

하이브리드에너지시스템용 슈퍼캐패시터 Matlab/Simulink 모델개발

(Modeling and Analysis of Supercapacitor Bank System for Hybrid Energy System)

조 제 훈(충북대학교) * · 홍 원 표*(한밭대학교)

(Jea · Hoon Cho, Won-Pyo Hong)

Abstract

In this paper, we propose to research the dynamic Matlab/Simulink model of supercapacitor bank(SCB) for a microgrid application. We demonstrated that this model is sufficient to design the control system of entire power storage system, SCB, the chopper and grid connected converter. The proposed dynamic model is simulated with the help of Matlab/Simulink™ in the MTG/PC/SCB hybrid energy system. The study results show that SCB have a good performance to curb power fluctuation in building microgrid application.

1. 서 론

슈퍼캐패시터는 재래식 캐패시터보다 정전용량(capacitance)이 300 배 이상 커배터리를 대체하거나 보완할 수 있는 에너지장치(energy device)로 사용된다.

슈퍼캐패시터는 사용되는 전해질에 따라 수용성과 비수용성(유기성)으로 구분되며, 수용성전해질의 경우 출력특성은 높지만 셀당1V 정도의 작동전압을 나타내므로 에너지밀도특성은 낮다. 유기성 EDLC의 경우 저항특성은 다소 불리하지만 약 2.3 ~ 3V의 작동전압을 가지므로 에너지밀도특성은 우수하다. 신형2차전지에 대응하거나 전력변환용이나 HEV용에는 300V정도의 고전압이 요구되므로, 직렬연결시보다 유리한 유기전해질을 사용한 슈퍼캐패시터의 연구개발이 활발하다. 유기전해질시스템에 있어서는 활성탄소복합전극의 제조기술도입에 따라서 ESR(Equivalent Series Resistance)이 현저하게 감소된 슈퍼캐패시터가 개발되어 출력특성을 향상시킨 중대형제품 개발에 관심이 집중되고 있다. 따라서 울트라캐패시터의 기술은 전력 및 에너지산업의 세계에서 고유의 틈새시장(niche market)을 차지하며, 배터리의 대체 및 보완시장 그리고 슈퍼캐패시터 만이 가능한 유망신규시장의 창출이 기대된다고 할 수 있다. 슈퍼캐패시터는 저장할 수 있는 에너지는 배터리보다 작지만 아주 짧은 시간동안의 순시 첨두 전력(instantaneous peak power)을 공급할 수 있는 능력은 배터리의 10 배에서 100 배 이상이다. 따라서 수초, 수시간 또는 수일간 에너지를 저장하고 있다가 큰 전력이 필요할 경우 에너지를 공급할 수 있다. 슈퍼캐패시터를 배터리와 조합해 사용하면 피크 출력(peak power)을 전기이중층캐패시터가 담당함으로써 배터리에 부과되는 과도한 스트레스 즉, 중부하 방전을 완화시켜 에너지저장시스템의 출력특성 향상 및 배터리의 수명을 연장할 수 있다. 최근에는 2차전지에 비하여 충·방전속도와 사이클수명이 우수해, 2차전지의 병용 및 대체가능한 에너지저장장치로 각광받고 있다. 슈퍼캐패시터는 SOC가 전압에 직접적으로 비례하는 전기에너지저장장치로서 효율이

95%이상으로 차세대 고신뢰성 에너지저장장치의 주요기술이다. 또한, 고출력 펄스파워능력을 가지고, 소형경량의고출력전기·화학적 에너지저장장치로써, 피크파워부하평준화용으로의 응용이 기대되며, 군사 용, 우주·항공용및 의료용 등의 고부가장비의 대출력 펄스파워전원으로 사용될 것으로 예상된다.

