

# 공통 DC단을 갖는 복합발전시스템을 위한 전력균형제어에 관한 연구

정병환, 조준석, 고재석, 최규하, 김응상\*, 이창성\*\*  
 건국대학교 전기공학과, 한국전기연구소\*, (주)우리들\*\*

## A Study on Power Balance Control for Hybrid Power System with Common DC Link

B.H Jeong, J.S Cho, J.S Gho, G.H Choe, E.S Kim\*, C.S Lee\*\*  
 Konkuk UNIV., FACTS & PQ Div. KERI\*, Wooridle Co.\*\*

### ABSTRACT

This paper discusses power balance control of photovoltaic/wind/diesel hybrid generation system for remote area power supplies. There are many control methods for hybrid power system. Among others, it must be adopted that the control method to guarantee a stable balance between supply and demand, regardless of the fluctuation of generator power by atmospheric changes. In this paper, it is proposed that a hybrid generation system has a power-balanced controller to equilibrate generation power with a load demand, which is composed of DC bus-type power systems. To execute power balance control, it is assumed that all of power generators have a equivalent current-source characteristics. Through the results of simulation, the proposed scheme was verified.

### 1. 서 론

낙도와 같은 상용전원의 공급이 불가능한 도서지역은 독립형 태양광발전이나 디젤발전시스템이 설치되어 운용되고 있다. 그러나 독립형 발전방식은 기상변동에 따라 출력이 불안정하고 에너지 저장설비가 거대해지는 단점을 가지고 있으므로 지역적, 시간적 특성을 상호보완 할 수 있는 태양광·풍력·디젤발전을 연계하는 복합발전 형태의 발전방식이 요구된다.<sup>[1]</sup> 복합발전시스템은 기상상태에 따라서 태양광·풍력발전에서 전력을 발생시키고 정격부하를 초과하고 남은 잉여전력은 배터리에 충전하며 발전량이 부하량보다 부족하면 방전하도록 운전된다. 또한 기상조건에 따라서 태양광·풍력발전 용량을 초과하는 부하는 디젤발전시스템이 보완해

주는 방식으로 복합발전시스템을 운영하게 된다. 복합발전을 위한 제어방식은 여러 가지가 있지만 기상변동에 따른 출력전압의 변동에 대해서도 안정된 출력특성을 보장하는 시스템 구성과 제어기법을 채택하는 것이 중요하다. 따라서, 본 논문에서는 기상상태에 따른 복합발전시스템의 입력전력과 부하용량의 변동에도 항상 일정한 전력을 공급하는 공통 DC단을 갖는 복합발전시스템의 전력균형제어에 대하여 제안하고자 하며 시뮬레이션을 통하여 입력 변동에도 부하에 항상 일정한 전력을 공급할 수 있음을 검증하였다.

