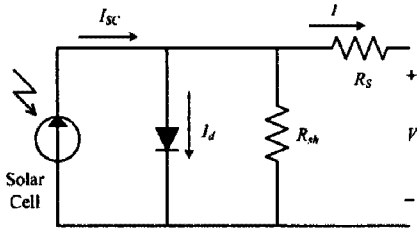


그림 1 태양전지 등가 회로

$$I = I_{ph} - I_s \left[e^{\frac{qV}{2kT}} - 1 \right] \quad (1.2)$$

여기서, I : 태양전지의 출력전류

V : 태양전지의 출력전압

I_{ph} : 발전 광전류(photo current)

I_s : 다이오드 포화 전류

이 특성은 온도 T와 기본전하 상수 $q(1.602e^{-19}[C])$ 그리고 볼츠만 상수 $k(1.38 e^{-23}[J/K])$ 의 영향을 받는다. 태양전지 I-V특성은 전형적인 다이오드와 유사한 특성을 가지고 있다. 주요한 차이점은 전류 오프셋을 나타내는 단락회로 전류 I_{sc} 를 이끌어내는 개방회로 전압 V_{oc} 가 존재하는 것이다.

태양전지 등가회로는 일반적인 등가회로와 상세등가회로로 크게 나눌 수 있으며 그림 일반적인 등가회로는 그림 1과 같으며 수리모형은 이 등가회로를 바탕으로 식(1.3)과 같이 나타낼 수 있다. 표 2은 사용된 데이터와 파라미터에 대하여 요약한 것으로 이 사양서로부터 직접 태양전지 모델에 필요한 모든 파라미터를 직접 얻을 수 없다. 따라서 구할 수 없는 파라미터는 식(1.6)-식(1.11)식을 사용하여 그 값을 유추하여 사용할 필요가 있다. 그림 2는 일사량과 표면온도에 따른 전형적인 I-V특성곡선을 나타낸 것이다. 일사량 증가시 태양전지의 출력전류가 증가하여 출력상승을 가져오고 온도감소시 전압이 증가하여 전압이 증가하여 출력상승을 가져오는 것을 알 수 있다.

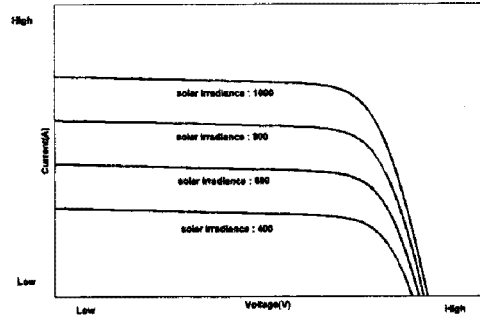


그림 2 일사량 표면온도에 따른 I-V 곡선

$$\begin{aligned} I &= I_{SC} - I_D - I_{SH} \\ &= I_{SC} - I_0 \left(\exp \left[\frac{V + IR_s}{nV_T} \right] - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{SH}} \end{aligned} \quad (1.3)$$

여기서, I_{SC} = 태양전지 단락전류 [A]

I_D = 다이오드전류[A]

I_{SH} = 병렬저항 전류 [A]

I_0 = 다이오드 포화전류 [A]

V = 부하전압 [V]

R_s = 직렬저항 [Ω]

R_{SH} = 병렬저항 [Ω]

n = 다이오드 이상 정수 (1-2)

V_T = 열전위차[V] 단, $V_T = (kT/q)m$

k = 볼츠만 상수 ($1.38 e^{-23}[J/K]$)

T = 절대온도[K]

q= 쿨롱상수($1.602e^{-19}[C]$)

m= 태양전지모델내의 직렬 셀(cell) 수

본 연구의 시뮬레이션을 위하여 사용한 PV 파라미터는 [1]에 자세히 수록하였다.

병렬저항 R_{SH} 는 대략 수백 Ω 에서 수 k Ω 이상의 상대적으로 아주 큰 값을 가지므로 병렬저항을 무시하여 해당선로를 개방상태로 간주할 수 있다. 본 연구에서 그림 17과 같이 병렬저항을 무시하고 새로이 구성한 등가 모델을 이용한다. 이 등가회로에서 다음과 같은 수리관계식을 얻을 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_0 \left(\exp \left[\frac{V + IR_s}{nV_T} \right] - 1 \right) \quad (1.4)$$

식 (1-4)을 V에 대하여 나타내면, 식 (1-5)와 같다

$$V = nV_T \ln \left(\frac{I_{sc} - I}{I_0} + 1 \right) - I \cdot R_s \quad (1.5)$$

