

태양광 · 풍력 복합발전시스템 특성분석

정영석, 이병구, 강기환, 소정훈, 정명용, 유권중, 송진수

한국에너지기술연구소

Inquiry of Photovoltaic/Wind Hybrid Generation System

Y.S. Jung, B.K. Lee, G.H. Kang, J.H. So, M.W. Jung, G.W. Yu, J.S. Song

Korea Institute of Energy Research

Abstract

This paper deals with stand-alone Photovoltaic system(SPVS) with charger/discharge controller. Main power source of SPVS are generally solar cell and battery. Therefore SPVS can be classified into variable types in accordance with connection type between battery and solar cell. SPVS with charger /discharge controller which can operate solar cell a maximum power point is suggested and designed with instantaneous controller. And system operating characteristics are verified by experiment with a laboratory prototype in this paper.

1. 서론

태양에너지와 풍력에너지를 이용하고 있는 태양광 발전이나 풍력발전은 무한정하며, 청정발전이라는 장점이 있으나 일사량, 풍속 등의 기상조건의 변동에 따라 출력이 불안정하다는 단점을 가지고 있다. 이와 같은 단점은 축전지 등의 에너지 저장설비의 용량을 거대화하고 시스템의 고가화의 원인이 되고 있다. 이의 대안으로서 본 논문은 태양에너지와 풍력에너지를 결합 상호보완효과를 갖는 태양광 · 풍력복합발전시스템을 구성하였다.

2. 태양광 · 풍력 복합발전시스템

태양광 · 풍력 복합발전시스템은 태양전지 어레이와 풍력발전기, 인버터, 충전제어기, 축전지 등으로 구성되어 있으며 그림 1에 태양광 · 풍력 복합발전시스템의 구성을 나타내고 있다.

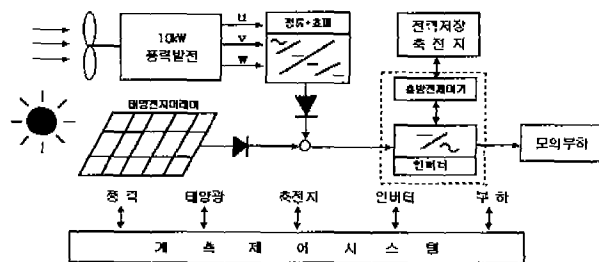


그림 1. 태양광 · 풍력 복합발전시스템의 구성도

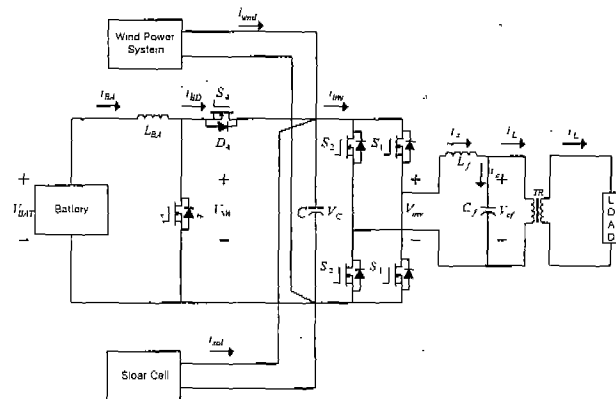


그림 2. 충전전기와 인버터의 회로 구성도

태양광이나 풍력 에너지원은 DC/DC 배터리 충전전기에 의해 배터리로 충전 또는 방전되고 DC/AC 단상 인버터에 의해 상용전원으로 변환이 된다. 충전전기와 인버터의 회로 구성도는 그림 2와 같다. DC/DC 배터리 충전전기는 2개의 IGBT 스위치와 승압용 인덕터의 조합으로 이루어지는데 배터리에서 인버터 직류원으로 전류를 방전하는 모드와 인버터 직류원에서 배터리로 충전하는 모드로 구성된다.