슈퍼캐패시터는 자체 특성상 출력과 에너지 관리의 세계에서 독특한 위치를 점하고 있어 향후 재래식 캐패시터와 배터리의 가교역할로서 중요한 핵심부품이 될 것이다. 에너지를 이용하는 모든 분야에서 슈퍼캐패시터는 높은 파워밀도 및 충방전 효율의 특성으로 순시 피크파워공급 및 전원부하조절용으로 사용될 수 있어 에너지이용효율의 향상과 함께 전원시스템의 능력을 최적화시켜 주는 매우 중요한 장치이다.

따라서 본 연구에서는 충방전 속용성이 높아 하이브리드에너지시스템의 전력변동 조절용으로 사용가능성을 검증하기위하여 모델링하고 분석하였다. 이는 빌딩을 중심으로 마이크로터빈시스템과 BIPV발전시스템이 가까운 장래에 빌딩의 중요한 마이크로소스로 운전될 것으로 예상됨에 따라서 이 하이브리드시스템의 안정적인 일정 전력공급원을 확보하기 위한 방안으로 슈퍼캐패시터를 AC 버스에 설치하여 하이브리드 에너지 시스템의 운전 특성을 분석하였다. 따라서 본 논문은 슈퍼캐패시터의 Matlab/Simulink 모델을 개발하고 그 특성을 분석하는데 주안점을 두었다. 현재 중간 연구결과로 슈퍼캐패시터 상세모델 개발결과에 대한 것이다[1-3].

2. 슈퍼캐패시터의 Matlab/Simulink모델링

2.1 슈퍼캐패시터(Supercapacitor)의 모델

슈퍼캐패시터는 전기자동차산업 등에서 매우 활발하게 연구되고 있으며 속용성이 우수하고 수명이 배터리

의 수백 배에 달해 DG시스템 운전에 있어서 매우 중요한 장치로 역할을 담당하게 될 것이다. 특히 빌딩의 정교하고 중요한 부하 병원 및 복합건물에서는 일정전압 유지와 고속 파워제어를 요구하기 때문에 하이브리드 시스템구성에 있어서 필수 불가결하다. 본 연구에서는 건물을 중심으로 도입될 마이크로터빈과 PV시스템에 일정전력을 유지하기 위한 장치로 슈퍼캐패시터를 Matlab/Simulink 모델을 시뮬레이션을 통하여 그 특성과 성능을 분석하기 위한 중간 연구결과이다. 여기서 사용한 모델은 Maxwell technologies사[2]의 Supercapacitor Bank을 기준으로 하였다.

(1) SCB Multi-level 모델링

The 144F/48V ELDC는 에너지를 161kJ(44.8WHr)저장 능력을 가지고 있다. 이는 18개의 슈퍼캐패시터셀과 부스바 및 통합 밸런싱회로를 가지고 있다. 2개의 모듈이 직렬로 연결하여 하이브리드시스템에 특성해석에 원하는 전압과 에너지저장용량을 얻었다. 표 1은 모듈특성을 나타낸 것이다. SCB는 그림 1와 같이 슈퍼캐패시터(SC), SC필터, 초파, DC버스, 인버터 및 계통연계 (grid)필터로 구성되었다.

표 1 슈퍼캐패시터 사양

Parameters	Value
Capacitance(C_0)	144F + 20% initial
Voltage	48.6 Volts DC Max.
DC Resistance (R_s)	11m Ω Max., initial
Capacitor Cycle	1,000,000
Operating temperature range	-40 $^{\circ}$ C to +65 $^{\circ}$ C