식(1.4)의 세부 항목에 대한 관계식을 정리하면 다음과 같다. 식(1.6)은 단락전류조건을 나타낸 식이다. 다이오드 전류 I_D 는 적어서 무시되기 때문에 $I_{ph} = I_{sc}$ 의 조건

을 만족하게 된다. 식(1.6)은 광전류는 일사량에 직접 비례하는 것을 알 수 있다.

$$I_{ph} = I_{sc} = I_{sc0} \left(\frac{S}{S_{as}} \right) + J(T - T_s) \quad (1.6)$$

여기서, T_s = 기준(표준)온도(298[K])

I_{sc0} = 기준온도에서의 단락전류[A]

S = 일사량[W/m²]

J = 단락전류의 온도계수[A/K]

S_{as} = 표준 일사량, 1,000[W/m²]

개방회로 조건에서 개방회로 전압은

$$V_{oc} = V_{oc0} + \Delta V_{oc}(T - T_s)$$

$$I_0 = I_{sc} \frac{1}{\exp\left[\frac{V_{oc}}{nV_T}\right] - 1} \approx I_{sc} \cdot \exp\left[-\frac{V_{oc}}{nV_T}\right] \quad (1.7)$$

$$I_0 = AT\gamma e^{\left(-\frac{E_g}{nKT}\right)} \quad (1.8)$$

여기서, V_{oc} = 태양전지개방전압 [V]

V_{oc0} = 기준온도에서 개방전압[V]

ΔV_{oc} = 개방전압 온도계수

A = 포화전류 온도계수

T = 온도의존 인자 (일반적으로 3)

E_g = 밴드(band)에너지 갭[eV], 1 eV = 1.6 e⁻¹⁹ [J]

$$E_g = 1.16 - 7.02 \times 10^{-4} \frac{T^2}{T - 1108} [eV] \quad (1.9)$$

식(1.6)은 일사량과 온도에 대한 태양전지의 단락전류 관계식을 나타낸다. 식 (1.7)은 식(1.4)로부터 유도한 포화전류 관계식이며, 식(1.8)은 포화전류의 온도에 대한 관계식이다. 식(1.6)과 식(1.8)식을 식(1.4)식에 대입하여 개방회로 조건을 적용하면(그림 3의 I=0, V=V_{oc}) 다이오드포화전류는 T_s에서 식(1.10)과 같이 얻을 수 있다.

$$I_0 = I_{sc} \cdot \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{nV_T}\right) - 1 \right]^{-1} \quad (1.10)$$

식(1.8)의 온도계수 A는 식(1.10)을 식(1.8)에 대입하여 얻을 수 있으며 직렬저항 R_s는 식(1.4)의 V와 I를 모듈 데이터의 V_{mpp}와 I_{mpp}로 각각 치환하여 얻게 된다.

PV어레이는 여러 모듈을 직병렬로 구성하기 때문에 그림 3과 식(1.4)을 기초로 하여 직렬모듈 N_s개와 병렬 모듈 N_p개로 구성된 PV 어레이의 전류 I_A는 식(1.11)과 같이 표현될 수 있다.

$$I_A = N_p I_{sc} - N_p I_0 \left(\exp\left[\frac{V_A + I_A R_s}{n N_s V_T}\right] - 1 \right) \quad (1.11)$$

여기서, V_A는 PV어레이의 단자전압이다[3].

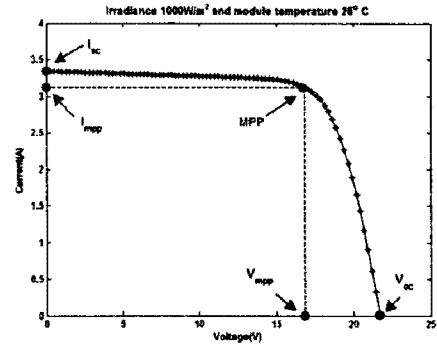


그림 3 PV 모듈의 V-I 특성(MPPT)

(2) MPPT 알고리즘[3]

이미 설치된 어레이로부터 높은 전력생산 효율을 얻을 수 있도록 동작시키는 것은 설비의 이용을 측면에서 바람직하다. 어레이 전압과 전류가 최대출력을 얻을 수 있는 지점에서 동작되도록 한다면 최대전력을 얻을 수 있다. 따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서 태양전지 어레이 출력을 항상 최대전력점에서 동작하도록 하는 제어가 필요하다. MPPT(Maximum Power Point Tracking)는 태양전지 어레이에 연결된 부하를 제어하여 임피던스 매칭(Impedance Matching)을 최적화함으로써 최대출력점 동작이 가능하게 되며 그 제어기법으로는 정전압제어법, 비선형 함수 계산법, Perturbation & Observation 법, Incremental Conductance 법 등이다.