솔라셀 출력전류의 표현식은 다음과 같다[8].

$$i_{sol} = i_{sc}(1 - \exp(K(\frac{V_c}{V_{oc}} - 1))) \quad (1)$$

솔라셀 전류의 표현식은 실제 태양전지 V-I곡선의 근사표현식으로서 K는 곡선상수, Voc는 태양전지 개방전압, isc는 단락전류를 나타낸다.

3. 배터리 충방전기

배터리 충방전기는 2상한 초퍼를 이용하였다. 충방전기의 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{di_{BA}}{dt} = (V_{BA} - V_{SW})/L_{BA} \quad (2)$$

$$\frac{dV_C}{dt} = (i_{BD} + i_{sol} + i_{wind} - i_{inv})/C \quad (3)$$

동작모드별 스위치전압 (V_{SW}) 및 DC링크 커패시터 입력전류 (i_{BD})의 표현식은 표 1과 같다.

표 1. 충방전기의 V_{SW} , i_{BD} 의 관계

충전모드 ($S_3=0$)		방전모드 ($S_4=0$)	
$S_4=1$	$S_4=0$	$S_3=1$	$S_3=0$
$V_{SW} = S_4 V_C$		$V_{SW} = (1 - S_3) V_C$	
$i_{BD} = S_4 i_{BA}$		$i_{BD} = (1 - S_3) i_{BA}$	

그림 3은 충방전기의 제어블럭선도를 보이고 있다. 솔라셀의 입력전력, 풍차의 입력전력과 배터리의 출력전력이 인버터의 입력전력과 같게 되므로 식(4)와 식(5)의 전력 균형 방정식으로 표현할 수 있다.

$$V_{inv} i_s = V_C i_{sol} + V_C i_{BD} + V_C i_{wind} \quad (4)$$

$$V_{BA} i_{BA} = V_C i_{BD} \quad (5)$$

위 식은 PI 제어기를 사용하여 표현하면 식(6)과 같다. V_c^* 는 제어기상의 인버터 기준신호이다.

$$i_{BA}^* = (V_c^* - V_C)(K_{pd} + \frac{K_{id}}{s}) + \frac{(V_{inv}^* i_s - V_C i_{sol} - V_C i_{wind})}{V_{BA}} \quad (6)$$

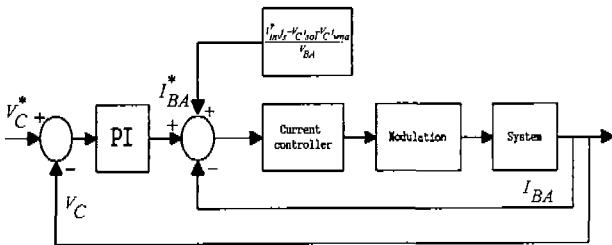


그림 3. 충방전제어기의 블럭선도

전류제어기는 식(2)를 이용하여 다음과 같은 제어 규칙을 가진다.

$$V_{sw}^*(k+1) = \frac{L_{BA}}{T_s} (i_{BA}^*(k+1) - i_{BA}(k)) + V_{BA}(k) \quad (7)$$

식 (4)의 전력균형 방정식에서 V_C 를 직류전압기 준전압 V_c^* 로 설정하고, 변조기가 이상적이고 배터리 전압이 일정하며 전류제어기가 단위이득을 가진다고 가정하면 그림 4와 같은 근사화된 충방전기의 블록선도를 얻을 수 있다.