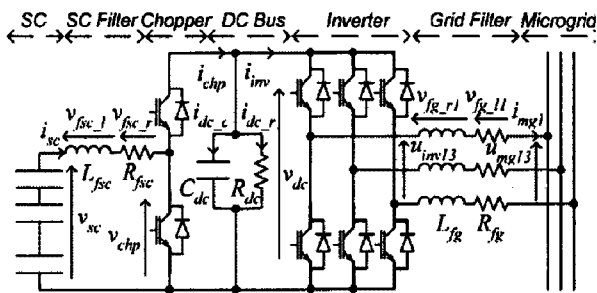


그림 1 SCB 그리드 연계 시스템 구성도

1) UC의 모델링

UC는 전압원으로 모델링한다. 전력계통적용을 위하여 Bonert[2]이 연구한 모델을 사용하였다. 연구의 간략화를 위하여 직렬저항 R_s 와 캐패시터 정전용량 C_0 만 사용하여 모델링하였다. 관계식은 식(1)-(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dv_c}{dt} = \frac{1}{C_0} i_{sc} \quad (1)$$

$$v_R = R_s i_{sc} \quad (2)$$

$$v_{sc} = v_c + v_R \quad (3)$$

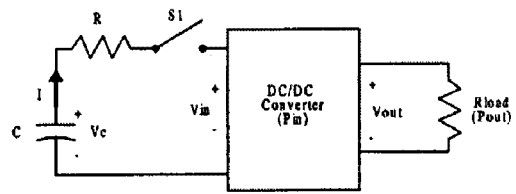


그림 3. 일정전력부하에 연결된 UC 회로

모든 손실은 बैं크의 각 캐패시터의 ESR에 의한 열로 기인한다. 이 해석을 위해 회로는 저항이 직렬로만 연결되어 있는 이상적인 캐패시터라고 한다. 저항 값은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = n_s \cdot ESR / n_p \quad (4)$$

여기서, $R[\Omega]$ 은 캐패시터뱅크의 전체저항, n_s 는 캐패시터뱅크의 직렬로 연결된 캐패시터 수, n_p 는 병렬로 연결된 캐패시터수이다. 이 बैं크의 정전용량[C]은 식(5)로 표시된다. 그림 4는 UC뱅크의 캐패시터 배열을 나타낸 것이다.

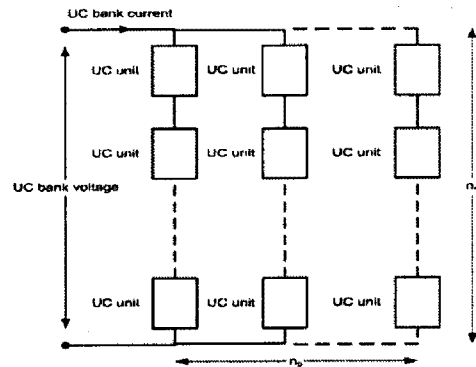


그림 4 UC bank에서 캐패시터의 배열

$$C = n_p \cdot C_{rated} / n_s \quad (5)$$

여기서 C는 UC뱅크의 전체 정전용량이고, C_{rated} 는 각 캐패시터의 정전용량이다. 분석을 위한 회로는 그림 3과 4와 같이 나타냈다.

2) 필터모델링

UC필터는 인덕턴스 L_{fsc} 와 저항 R_{fsc} 가 직렬로 연결한 것으로 모델링하였다. 관련식은 식 (6)-(8)으로 나타내었다.

$$\frac{di_{sc}}{dt} = \frac{1}{L_{fsc}} v_{fsc-l} \quad (6)$$

$$v_{fsc-l} = v_{sc} - v_{chp} - v_{fsc-r} \quad (7)$$

$$v_{fsc-r} = R_{fsc} i_{sc} \quad (8)$$

3) chopper 모델링

초파는 UC의 낮은 DC전압을 DC버스에 요구되는 전압으로 증가시키기 위하여 사용하며 등가모델은 [3]의 것을 사용하였으며 평균변조함수(mean value modulation function) m_{chp} 를 이용하여 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{chp} &= m_{chp} v_{dc} \\ i_{chp} &= m_{chp} i_{sc} \end{aligned} \quad (9)$$

4) DC버스의 모델링

DC버스는 캐패시터 C_{dc} 와 저항 R_{dc} 가 병렬로 연결하여 모델을 구성하였으며 식(10)-(12)과 같이 모델식을 나타내었다.