MPPT 알고리즘은 일사량과 표면온도의 변화에 따라 가변하는 태양전지의 최대 출력점을 추정하여 전압 지령치로 출력하는 동작을 한다. 본 연구에서는 MPPT 제어를 위하여 P&O법을 적용하였다.

(3)PV의 전력제어

PV인버터는 모든 센서로부터 오는 데이터로부터 계산과 측정, DC로부터 AC로의 전력변환제어, PV어레이의 전력조정 및 전력네트워크로부터의 보호 등을 제어 모니터링한다. 그림 4는 계통연계형 PV의 제어 블럭도이다. 전력제어기는 전류제어기의 입력이되는 기준전류 I_q^{*}와 I_d^{*}를 PI제어기를 통하여 도출하며 PV시스템의 무효전력과 유효전력을 제어한다. 내부제어기인 전류제어기는 전류제어기는 PWM 발생기의 입력이되는 V_q^{*}와 V_d^{*}를 PI제어기를 통하여 생성시킨다. PWM 발생기는 S₁-S₆게이트 신호를 발생하도록 한다. 보호제어기는 그리드의 고장조건과 MC스위치의 차단과 닫힘조건 등을 결정하기 위하여 인버터의 단자전류 값인 I_{mag}와 그리드측 전압 E_{mag}크기 및 계통주파수 모니터링한다.

여기서는 d축과 q축의 각각의 인버터전류, 전압의 크기, 계통주파수, 및 무효전력을 각각 계산하기위하여 인버터 전류(I_a, I_b, I_c), 3상 인버터 전압(V_a, V_b, V_c), 및 3상 계통측 전압(E_a, E_b, E_c)를 감지한다. 이 블럭에서

는 PV어레이의 MPPT을 위하여 PV전류 (I_{pv}) 그리고 DC링크전압(V_{dc})을 모니터링한다. PLL은 계통측 전압 E_a 와 위상을 동기화시키기위한 신호를 발생시킨다. 이는 abc에서 dq변환을 위한 기준 위상각 θ 도 계산한다. PLL은 역시 인버터 출력의 주파수도 공급한다.

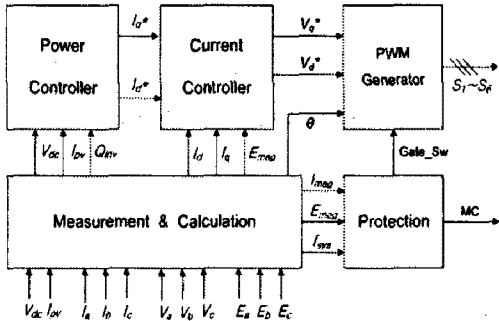


그림 4 계통연계형 PV의 제어 블럭도

(2) 출력성능 특성 모의

본 연구에서는 9[kW]급 계통 연계형 태양광발전 시스템의 출력성능 특성을 모의하고 그 결과를 검토하였다. 모의 대상 L사의 GMG 01530 모듈이며, 그 기본적인 규격은 표 1과 같다. 9[kW]의 태양전지 어레이는 총 180개의 모듈 (20직렬×9병렬)로 구성된다.

표 1 모의대상 태양전지 모듈 규격

모델명	GMG 01530
개방전압	21.7 [V]
단락전류	3.35 [A]
최대출력점 전압	17.4 [V]
최대출력점 전류	3.05 [A]
최대출력	53 Wp
시험조건	1000 W/m ² , 25°C, AM 1.5

태양전지 어레이 모델을 이용하여 다음의 일사량 및 온도 조건 하에서의 V-I 특성 및 V-P 특성을 모의하였다. 그림 5는 온도 25°C에서 일사량 변화 (S= 400, 600, 800, 1000 [W/m²])에 대한 V-I 곡선이다. 여기서 사용한 모듈 특성결과는 [4,5]에 자세히 기술하였다.

9[kW] 계통연계형 PV 시스템이 역률 1로 운전되고 있다고 가정한다. 온도 25[°C]일 때, 일사량 세기의 변동에 대한 PV 시스템의 각 구성요소별 출력성능을 모의하였다.

