

Battery와 Electrolyzer를 이용한 태양광 발전시스템 운영

論 文
57-11-16

Operation of Photovoltaic Generation System with Battery and Electrolyzer

康起赫* · 金閔成* · 응웬칸록** · 元東俊†
(Gi-Hyeok Gang · Yun-Seong Kim · Nguyen Khanh Loc · Dong-Jun Won)

Abstract - The output power of photovoltaic(PV) generation system is strongly affected by weather conditions. To make up for the defect of solar energy, energy storages such as battery and electrolyzer are usually integrated with photovoltaic cell. This paper focuses on the way to store energy surplus with battery and electrolyzer and to provide energy with battery. Photovoltaic generation system is modeled with PV cell, DC/DC converter, DC/AC inverter, battery and electrolyzer. The operation algorithm to regulate PV output power with battery and electrolyzer is suggested. The simulation results show that battery and electrolyzer effectively cooperate with each other to compensate the fluctuation of PV generation system.

Key Words : Battery, Electrolyzer, Operation algorithm, Photovoltaic, Renewable energy

1. 서 론

현대사회의 주 에너지원으로 사용하고 있는 화석연료는 온실가스를 배출하여 환경문제를 야기하고, 자원 매장량의 한계로 가까운 미래에 다가올 자원이 고갈하는 등 문제점을 지니고 있다. 이러한 화석연료의 문제를 해결하기 위한 대안으로 풍력, 태양에너지, 지열, 수소에너지 등을 이용하여 에너지를 생산하는 신재생에너지가 거론되고 있다.

그중 태양광발전은 다른 신재생에너지보다 시스템 구조가 단순하며, 유지와 보수가 쉽고, 수명이 길어 널리 각광을 받고 있다. 하지만 태양광 발전의 출력은 일사량과 온도와 같은 외부 기후요건에 영향을 받기 때문에 수요자와 공급자가 원하는 안정적인 전력공급의 관점에서 한계를 가진다.

Battery(배터리)는 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치로써 응답 속도가 빠른 출력을 내며, 충전을 통해 에너지를 저장할 수 있다. Electrolyzer(전해조)도 마찬가지로 전기에너지로 물을 분해하여 수소를 생산하므로 에너지를 저장할 수 있다. 이러한 배터리와 전해조를 태양광 발전시스템에 추가하여 저장장치 및 보상장치로 쓰면 태양광 발전시스템의 출력 변동문제를 개선할 수 있다.

태양광 발전시스템에 설정된 지령치보다 큰 출력을 낼 때에는 배터리와 전해조를 이용하여 잉여에너지를 저장하고, 설정된 출력 값보다 작은 경우는 배터리가 낼 수 있는 용량만큼 출력을 보상한다. 이로 인해 태양광 발전시스템의 출력

변동을 개선하고 에너지 효율을 높일 수 있게 된다.

본 논문은 배터리와 전해조를 이용하여 태양광 발전시스템의 출력변동을 해결하고, 효율을 향상시키는 운영방안에 대해 제안한다. 태양광 발전, 배터리, 전해조, DC/AC 인버터, DC/DC 컨버터를 PSCAD/EMTDC 기반으로 모델링하여, 단일 태양광 발전시스템을 구축하고 제안된 운영방안을 모의하였다.

2. 태양광 발전시스템 모델링

2.1 태양전지

태양전지는 광기전력 효과에 의한 반도체 특성을 이용하여 태양빛을 전기에너지로 직접 변환시키는 장치이다. 이러한 변환에 대한 특성을 한 셀에 대한 전기적 등가회로로, 그림 1과 같이 저항, 전압원, 다이오드로 구성하여 나타낼 수 있다[1].

식 (1)은 태양전지 등가회로를 통해 얻을 수 있다.

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_{sat} \left(e^{\frac{V+IR_s}{V_t}} - 1 \right) \quad (1)$$

여기서, I_{ph} 는 태양광 전류, V_t 는 단자전압, I_{sat} 는 다이오드 포화전류이다.