$$\frac{dv_{dc}}{dt} = C_{dc} i_{dc.c} \quad (10)$$

$$i_{dc.c} = i_{chp} - i_{inv} - i_{dc.r} \quad (11)$$

$$i_{dc.r} = \frac{1}{R_{dc}} v_{dc} \quad (12)$$

5) 인버터모델링

인버터는 Matlab/Simulink PowerSim Library에서 제공하는 PWM인버터를 이용하였으며 이는 MTG 그리드 측 인버터와 같은 모델을 사용하였다. 제어모델은 P-Q 전력제어와 내부제어루프로는 전류제어루프를 사용하였다. 여기서 사용하는 인버터는 양방향 전류제어모두가 가능하도록 구성하였다.

6) 그리드 필터모델링

선로전류 i_{mg} 는 인버터 전압 u_{mg} 과 그리드 전압

$u_{mg} = [u_{mg13}, u_{mg23}]^T$ 로부터 유도된다.

$$\frac{d}{dt} i_{mg} = \frac{1}{L_{fg-l}} \quad (14)$$

$$v_{fg-l} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 \\ -1 & 2 \end{bmatrix} (u_{inv} - u_{mg}) - v_{fg-r} \quad (15)$$

$$v_{fg-r} = R_{fg} i_{mg} \quad (16)$$

여기서, L_{fg} 와 R_{fg} 는 필터의 인덕턴스 및 저항이다. $v_{fg-l} = [v_{fg-l1}, v_{fg-l2}]^T$ 그리고 $v_{fg-r} = [v_{fg-r1}, v_{fg-r2}]^T$ 는 L_{fg} 와 R_{fg} 에 각각 걸리는 전압이다.

7) 마이크로그리드 모델링

그리드 전압 u_{mg} 는 식(17)과 같은 모델식을 사용하였다.

$$u_{mg} = \begin{bmatrix} u_{mg13} \\ u_{mg23} \end{bmatrix} = \sqrt{2} A \begin{bmatrix} \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{6} + \theta_0) \\ \sin(2\pi ft - \frac{\pi}{2} + \theta_0) \end{bmatrix} \quad (17)$$

여기서 A는 상전압 rms값, f는 그리드주파수, θ_0 는 그리드전압의 초기위상각이다.

(2) 제어시스템의 설계

시스템을 제어하기 위하여 3개의 제어 입력을 가지고 있다. 인버터는 스위칭에 사용하기 위하여 2개의 독립 모듈레이션 함수 m_{inv1} 과 m_{inv2} 을 가지고 있으며 초파는 하나의 모듈레이션 함수 m_{chp} 를 가지고 있다. 제어의 목적은 마이크로그리드의 전력 변화를 최대한 줄이는 데 목적이 있다. 인버터는 접속점에서 유효전력과 무효전력을 제어하는 데 사용한다. 초파의 제어입력은 DC 버스전압을 제어하는 것이며 이는 시스템이 잘 운전되기 위하여 DC버스전압이 일정하게 유지되어야한다.

(3) 저장레벨의 제어

SC의 단자전압은 에너지저장 레벨을 나타낸다. 안전을 위하여 SC전압은 최대 허용된 값과 효율적인 측면에서 이 값의 50%사이에 있어야한다. SC의 단자전압을 제한하기 위하여 추가적인 제어기능이 있어야한다. 본 연구에서는 SC의 전압이 55V아래 있으면 유효한 에너지 발생은 직선적으로 줄어들고, 48V(최대허용전압의 50%)아래 있으면 SCB는 발전모드로 작동하지 않는다. 최대 전압의 제한 모드도 역시 최소전압의 제한모드 같이 그림 6에 나타내었다.