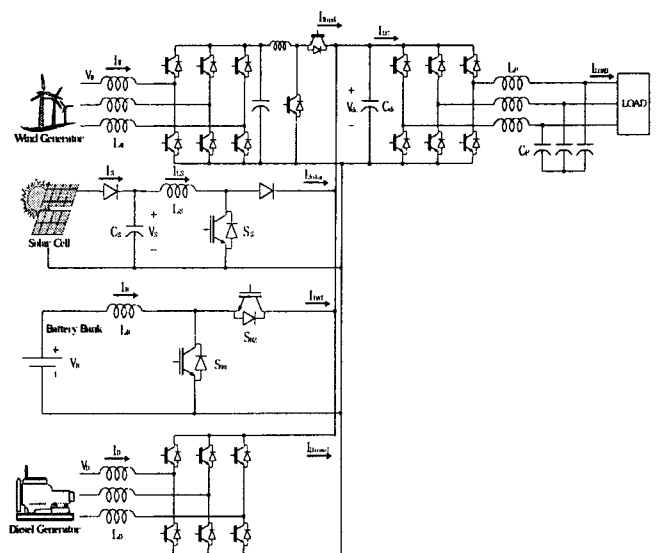


그림 1 DC 공통 복합발전시스템  
 Fig. 1 DC common type hybrid power system

### 2. 복합발전시스템의 구성과 전력균형제어

#### 2.1 복합발전시스템의 구성

본 논문에서는 그림 1과 같이 태양광·풍력·디젤발전시스템과 배터리 충·방전시스템이 공통 DC

단을 갖는 복합발전시스템으로 구성하였다. 태양광 발전시스템은 MPPT 운전을 위하여 입력전압을 제어하는 Boost 컨버터를 사용하였으며 풍력발전기로 유도발전기를 적용하여 AC/DC컨버터 출력단에 2상한 컨버터를 붙여서 유도발전기의 초기여자문제를 해결할 수 있도록 하였을 뿐만 아니라 AC/DC 컨버터의 출력단의 펄스형태의 출력전류의 고주파 전류성분과 저주파 전류성분을 제거하고 연속전류 형태로 바꾸어 공통 DC단에 공급하도록 하여 풍력 발전시스템이 공통 DC단에 주는 스트레스를 줄이도록 구성하였다. 디젤발전기의 출력은 3상 컨버터를 적용하고 입력 리액터를 사용하여 입력전류를 제어하고 컨버터는 DC단 커패시터를 제어하지 않고 입력전류만을 정류기모드로 제어하도록 하였다. 복합발전시스템의 전체적인 전력의 평형상태는 배터리 충·방전시스템으로 사용되는 2상한 DC-DC 컨버터가 제어하게 된다. 2상한 컨버터는 2개의 스위칭소자를 사용하여 벅 컨버터 및 부스트 컨버터의 기능을 동시에 수행하여 배터리를 충·방전시킬 수 있는 구조로 구성하였고 복합발전시스템 중에서 유일하게 공통 DC단을 전압제어하는 시스템으로 발전량과 부하량을 조절하는 역할을 한다.

## 2.2 태양광발전시스템 제어

복합발전시스템 운영에 있어서 기상상태에 따라 가변하는 태양광발전출력을 최대출력점추적(MPPT) 제어기법을 통해 항상 최대효율로 운전하는 방식이 반드시 필요하다. 또한 복합발전시스템을 하나의 DC단에서 안정적으로 연결하기 위해서는 시스템을 전류원으로 동작시키는 기술이 요구되므로 태양광발전시스템에서 MPPT를 수행하면서 태양광발전출력을 전류원으로 만들기 위해서 별도의 DC-DC 컨버터를 사용하였다. 그림 1에서는 Boost 컨버터를 사용한 태양광발전시스템을 보여주고 있다. 태양광발전시스템에 적용하는 DC-DC 컨버터의 특이점은 보통 DC-DC 컨버터의 관심사가 컨버터 출력전압인  $V_{dc}$ 의 제어인 반면에 태양광발전시스템에 적용하는 DC-DC 컨버터의 경우는 태양전지에서 최대출력을 끌어내기 위한 MPPT 알고리즘을 사용하므로 컨버터 입력단 전압인  $V_S$ 가 관심사이다.<sup>[2]</sup> 따라서 일사량이나 온도의 변화에 따라 태양전지의 최대전력점이 바뀌는데 태양전지로부터 최대전력을 얻어내기 위해서는 태양전지의 출력단 전압  $V_S$ 를 가변 제어하게 되며 이는 DC-DC 컨버터에서 인덕터에 흐르는 전류를 제어함으로써 태양전지의 출력단 전압  $V_S$ 를 제어하게 되는데, 전압을 높여야 할 경우 인덕터에 흐르는 전류를 감소시키고 전압을 낮춰야 할 경우에는 인덕터에 흐

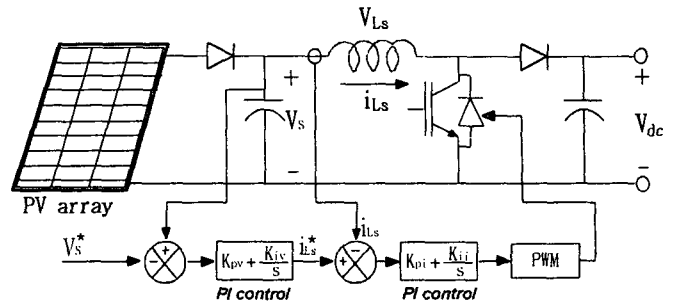


그림 2 태양광발전 시스템 제어 블록 다이어그램  
Fig. 2 Control block diagram of PV system

르는 전류를 증가시키는 방식으로 제어를 행한다. 본 논문에서는 실제로 컨버터의 입력단을 제어하기 위해서 인덕터 전류에 역 비례하는 Negative Closed Transfer Function 제어기법을 사용하였으며, 그림 2와 같이 평균전류모드 제어기법을 적용하였고 제어기로는 PI제어기를 사용하였다. 전압전류 이중루프 제어기를 표현하면 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{con-Solar} = (I_{Ls}^* - I_{Ls}) \cdot (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}) + V_S \quad (1)$$

$$I_{Ls}^* = -(V_S^* - V_S) \cdot (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) + I_S \quad (2)$$