* 學生會員 : 仁荷大學校 工大 電氣工學部 碩士課程
** 正會員 : 仁荷大學校 工大 電氣工學部 博士課程
† 교신저자, 正會員 : 仁荷大學校 工大 電氣工學部 助教授
E-mail : djwon@inha.ac.kr
接受日字 : 2008年 8月 23日
最終完了 : 2008年 9月 4日

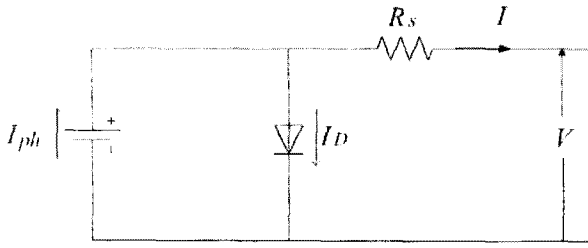


그림 1 태양전지 등가회로
Fig. 1 Photovoltaic equivalent circuit

출력전류를 알기 위해서는 단락, 개방을 통해 I_{ph} , I_{sat} 를 먼저 구해야한다. 태양전지 등가회로의 단락으로부터 식 (2)가 유도된다.

$$I_{ph} = I_D + I_{sc} \quad (2)$$

여기서, R_s 는 매우 작고, I_D 는 무시할 수 있으므로, I_{ph} 와 I_{sc} 는 같다. I_{ph} 는 태양 일사량과 온도에 대한 함수로 식 (3)과 같다[1].

$$I_{ph}(G_o, T) = I_{sc,STC} \frac{G_o}{G_{STC}} [1 + \Delta I_{sc}(T - T_s)] \quad (3)$$

여기서, G_o 는 일사량, T 는 온도, $I_{sc,STC}$ 는 표준 시험상태(STC)에서 단락전류, G_{STC} 는 표준 일사량, ΔI_{sc} 는 단락전류에서 온도계수, T_s 는 표준온도(298K)이다.

태양전지 등가회로의 개방을 통해 식 (4)가 유도된다.

$$V_{oc}(T) = V_{oc,STC} + \Delta V_{oc}(T - T_s) \quad (4)$$

여기서, $V_{oc,STC}$ 는 STC에서 개방전압, ΔV_{oc} 는 개방전압에서 온도계수이다. 또한, I 는 0이므로, 식 (5)가 성립되어 I_{sat} 를 구할 수 있다[1].

$$I_{ph}(G_o, T) = I_D(G_o, T) = I_{sat}(G_o, T) \times (e^{\frac{V_{oc}}{V_T}} - 1) \quad (5)$$

식 (3),(5)에서 I_{ph} , I_{sat} 를 알 수 있으므로, 식 (1)에 의해 출력전류를 알 수 있다.

식을 통해 구한, 한 개의 셀에 대한 출력 특성은 셀의 직·병렬연결을 통해 수 kW ~ MW의 태양광 발전시스템의 출력을 만들 수 있으며, 이렇게 얻은 출력은 그림 2와 같이 MPPT(Maximum Power Point Tracking)를 통해 최대 전력을 추종한다. MPPT는 dP/dV 가 0보다 작을 때에는 전압(V)을 감소시키고 dP/dV 가 0보다 클 때에는 전압(V)을 증가하여 출력전력의 최대지점을 찾는 방법이다[2].