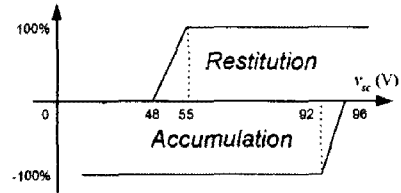


그림 6 SC저장 레벨의 에너지 제한범위

(4) 마이크로그리드 유효전력 관리

MTG와 PV시스템의 제어 및 모델링은 [4][5]에서와 같이 설계했다. MTG시스템은 양방향전력흐름이 가능하도록 구성하였으며, PV 시스템은 DC/DC 컨버터 및 인버터시스템을 근간으로 구성하였다. UCB제어는 PV시스템과 유사하나 전력의 양방향 제어 가능한 DC/DC 컨버터 및 인버터제어시스템을 구성하였다. 발전모드에 있어서 마이크로그리드에 있어서 전력흐름의 모델링은 그림 7과 같이 나타냈다.

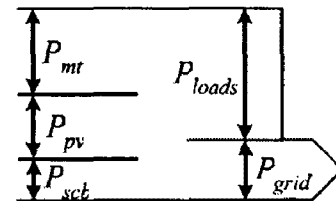


그림 7 마이크로그리드의 발전모드에서의 전력흐름도. 그리드 전력 P_{grid} 와 전력 교환을 하는 마이크로그리드의 유효전력은 MTG시스템 P_{mt} , PV발전시스템 P_{pv}

UCB P_{scb} 그리고 부하 P_{load} 이다.

$$P_{grid}(t) = P_{mt}(t) + P_{pv}(t) + P_{scb}(t) - P_{load}(t) \quad (18)$$

MTG는 비교적 좋지 않은 동적특성 때문에 장시간에 전력을 관리하는 데 사용된다. 장시간의 평균전력 $[P]_T$

$$= \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt$$

오랜시간동안에 SCB P_{scb} 와 교환되는 빠른 전력변화는 무시될 수 있다. 식 (18)은 장시간 범위에서 식 (19)와 같이 표시할 수 있다.

$$[P_{grid}]_T = [P_{mt} + P_{pv} - P_{load}]_T \quad (19)$$

계통에 의하여 주어진 어떤 마이크로그리드 기준전력에 대하여, 마이크로터빈 기준전력 P_{mt} 는 식 (19)에서 식 (20)로 주어진다.

$$[P_{mt}]_T = [P_{grid_ref} - P_{pv} + P_{load}]_T \quad (20)$$

짧은 기간에는 SCB가 빠른 응답시간을 가지고 있기 때문에 전력제어에 중요한 역할을 담당한다. SCB의 기준전력은 식(20)과 같이 나타낸다.

$$P_{scb_ref}(t) = P_{grid_ref}(t) - P_{pv}(t) + P_{load}(t)$$

는 마이크로그리드 PMS 센타 제어기는 SCB의 저장레벨을 제어하고 모니터링한다. 만약 레벨이 상한치에 도달하면 MTG에서 발생하는 전력은 감소시켜야하고 다음 전력을 SC로부터 더 방출시켜야한다. 따라서 저장에너지 줄일 수 있다.

$$e_{sc_ref}(t) = \int \Delta P_{mt}(t) dt$$

$$\Delta P_{mt_ref}(t) = k_{pe}(e_{sc_ref}(t) - e_{sc}(t))$$

$$P_{mt_ref}(t) = P_{grid_ref}(t) - P_{pv}(t) + P_{load}(t) + \Delta P_{mt_ref}(t)$$

여기서 제안한 제어의 핵심적인 사항은 PMS 관리센터에서 주관하게 된다.

(5) 슈퍼캐패시터 Matlab/simulink 모델

아래의 그림 8은 시뮬레이션을 위하여 Matlab/Simulink를 이용하여 설계된 슈퍼캐패시터의 블록이다. 그림에서 직렬로 연결된 R1은 슈퍼캐패시터가 충전과 방전을 하는 동안 손실을 나타내며, R3는 과전압 보호 저항이다. Rp와 Cp는 슈퍼캐패시터의 빠른 응답 속도를 위하여 모델링 되었다.