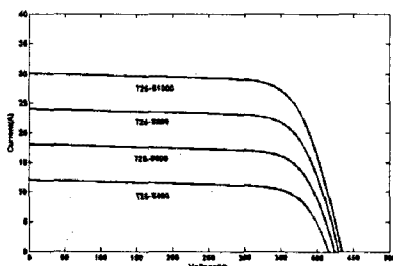
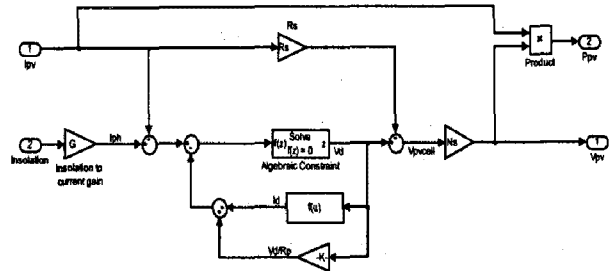
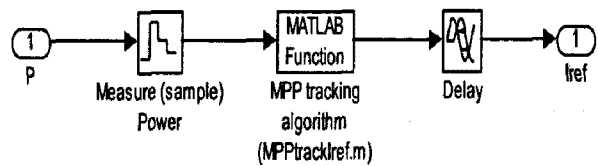


그림 5 일사량변화에 대한 V-I 특성

3. Matlab/simulink 모델 및 시뮬레이션 Block



(a) PV-Module 상세 블럭



(b)MPPT block

그림 6. PV-module 시뮬레이션 block

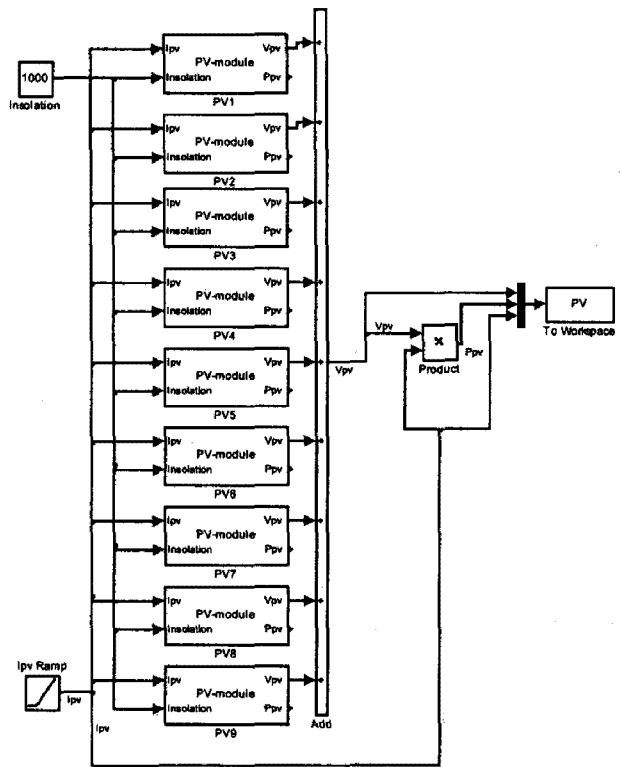


그림 7. PV-Module series 연결 block

4. Matlab/simulink 시뮬레이션 결과

4.1 PV시스템 모의

이의 모의를 위한 조건 및 하이브리드에너지시스템 구성은 [4, 5]에 자세히 기술하였다. 따라서 본 논문에서는 PV와 관련된 부분만을 나타낸 것이다. 그림 8은 어느

대전지역의 7시부터 21까지의 PV출력곡선을 모의한 것이다. 출력곡선은 일사량에 따라 15kW까지 변화하는 것을 알 수 있다. 따라서 전력변동을 보상하기 위하여속용성이 요구되지 않는 부하는 MTG시스템으로 전력변동을 억제할 수 있으나 속용성이 요구되는 부하는 SCB로 보상하면 매우 효과적인 방안을 확인하였다.

4.2 PV-MTG-UCB 하이브리드시스템 모의 (SCB를 사용하는 경우)

기준 전력을 29kW로 설정하고 SCB를 PMS에서 투입하는 경우의 일정 전력제어를 모의하였다. PV전력은 일사량의 변화에 의하여 최고 17kW에서 약 2kW까지 변화하는 것을 알 수 있다. 이때 기준전력 28kW을 일정하게 유지하기 위하여 비교적 긴 시간에 걸쳐 13kW에서 26kW에서 유효전력을 발생시켜 PV의 전력변화를 잘 보상하고 있으며 SCB는 하이브리드 전력의 일정전력제어를 위하여 짧은 시간 영역에서 동작하고 있음을 알 수 있다. 여기서 사용한 SCB의 용량은 약 23kW(400V)였다.