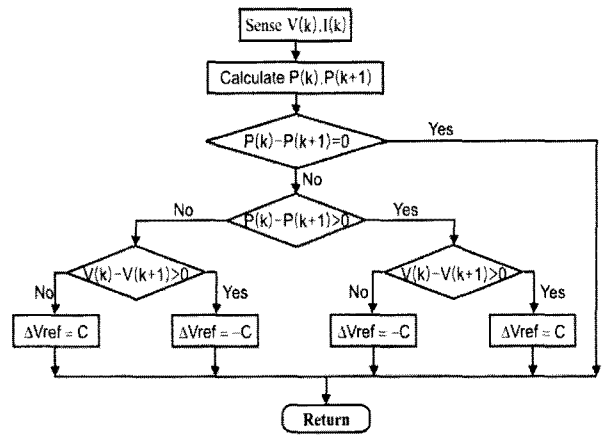


그림 2 MPPT 알고리즘
Fig. 2 MPPT algorithm

2.2 전해조

전해조는 물의 구성요소인 수소와 산소를 분리하여 전기 에너지를 화학에너지로 변환시키는 전기화학적 장치이다. 전해조는 잉여전력을 수소를 생산하는데 사용하여 연료전지에 공급해줄 수 있기 때문에, 잉여 에너지 저장이 가능하다. 현재 Alkaline 전해조가 가격이 낮고 더 많이 사용되고 있으므로, 본 논문은 Alkaline 전해조를 모델링하였다. 전해조에서는 다음과 같은 화학반응이 일어난다[3].

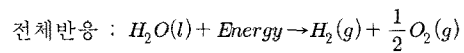
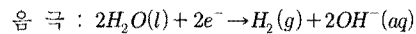
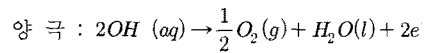


그림 3은 전해조의 모델링 개념을 보여준다. 전해조 모델은 전류와 외부온도를 입력받아, 전압, 내부온도, 수소 유속을 출력한다[3].

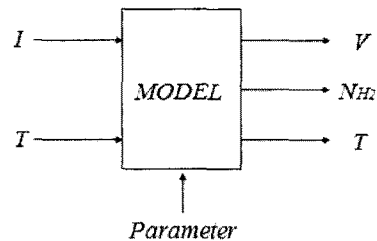


그림 3 전해조 모델
Fig. 3 Electrolyzer model

전해조의 화학반응을 하나의 셀에 대한 전기적인 특성으로 나타내면 그림 4와 같이 가변저항과 가역전압으로 등가회로를 구성할 수 있다.

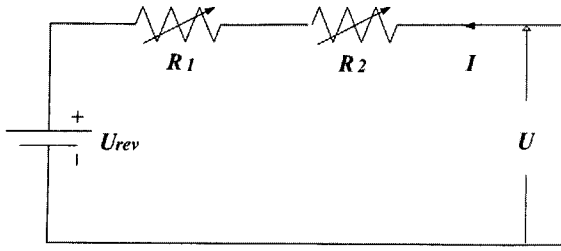


그림 4 전해조 등가회로
Fig. 4 Electrolyzer equivalent circuit

식 (6)은 전류와 주위 온도의 변화에 따른 전압 식이다[3].

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + s \times \log\left(\frac{t_1 + t_2/T + t_3/T^2}{A} I + 1\right) \quad (6)$$

여기서, U 는 전압, r 은 용저항, A 는 면적, T 는 온도, s 와 t 는 과전압 계수이다.

화학반응에서 발생하는 열은 화학반응속도에 영향을 미치므로, 온도에 대해 정의를 해주면 더욱 정확한 모델링을 할 수 있다[3]. 전해조의 내부 열 균형을 고려하면 다음과 같은 온도 식으로 정의할 수 있다.

$$T(t) = (T_{ini} - \frac{b}{a}) \exp(-at) + \frac{b}{a}$$

$$a = \frac{1}{\tau_i} + \frac{C_{CW}}{C_i} [1 - \exp(-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}})] \quad (7)$$

$$b = \frac{n_c UI(1 - \eta_e)}{C_i} + \frac{T_a}{\tau_i} + \frac{C_{CW} T_{CW,i}}{C_i} [1 - \exp(-\frac{UA_{HX}}{C_{CW}})]$$

여기서, T_{ini} 는 초기온도, T_a 는 외부온도, $T_{CW,i}$ 는 냉각수 온도, τ_i 는 시상수, UA_{HX} 는 열교환 계수, C_{CW} 는 냉각수의 캐패시터 성분이다.

패러데이(Faraday) 효율은 전해조로 얻은 수소의 이론적 최대 에너지에 대한 실질적인 에너지의 비율이다. 또한, 패러데이 효율은 와전류의 손실에서 나타나기 때문에 전류효율이 라고도 하며, 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$\eta_F = \frac{(I/A)^2}{f_1 + (I/A)^2} f_2 \quad (8)$$

여기서, f_1, f_2 는 패러데이 효율 변수이다.