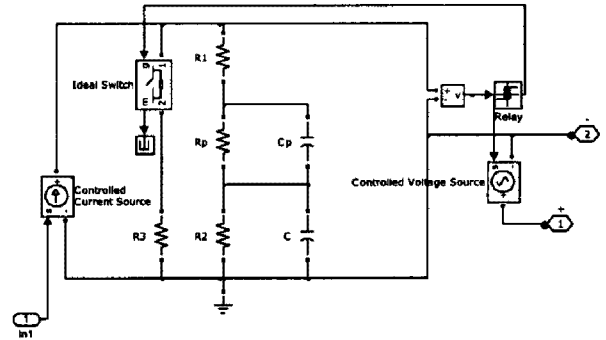


그림 8 슈퍼캐패시터 Matlab 모델

본 연구에서 사용한 양방향 DC-DC 컨버터는 배터리 충전시 S1 스위치를 온오프 시켜 동작하며, 배터리 방전시 스위치 S2를 온오프하여 동작한다. 스위치의 전류 방향성은 버스전압의 변동에 따라 달라진다. 컨버터에서 충전기(Buck) 스위치가 enable되면 방전기(Boost)스위치는 disable 된다. 만약 충전 스위치가 enable되면 인덕터는 전류레벨과 방향에 관계없이 연속도통모드이다. 그림 9는 Matlab/ Simulink을 이용한 양방향 DC-DC컨버터 블록이다.

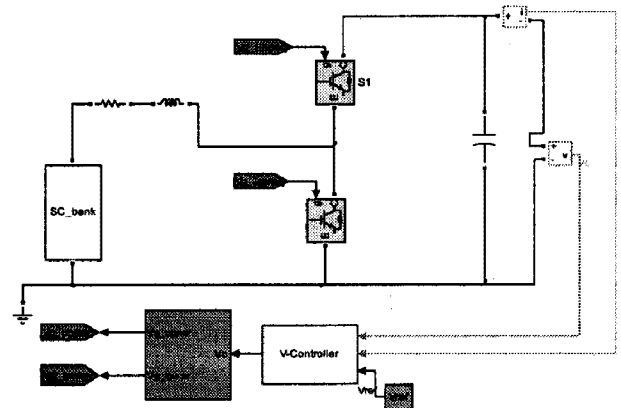


그림 9 buck-boost DC-DC컨버터

3. 시뮬레이션 및 슈퍼캐패시터의 전력 제어효과 분석

3.1 시스템구성 및 SCB 특성분석 모의

SCB의 전력변동억제 능력을 MTG/PV하이브리드시스템 전력제어특성에 대하여 연구했으며 다음은 MTG/PV/SCB하이브리드 시스템을 구성하여 SCB가 하이브리드의 전력변동에 안정하게 응동하는지를 고찰하였다. 시뮬레이션을 위한 부하변화는 그림 15kW에서 20kW로 변하는 것을 상정하였다. [6]에서 제시한 하이브리드에너지시스템으로 우선 슈퍼캐패시터의 자체특성을 모의한 결과이다. 그림11은 슈퍼캐패시터의 전력패턴이며 그림 12는 슈퍼캐패시터의 단자전압이다. 또한 그림 10의 하이브리드시스템의 슈퍼캐패시터의 도입효과를 검증하기 위하여 통합 시뮬레이션 결과는 그림 14에 표시하였다.