$V_{con-Solar}$  : 컨버터 스위칭 전압(Solar)

$V_S$  : 컨버터 입력단 전압  $I_{Ls}^*$  : 인덕터 기준전류

$V_S^*$  : 컨버터 기준전압  $I_S$  : 태양전지의 출력전류

## 2.3 풍력발전시스템 제어

태양광발전시스템과 마찬가지로 풍력발전기는 기상상태에 따라 순시적으로 출력전력이 가변되므로 풍력터빈의 최대전력제어를 통하여 최대효율로 운전하는 방식이 필요하다. 식 (3)은 풍력터빈에서 발생하는 전력이고 식 (4)는 주속비(tip-speed-ratio)의 식이다.

$$P_{wind} = 0.5\rho\pi R^2 C_p v^3 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v} \quad (4)$$

$\rho$  : 공기밀도  $C_p$  : 터빈의 전력계수  $v$  : 풍속

$R$  : 터빈의 반지름  $\omega_m$  : 터빈의 회전속도

그림 3은 풍력터빈의 전력특성을 나타내며 최대  $C_p$ 에서 풍력터빈이 동작한다면 발생출력은 최대가 된다.<sup>[3]</sup> 따라서 식 (4)를 이용하여 최대출력을 발생하는 속도 지령치를 구하면 식 (5)와 같다.

$$\omega_m^* = \frac{\lambda_{opt} \times v}{R} \quad (5)$$

따라서 풍속에 대한 최대출력전력과 토크의 값은 식 (3)과 식 (5)에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$P_{target} = 0.5\rho\pi R_m^5 \frac{C_p \max}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^{*3} \quad (6)$$

$$T_{target} = \frac{P_{target}}{\omega_m^*} = 0.5\rho\pi R_m^5 \frac{C_p \max}{\lambda_{opt}^3} \omega_m^{*2} \quad (7)$$

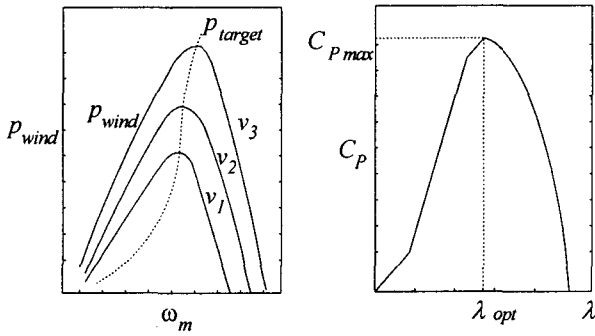


그림 3  $P_{wind} - \omega_m$  과  $C_p - \lambda$ 의 특성 곡선  
Fig. 3 Curve of  $P_{wind} - \omega_m$  and  $C_p - \lambda$

#### 2.4 배터리 충·방전시스템 제어

복합발전시스템은 토폴로지 측면에서 크게 두 종류의 전력변환장치로 구성된다. 즉 전류원시스템과 전압원시스템을 말하며 전자의 경우는 복합발전시스템에서 각 발전시스템을 가리키며 후자는 배터리 충·방전시스템의 경우이다. 모든 발전시스템이 직류 전류원 형태의 토폴로지를 가지는 복합발전시스템은 공통 DC단의 전압안정이 어렵다는 단점을 가지고 있으므로 공통 DC단의 전압을 제어하는 배터리 시스템을 적용하여 전압안정화 및 전력균형제어를 동시에 해결할 수 있는 방식을 사용하였다. 특히 전력균형제어를 위해서는 발전용량과 부하용량의 균형을 맞추어야 하는데 입출력 전력차로 발생하는 전력불균형의 값은 양과 음의 2상한 조건을 가질 수 있으므로 전력불균형을 보상하는 배터리 시스템 또한 2상한 특성을 가져야 한다. 즉 배터리 시스템은 충전과 방전을 동시에 할 수 있는 전력변환기를 적용해야하므로 Buck/Boost 조합인 2상한 컨버터를 사용하였으며 이를 통하여 공통 DC측에 연결된 부하와 발전시스템간의 전력균형제어를 수행할 수가 있다. 즉 복합발전시스템과 부하용량의 전력불균형이 발생했을 때 이는 공통 DC전압의 변동으로 나타나고 2상한 컨버터의 전압제어기는 일정한 DC전압을 유지하기 위해 전력불균형을 제거할