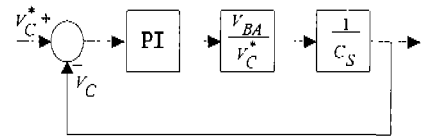


그림 4. 근사화된 제어 블럭선도

그림 4의 V_c / V_c^* 의 전달함수는 식(8)과 같게 된다.

$$\frac{V_c}{V_c^*} = \frac{\frac{k_{cg} K_{pv}}{C} s + \frac{k_{cg} K_{iv}}{C}}{s^2 + \frac{k_{cg} K_{pv}}{C} s + \frac{k_{cg} K_{iv}}{C}} \quad (8)$$

여기서 $k_{cg} = \frac{V_{BA}}{V_c^*}$, $PI = K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}$

4. 인버터

인버터는 필터커패시터 전압의 CVCF(constant frequency and constant voltage)기능을 가진다. 단상 인버터의 시스템 회로방정식은 다음과 같다.

$$\frac{di_s}{dt} = (V_{inv} - V_{cf} - i_s R)/L_f \quad (9)$$

$$\frac{dV_{cf}}{dt} = (i_s - i)/C_f \quad (10)$$

여기서 $V_{inv} = S_{inv} V_C$

S_{inv} : 인버터 스위칭 함수

DC 링크단에서의 출력전류 (i_{inv})의 표현식은 다음과 같다.

$$i_{inv} = S_{inv} i_s \quad (11)$$

인버터제어기는 내부에 전류제어기를 그리고 외부에 전압제어루프를 가지는 순시 제어기를 사용하였다. 전류제어기로는 예측전류제어기를 이용하였다[6].

$$V_{inv}^*(k+1) = \frac{L_f}{T_s} (i_s^*(k+1) - i_s(k)) + V_{cf}(k) \quad (12)$$

여기서 T_s : sampling time

식(7)을 backward difference approximation[7]을 이용하여 표현하면 다음과 같으므로

$$V_{inv}(k+1) = \frac{L_f}{T_s} (i_s(k+1) - i_s(k)) + V_{cf}(k) \quad (13)$$

인버터의 변조기가 이상적이고, 연산지연 시간 등이 무시할 수 있을 만큼 짧다면 식(12)의 인버터 기준신

호 및 식(13)의 실제 인버터전압은 일치하므로 두 식을 이용하면 식(12)와 같은 식을 얻을 수 있고 이는 현재의 전류기준신호가 한 샘플링시간후의 실제전류와 정확히 일치함을 의미한다. 그러므로 샘플링시간이 매우 작다면 전류제어기는 단위게인으로 근사화될 수 있다.

$$i_s(k+1) = i_s(k+1)^* \quad (14)$$

그리고 전류기준신호는 PI제어기의 출력 및 제어루프에서 외란형태로 나타나는 부하전류의 합으로 다음과 같이 얻어진다.

$$i_s^* = (K_p + \frac{K_i}{s})(V_{cf}^* - V_{cf}) + i_L \quad (15)$$

그러므로 전류제어기를 단위게인으로 근사화하고 식(9), (10) 그리고 (15)을 이용하면 다음과 같은 전달함수를 얻을 수 있다.

$$\frac{V_{cf}}{V_{cf}^*} = \frac{\frac{K_p}{C_f} s + \frac{K_i}{C_f}}{s^2 + \frac{K_p}{C_f} s + \frac{K_i}{C_f}} \quad (16)$$

PI제어기의 이득은 극배치법을 이용하여 다음과 같이 얻을 수 있다[7].

$$K_i = \omega_n^2 C_f \quad K_p = 2\zeta \omega_n C_f$$

여기서 ω_n : natural angular frequency

ζ : damping ratio

그러므로 인버터의 블록전도는 다음과 같이 된다.

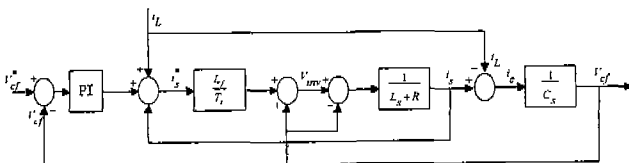


그림 5. 인버터 블록전도

5. 시뮬레이션 및 실험

시스템 운전특성을 확인하기 위해서 시뮬레이션과 실험을 수행하였으며 시뮬레이션은 ACSL로 구현하였다. 시스템 파라미터는 표2와 같다.