패러데이 법칙에 의하면 전해조 셀에서 얻은 수소 물 유속은 양극에서 음극으로 이동하는 전자, 즉 전류와 비례하므로 식 (9)과 같이 나타낼 수 있다[3].

$$N_{H_2} = \eta_F \frac{n_c I}{2F} \quad (9)$$

여기서, N_{H_2} 는 생산된 수소 물 유속이고, n_c 는 직렬 연결된 셀 개수이다.

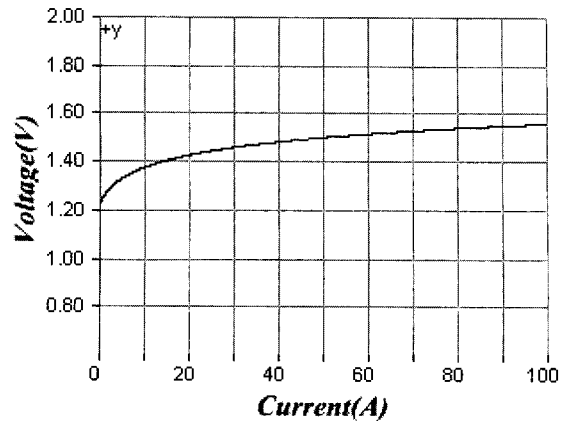


그림 5 전해조의 전압-전류 특성그래프
Fig. 5 Electrolyzer V-I characteristic curve

그림 5는 위의 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 얻은 전해조의 전압-전류 특성그래프이다. 전해조에 전류가 들어오면 저항에서의 전압상승에 의해 전압이 점점 상승하는 것을 볼 수 있다.

2.3 배터리

배터리는 전기에너지를 화학에너지로 변환시키고 다시 전기에너지로 재변환할 수 있는 장치이다. 또한, 충전이 가능하며 잉여전력을 저장할 수 있으며, 동특성이 빨라서 전력이 부족할 때 전력을 빠르게 공급할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점을 이용하여 잉여전력의 저장 및 보상의 역할을 할 수 있으므로, 잉여에너지의 손실을 줄여 전체적인 에너지효율을 높일 수 있다.

배터리는 다음과 같은 화학반응을 가진다[4].

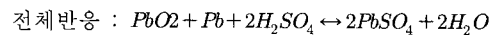
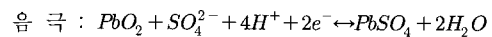
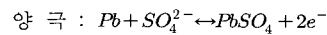


그림 6은 배터리의 모델링 개념을 보여준다. 배터리 모델은 전류와 외부온도를 입력받아 전압, 내부온도, SOC(State Of Charge)를 출력한다[4].

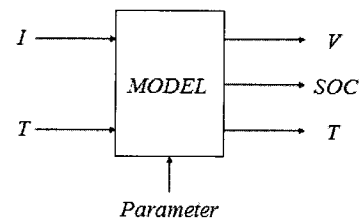


그림 6 배터리 모델
Fig. 6 Battery model

배터리의 화학반응을 하나의 셀에 대한 전기적인 특성으로 나타내면 그림 7과 같이 가변전압, 가역저항 및 커패시터로 등가회로를 구성할 수 있다[4].

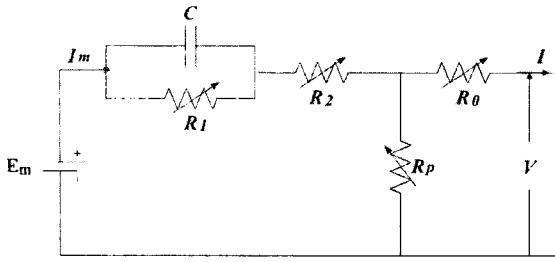


그림 7 배터리 등가회로
Fig. 7 Battery equivalent circuit

전류와 온도에 대한 함수 $C(I, T)$ 는 식 (10)과 같다[5].

$$C(I, T) = \frac{K_c C_0 (1 + \frac{T}{-T_f})^\epsilon}{1 + (K_c - 1)(I/I^*)^\delta} \quad (10)$$