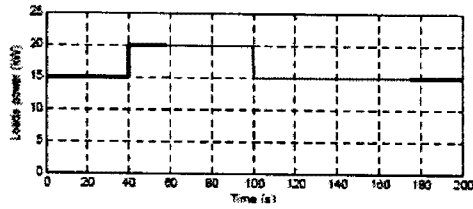


그림 11 마이크로그리드의 부하 변화

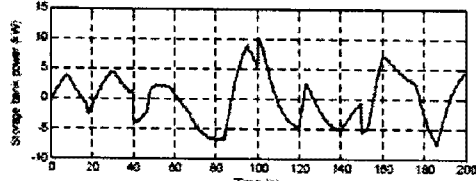


그림 12 슈퍼캐패시터 전력 변화

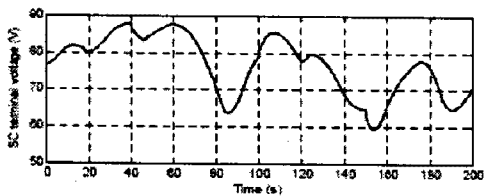


그림 13 슈퍼캐패시터의 단자전압

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

기준 전력을 29kW로 설정하고 SCB를 PMS에서 투입하는 경우의 일정 전력제어를 모의한 결과를 그림 14에 나타내었다. 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.

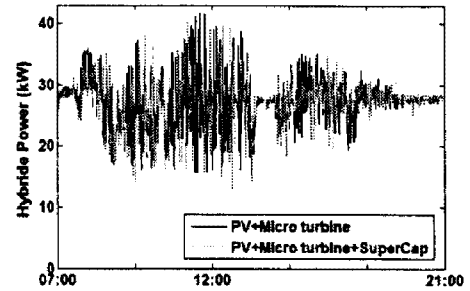
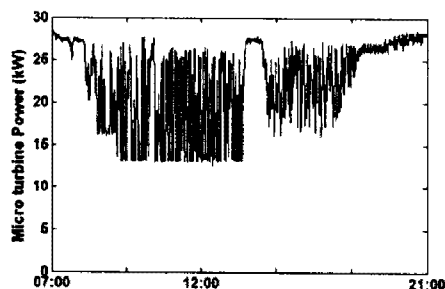
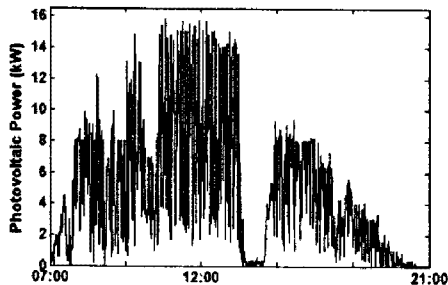


그림 14 PV/MTG/SCB 하이브리드 시스템 전력 모의 패턴

4. 결론

본 연구에서는 슈퍼캐패시터의 하이브리드 에너지시스템의 적용을 위하여 슈퍼캐패시터 Matlab/Simulink 모델을 개발하고 그 특성을 분석한 결과로 아래와 같은 중간결과를 얻었다.

- (1) 슈퍼캐패시터의 Matlab/Simulink 모델을 개발하고 그 특성을 분석하였다. 모의 결과 비교적 짧은 시간에 하이브리드 에너지시스템에서 전력의 변동을 효과적으로 억제하는 효과를 확인하였다.
- (2) 빌딩 마이크로그리드의 하이브리드에너지시스템에서 앞으로 PV시스템과 같은 제약이 불가능한 마이크로소오스의 경우에 매우 효과적인 전력제어를 수행할 수 있다.

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] Maxwell technologies application note, How to determine the appropriate Size Ultracapacitor for your application, document 1007236, Rev 2, October 2004.
- [3] L. Zubieta, and R. Bonert, Characterization of double-layer capacitors for power electronics applications, IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 36, no. 1, pp. 199-205, 2000.
- [4] B. Robyns, Y. Pankow, L. Leclercq, B. François, Equivalent continuous dynamic model of renewable energy system, Proceedings of the 7th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and systems, ELECTRIMACS 2002, Montreal, Aug., 2002.
- [5] Won Pyo Hong, "Modeling, Control, Simulation of Microturbine Generator Based Distributed Generation System in Smart grid Application of Buildings," ICEE 2009, Shenyang, China, July 5-9, 2009.
- [6] 홍원표, "빌딩마이크로그리드시스템용 하이브리드에너지시스템 전력제어 및 운영," KIIEE 2009 추계학술대회, 2009. 10.9.