표 2. 시뮬레이션과 실험 조건

Lf	1.2 [mH]
Cf	100 [μ F]
Vcf	$\sqrt{2} \cdot 200 \cdot \sin(\omega t)$
DC Voltage	340 [V]
C	8500 [μ F]
LBA	3 [mH]
Solar cell output	5 [kW]
wind generator	10 [kW]
배터리 공칭전압	192 [V]
Ts(sampling time)	10 [kHz]

그림 6은 저항부하(5 Ω) 가변시의 각부 파형으로 (a)는 부하전압(V_{cf}), (b)는 부하전류(i_L), (c)는 초퍼 출력전압(V_C), (d)는 배터리 출력전류(i_{BA})를 보여주고 있다. 부하가 무부하에서 부하상태로 그리고 다시 무부하로 변화시켜 충방전기의 운전모드가 충,방전모드로 거듭 전이될 경우의 과도특성을 보여주고 있으며 배터리 전류파형을 통하여 무부하시는 충전모드로 부하시는 방전모드로 원활하게 전이됨을 볼 수 있으며 직류전압역시 안정한 특성을 보임을 알 수 있다.

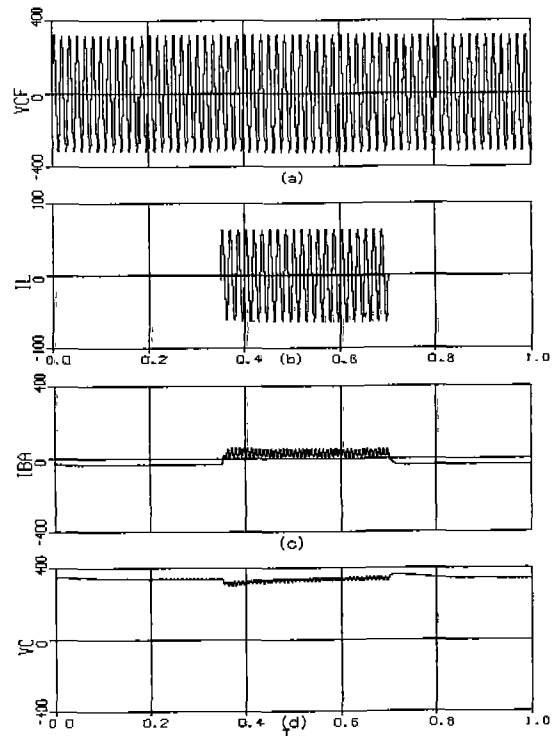


그림 6. 부하가변시 각부 파형 (a) 부하전압 (b) 부하전류(c) 초퍼 출력전압 (d) 배터리 출력전류

그림 7은 그림 5의 인버터의 제어블록도와 같이 제어기를 구성한 경우 저항부하시의 인버터의 부하전압과 전류파형이다.

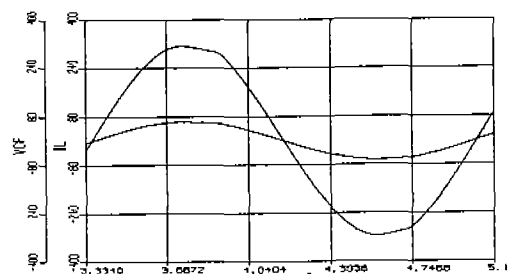


그림 7. 인버터 출력전압과 전류

그림 8과 그림 9는 가변부하시의 각부파형으로 부

하전압 (V_{cf}), 부하전류 (i_L), 초퍼 출력전압 (V_C), 배터리 출력전류 (i_{BA})를 나타내주고 있다. 그림 10은 저항부하시 출력전압 FFT 분석결과를 보여준다.