보상분을 출력한다.<sup>[4]</sup> 이와 같은 동작을 통해 발전용량과 부하용량 사이에 평형상태를 유지할 수 있다. 전력평형 운전시 전력관계식을 나타내면 다음과 같다.

$$V_{dc} \cdot I_{load} = V_{dc} \cdot (I_{Solar} + I_{Wind} + I_{Batt} + I_{Diesel}) \quad (8)$$

$$V_B \cdot I_B = V_{dc} \cdot I_{Batt} \quad (9)$$

위와 같은 관계식을 사용하여 시스템 제어기를 구성하면 전력평형이 이루어진다. 여기서 배터리 충·방전시스템은 전압제어기 내부에 전류제어기가 포함된 이중제어루프를 형성하는 평균전류모드 제어방식을 사용하였다. 식 (10)은 PI제어기를 사용한 공통 DC단 전압제어기의 구조를 보여주고 있다. 이는 전력불균형 보상의 과도상태를 개선하기 위해 복합발전시스템의 각 발전기의 출력전류를 측정하여 전향보상분을 계산하고 이를 전압제어기 출력과 합산한다. 식 (11)은 전류제어기의 구조를 나타내고 있으며 전압제어기에서 출력된 전류 기준값을 추종하기 위해 PI 제어기를 적용하였다. 그림 4는 이중 제어루프를 갖는 컨버터의 전압전류제어기의 구조를 보여주고 있다.

$$I_B^* = (V_{dc}^* - V_{dc}) \cdot (K_{pv} + \frac{K_{iv}}{s}) \quad (10)$$

$$+ \frac{V_{dc}}{V_B} (I_{Load} - I_{Wind} - I_{Solar} - I_{Diesel})$$

$$V_{con-Batt} = (I_B^* - I_B) \cdot (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}) + V_B \quad (11)$$

$V_{con-Batt}$  : 컨버터 스위칭 전압 (Battery)

$V_B$  : 배터리 전압,  $I_B^*$  : 인덕터 기준전류

$V_{dc}^*$  : DC bus 기준전압,  $I_{Load}$  : 부하전류

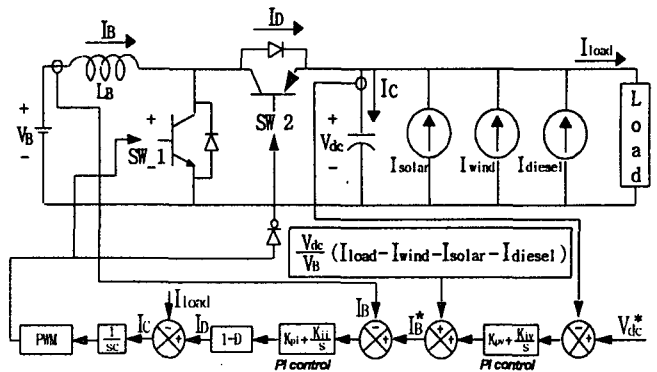


그림 4 배터리 시스템 제어 블록 다이어그램  
Fig. 4 Control block diagram of Battery system

### 3. 시뮬레이션

본 논문에서는 복합발전시스템의 전체적인 동작과 공통 DC단을 가지는 전류원형태의 발전시스템의 전력균형 제어 알고리즘을 검증하기 위해 다음 표 1과 같이 시뮬레이션 모드를 4가지로 구분하여 수행하였다.