E_m, R_0, R_1, R_2, R_p 은 식 (11)~(15)과 같이 나타낼 수 있다[4].

$$E_m = E_{m0} - K_E (273 + T)(1 - SOC) \quad (11)$$

$$R_0 = R_{00} [1 + A_0 (1 - SOC)] \quad (12)$$

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad (13)$$

$$R_2 = R_{20} \frac{\exp[A_{21}(1 - SOC)]}{1 + \exp(A_{22} I_m / I)} \quad (14)$$

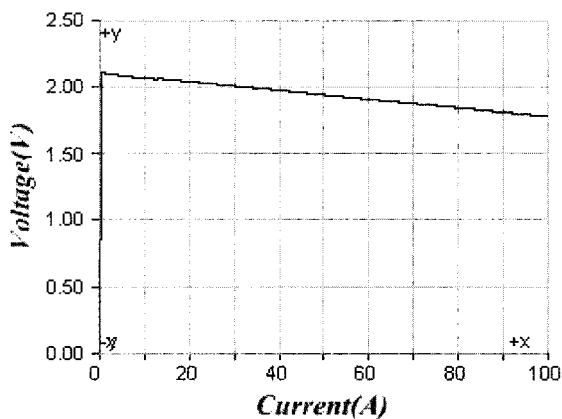
$$R_p = 1/G_{p0} \exp(V_{pN}/V_{p0} + A_p(1 - T/T_f)) \quad (15)$$

배터리에서 충전되는 전하량은 식 (16)과 같다.

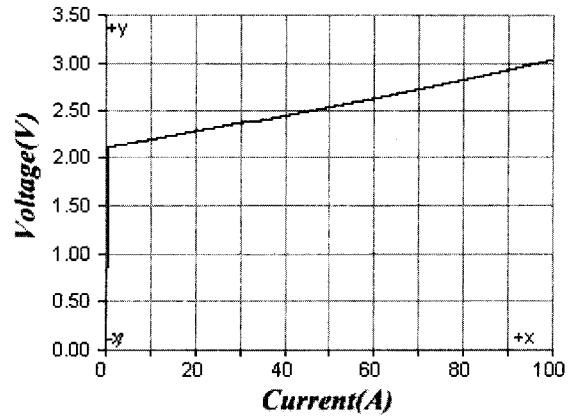
$$Q_c = \int i_m dt \quad (16)$$

배터리의 충·방전 능력은 SOC 지수로 나타낼 수 있다. SOC는 최대 커패시터 값에 대해 배터리가 어느 정도 충전되었는가를 나타내는 지수이며, 식 (17)로 나타낸다[4].

$$SOC = Q_c / C_{max} \quad (17)$$



a) 방전 시 특성 그래프



b) 충전 시 특성 그래프

그림 8 배터리의 전압-전류 특성 그래프

Fig. 8 Battery V-I characteristic curve

그림 6은 온도가 25°C로 일정할 때, 모델링을 바탕으로 시뮬레이션을 통해 얻은 배터리의 충전, 방전 시 특성 그래프이다. 방전 시 배터리 전류는 외부로 나가므로 저항의 전압 강하에 의해 전압이 감소하지만, 충전 시 배터리 전류는 내부로 들어오므로 저항에서의 전압상승에 의해 전압이 증가하는 것을 볼 수 있다.

3. 태양광 발전시스템 운영 알고리즘

태양광 발전시스템이 단독으로 운영될 때에는 그 출력이 일사량에 종속되기 때문에, 예측하지 못한 출력변동으로 인해 잉여전력 혹은 부족전력이 발생한다. 잉여전력이 발생하였을 때에는 배터리와 전해조를 통해 에너지를 저장하면, 시스템 전체 효율 향상을 도모할 수 있게 된다. 에너지 저장장치로써 전해조의 에너지효율은 70%이고[3], 생산된 수소는 다시 연료전지를 거쳐야 하는데, 연료전지의 에너지효율은 90%이므로 총에너지 효율은 63%가 된다. 하지만 배터리는 에너지효율이 80%로 전해조보다 높으며[4], 부족전력이 발생하였을 때에는 부족전력에 대한 보상도 가능하므로, 전해조보다 배터리를 더 많이 이용하는 것이 보다 효율적 운용이 된다. 그러나 배터리는 출력의 특성과 기기의 안정적인 동작을 위해서 SOC가 0.25~0.9인 범위에서만 운영해야 한다.