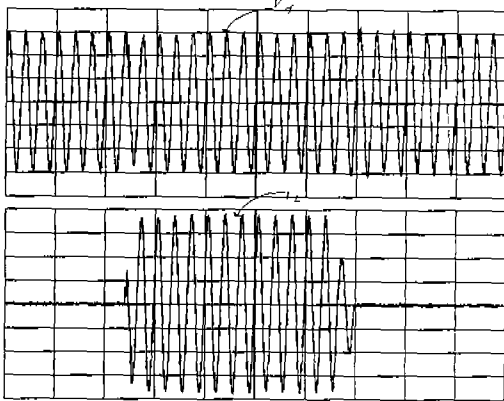


그림 8. 부하변동시 인버터 출력전압 V_L (100V/div), i_L (10A/div)

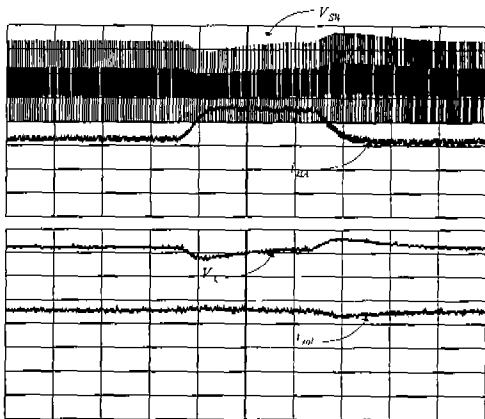


그림 9. V_C (100V/div)와 i_{BA} (20A/div) 및 V_{SW} , i_{sol} 의 파형

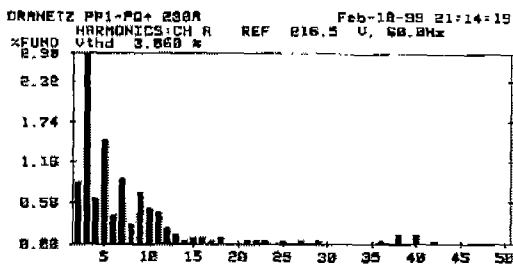


그림 10. 인버터 출력전압의 FFT 분석

5. 결론

본 연구에서는 충방전기를 이용한 태양광·풍력 복합발전시스템을 설계하여 운전특성을 확인하였다. 제어기는 2중 루프 및 피드포워드 제어를 이용하였다.

시뮬레이션과 실험을 통해서 충방전 시스템의 양방향 전력제어 특성을 확인하였고 태양전지의 출력과 부하의 변동에 따른 전압의 부조화와 배터리 보호의 문제점이 해결 가능함을 확인할 수 있었다. 향후 실증시험 연구에 활용함으로써 보급에 필요한 기초자료를 확보하고자한다.

참고문헌

- [1] 한국전력공사 기술연구원, “낙도 전원용 태양광 발전시스템의 표준화 연구(Ⅲ)” 연구보고서, KRC-90 G-T12.
- [2] 小林廣武, “太陽光 發電における 蓄電池電壓の 設定法”, 電力中央研究所報告, 研究報告, T91071.
- [3] 小林廣武, 瀧川 清, 武田行弘, “太陽光 發電システムにおける 蓄電池運用法の 検討 -大規模蓄電池システムの 運轉特性 シミュレーション-”, 電力中央研究所報告, 研究報告, T91071.
- [4] 김홍성, 유권종 외, “충방전 제어를 이용한 독립형 태양광 발전시스템의 설계” 1998, 전력전자학술대회 논문집
- [5] Navid R. Zargari and Géza Joós, “Performance investigation of a current-controlled voltage-regulated PWM rectifier in rotating and stationary frames”, IEEE Trans. Ind. Electron., VOL. 42, NO. 4, pp. 396-401, AUGUST 1995.
- [6] LANDAU, “System Identification And Control Design”, Prentice hall, 1990.
- [7] K.J. Astrom, et al., “Automatic tuning of PID Controller”, Instrument Society of America, 1988.
- [8] 정연택, 한경희, 강승욱, 이승환, 한낙동, 김영엽, “태양광 발전 시스템의 최대출력제어특성,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집(B), pp. 1041-1044, 1992.