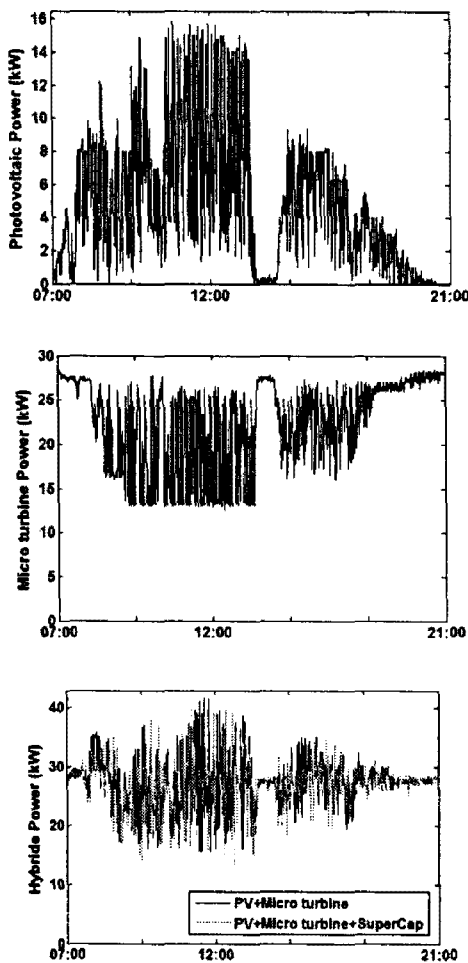


그림 8 PV/MTG/SCB 하이브리드 시스템 전력 모의 패턴

5. 결론

본 연구에서는 빌딩의 마이크로그리드로 PV시스템을 주 전원으로 하는 경우 슈퍼캐패시터의 AC 버스에 연계하여 매우 효과적인 전력변동 보상을 확인하였으며 연구결과는 아래와 같이 요약할 수 있다.

- (1) PV시스템의 Matlab/Simulink 모델을 개발하고 그 특성을 분석하였다. 모의 결과 비교적 짧은 시간에 부하에 응답하기 위해서는 슈퍼캐패시터가 하이브리드 에너지시스템에서 전력의 변동을 효과적으로 억제함으로써 PV시스템의 빌딩마이크로그리드에서의 주전원 역할에 매우 효과적인 방안이 될 수 있음을 확인하였다.
- (2) PV 시스템의 계통연계 및 독립운전 전력제어 모델을 개발하였다.

Acknowledgment

The authors would like to gratefully acknowledge the financial support of KESRI (Korea Electrical Engineering & Science Research Institute) under project R-2007-1-015-02

참고 문헌

- [1] 홍원표, "Multi-agent 기반 분산에너지시스템 기초운영연구 (2차년도)," 2009년 지경부 보고서(기초연), 2009.6.
- [2] 정병환, "태양광 풍력 디젤 복합발전을 위한 전력균형제어에 관한 연구," 석사학위논문(건국대), 2003. 2.
- [3] 한국전기연구원, "계통연계형 분산전원 통합제어시스템 개발," 산업자원부 중간보고서(R-2004-0-052-0-00), 2005. 1.
- [3] Seul-Ki Kim, "Modeling and simulation of a grid-connected PV generation system for electromagnetic transient analysis," Solar Energy(2008), doi:10.1016/j.solener.2008.10.020.
- [4] 홍원표, "빌딩마이크로그리드시스템용 하이브리드에너지시스템 전력제어 및 운영," KIIEE 2009 추계학술대회, 2009. 10.9(to be published).
- [5] 홍원표, "하이브리드에너지시스템용 슈퍼캐패시터 Matlab/Simulink 모델개발," KIIEE 2009 추계학술대회, 2009. 10.9(to be published).
- [6] H.S. Rauschenbach, "Solar Cell Array Design Handbook", Van Nostrand-Reinhold, NY, 1980.
- [7] W. Xiao, W.G. Dunford, A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells", IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Allemagne, 2004.
- [8] P. Li, Ph. Degobert, B. François, B. Robyns, Power Control Strategy of a Photovoltaic Power Plant for Microgrid applications, ISES Solar World Congress 2007(SWC 2007), Beijing, China, September 2007.
- [9] M. Ciobotaru, "PV inverter simulation using MATLAB/Simulink graphical environment and PLECSBlockset," IEEEExplore, 1-4244-0136-4/06/2006 IEEE.