그림 9는 전해조와 배터리와 함께 운영되는 태양광 발전시스템의 운영 알고리즘이다. 지령치는 부하의 값에 따라 변하며, DC 버스에서 전압은 DC/DC 컨버터에 의해 일정하게 유지된다. 알고리즘은 다음과 같은 4가지 모드로 분류할 수 있다.

1) 배터리 충전 모드

지령치보다 태양전지의 전류 값이 더 큰 경우, 즉 부하량보다 MPPT로 작동하는 태양광발전이 생산하는 전력이 더 많아 잉여전력이 발생하였을 때, 잉여전력을 저장하기 위해 SOC가 0.9가 될 때까지 배터리는 충전한다.

2) 전해조 모드

지령치보다 태양전지의 전류 값이 더 큰 경우, 배터리 충전 모드로 동작하게 되는데, 이때 배터리의 충전이 한계에 도달하면(SOC≥0.9) 전해조가 작동하여 나머지 잉여전력을 수소에너지로 저장한다.

3) 배터리 방전 모드

지령치보다 태양전지의 전류 값이 더 작은 경우, 즉 부하량보다 태양광발전이 생산하는 전력이 적어 부족전력이 발생하였을 때 부족전력을 보충하기 위해서 배터리의 SOC가 0.25가 될 때까지 방전하여 출력한다.

4) 정지 모드

지령치보다 태양전지의 전류 값이 더 작은 경우, 배터리 방전 모드로 동작하지만 배터리의 용량 한계로 인해 더 이상 전력을 보충할 수 없을 때에(SOC≤0.25) 배터리의 동작은 정지한다.

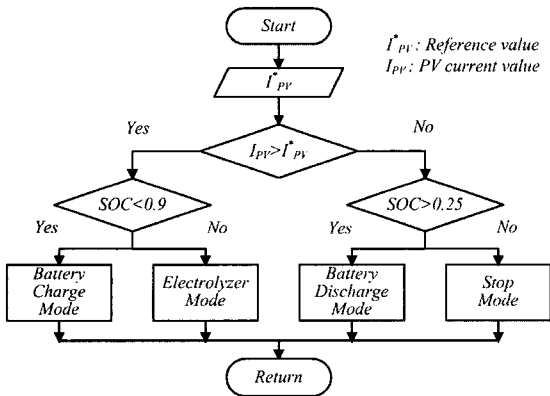


그림 9 태양광 발전시스템 운영 알고리즘
Fig. 9 operation algorithm of PV generation system

4. 태양광 발전시스템 시뮬레이션

4.1 태양광 발전시스템 구조

그림 10은 태양광 발전시스템의 구조를 나타낸다. 태양광 발전시스템은 MPPT로 작동하는 50kW의 태양광발전과 10kW의 배터리, 10kW의 전해조로 구성되어 있다. DC/DC 컨버터를 이용하여 태양광, 배터리, 전해조는 DC 버스에 DC 커플링하여 제어되며, DC/AC 인버터로 AC부하에 전력을 공급한다.

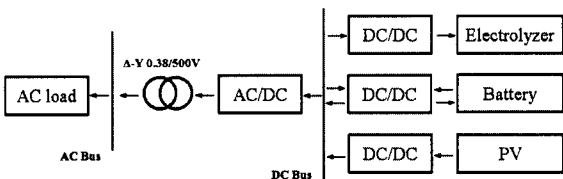
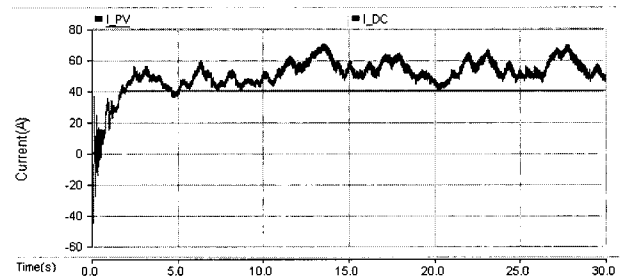


그림 10 태양광 발전시스템 구조
Fig. 10 PV generation system structure

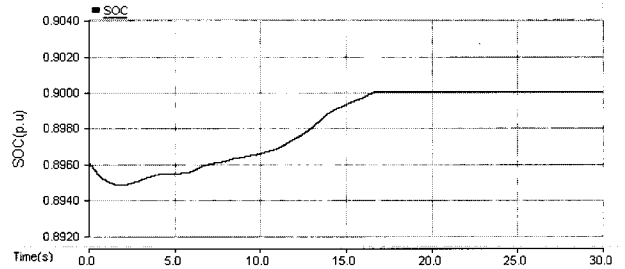
4.2 시뮬레이션 결과 및 분석

1) 배터리 충전 모드와 전해조 모드

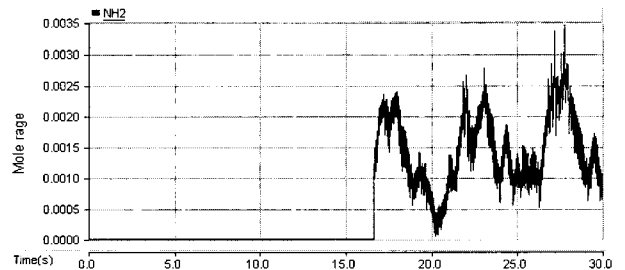
전체 부하량에서 배터리와 전해조가 부하로 동작할 때의 값을 뺀 부하량에 의해 지령치가 설정되며, 시뮬레이션에서는 부하량에 의해 40A가 설정되었다. 그림 11(a)는 날씨가 화창하여 2초부터 지령치보다 태양전지의 전류 값이 커서 잉여전력이 발생하였고, 배터리, 전해조에 의해 흡수되어 DC 버스의 전류가 40A로 일정하게 유지되었다. 그림 11(b)는 이 경우에 배터리의 SOC 변화를 보여준다. 먼저 배터리 충전 모드가 되어 에너지를 충전하기 때문에 SOC가 상승한다. 배터리는 SOC가 상위제한 0.9까지 도달하는 약 16초까지 배터리 충전 모드로 동작하며, 16초 이후에는 배터리 충전 모드에서 전해조 모드로 바뀌게 되어 배터리 동작은 멈추게 된다. 16초 이후 잉여전력은 그림 11(c)처럼 전해조가 수소를 생산하는데 사용한다.



(a) 태양전지의 전류 및 DC 버스의 전류 변화



(b) 배터리 SOC 변화

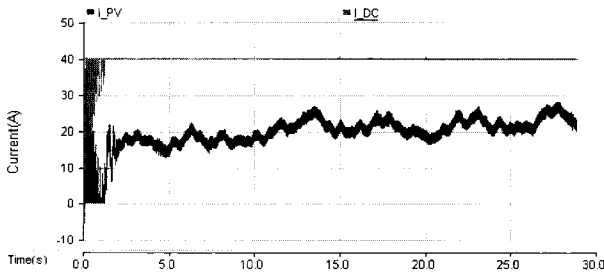


(c) 전해조의 생산된 수소 유속 변화

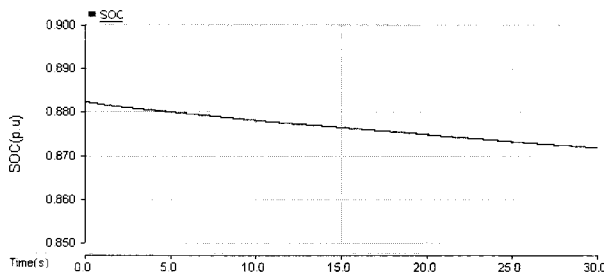
그림 11 잉여전력 발생 시 태양광 발전시스템 운영 방법
Fig. 11 Operation of PV generation system in case of excessive energy

2) 배터리 방전 모드와 정지 모드

그림 12(a)는 날씨가 흐려 지령치보다 태양전지의 전류 값이 작아서 부족전력이 발생하는 경우이다. 이때, 배터리 방전 모드가 되면서 배터리에서 방전하여 부족전력을 보상함으로써 DC 버스의 전류는 지령치인 40A에 도달한다. 그림 12(b)와 같이 배터리가 방전하여 SOC가 감소하고, 하위제한 0.25까지 배터리 방전 모드는 지속된다. 이후 SOC가 0.25에 도달하면 배터리는 동작을 멈추고 로 전환된다.



(a) 태양전지의 전류 및 DC 버스의 전류 변화



(b) 배터리 SOC 변화

그림 12 부족전력 시 태양광 발전시스템

Fig. 12 Operation of PV generation system in case of lack of power supply

5. 결 론

태양광 발전의 출력은 일사량과 외부온도와 같은 기후적인 조건에 종속되기 때문에 고립계통에서 운영 시 수요전력에 맞게 출력할 수 없다. 따라서 본 논문은 10kW 배터리와 10kW 전해조를 이용하여 50kW 태양광 발전의 출력변동에 대한 효율적인 운영 방안을 PSCAD/EMTDC를 기반으로 하여 연구하였다.

먼저, MPPT로 운영을 하고 있는 태양광 발전, 배터리 그리고 전해조를 모델링 하였으며, 이를 바탕으로 태양광 발전 시스템을 구축하였고, 이를 통해 제안한 운영 알고리즘을 모의하였다. 태양광 발전시스템에서 잉여전력이 발생하면 배터리, 전해조가 작동하여 DC 버스 전류를 일정하게 하고, 부족전력이 발생하면 배터리의 방전으로 DC 버스 전류가 일정하게 하였다.

추가적으로 본 논문에서 제안된 전해조의 운용을 통해 생산된 수소를 연료전지를 통해 복합 운영한다면, 보다 효율적인 운영이 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 전력 IT 사업단 마이크로그리드 세부 2과제의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] W. Xiao, W.Dunford, and A.Capel, "A novel modeling method for Photovoltaic cells" Power Electronics Specialist Conference, 2004, PESC 04, 2004 IEEE 35th Annual, vol.3, pp. 1950-1956, 2004
- [2] Koutroulis, E.; Kalaitzakis, K; Voulgaris, N.C, "Development of a microcontroller-based, Photovoltaic maximum power point tracking control system", IEEE transaction on power electronics, vol. 16, Issue 1, pp. 46-54, Jan. 2001
- [3] Qystein Ullevberg, "Modeling of advanced alkaline 전해조 : a system simulation approach", International Journal of Hydrogen energy, vol 28, pp. 21~33, 2003
- [4] Massomo Ceraolo, "New Dynamical Models of Lead_Acid Batteries", IEEE transactions on power system, Vol.15, No.4 November, 2000
- [5] Stefano Barsali, Massimo Ceraolo, " Dynamical Models of Lead-Acid Batteries: Implementation Issues", IEEE transaction on energy conversion, vol. 17, no 1, march 2002

저 자 소 개



강기혁 (康起赫)

1981년 7월 4일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2008년 ~ 현재 동 대학원 전기공학부 석사과정



김윤성 (金閔成)

1982년 5월 26일 생. 2008년 인하대학교 전기공학과 졸업. 2008년 ~ 현재 동 대학원 전기공학부 석사과정



응웬칸록 (Nguyen Khanh Loc)

1981년 2월 17일 생. 2004년 베트남 하노이공대 전기공학부 졸업(학사), 2006년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사), 2007년 ~ 현재 인하대 대학원 전기공학부 박사과정



원 동 준 (元 東 俊)

1975년 1월 1일 생. 1998년 서울대 전기공학부 졸업. 2000년 동 대학원 전기컴퓨터 공학부 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기 컴퓨터공학부 졸업(공박). 2004년 동 공학연구소 연구원. 2005년 ~ 2006년 미국 University of Washington, APT

Center 연구원. 2006년 ~ 현재 인하대학교 전기공학부 교수.

Tel : 032-860-7404

E-mail : djwon@inha.ac.kr,

Homepage : <http://power.inha.ac.kr>