표 1 복합발전시스템 시뮬레이션 모드

Table 1 Simulation mode of hybrid system

복합발전 시스템 출력전력	Mode 1 (부하변동시)	Mode 2 (발전변동시)	Mode 3 (배터리저전압)	Mode 4 (배터리만충전)
P <sub>solar</sub> [kW]	10	5 → 10	0	10 → 5
P <sub>wind</sub> [kW]	20	30 → 5	30	30 → 15
P <sub>batt</sub> [kW]	-20 → 20 → -20	-5 → 15	20 → -35	-20 → 0
P <sub>diesel</sub> [kW]	0	0	0 → 55	0
P <sub>load</sub> [kW]	10 → 50 → 10	30	50	20

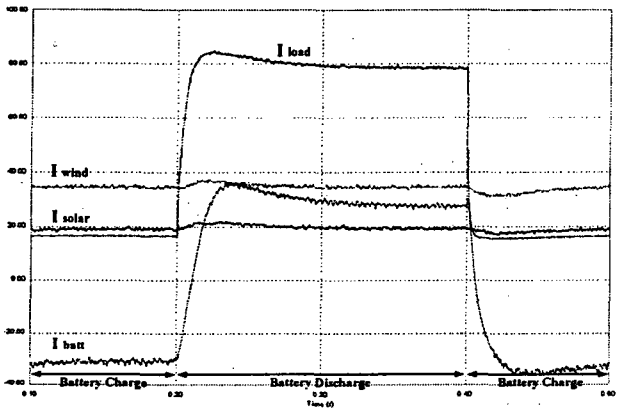


그림 5 부하 변동시 전류 파형  
Fig. 5 DC bus voltage when load is varied

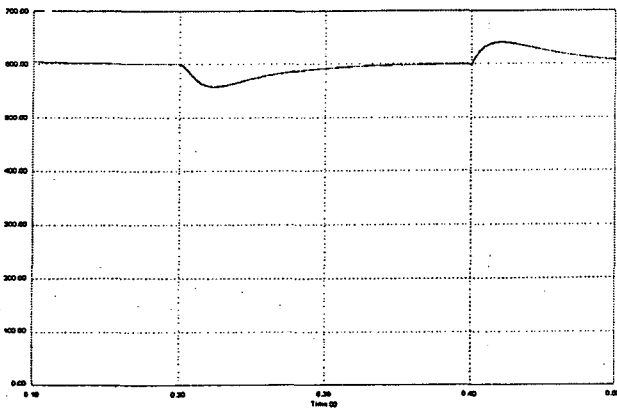


그림 6 부하 변동시 공통 DC단 전압  
Fig. 6 DC bus voltage when load is varied

그림 5는 부하 변동시 복합발전시스템의 각각의 전력변환시스템이 출력하는 전류파형을 나타내고 그림 6은 부하 변동시 공통 DC전압을 나타내며 배터리시스템은 DC전압의 안정화를 위해 전압제어를 하므로 전압제어기가 전압차 만큼의 전류보상분을 생성해주어 발전전력과 부하 사이의 전력평형을 조절해준다. 그림 7은 부하용량은 일정하고 태양광발전과 풍력발전 전력이 변동할 때 전류파형을 보여주고 있으며 그림 9는 배터리가 저전압이 될 때 비상용 디젤발전기가 기동하여 백업모드로 운전할 때 복합발전시스템의 출력 전류파형을 나타내고 그림 10은 배터리를 백업하기 위해 비상용 디젤발전기가 기동할 때의 공통 DC단 전압을 보여주고 있으며 그림 11은 배터리 만충전시에 배터리는 부동충전을 하고 각 발전전력을 조절하는 전류파형을 나타낸다. 모든 발전시스템은 전류원 형태로 최대전력을 출력하고 있으며 배터리시스템은 입출력간의 전력평형운전을 정상적으로 수행하고 있음을 보여준다.

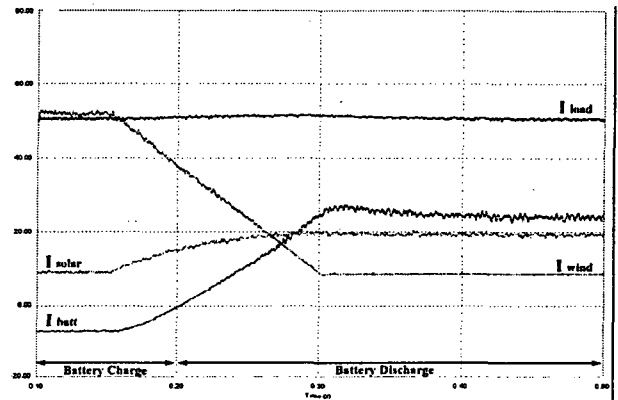


그림 7 발전출력 변동시 전류 파형  
Fig. 7 Current waveform when generation output is varied

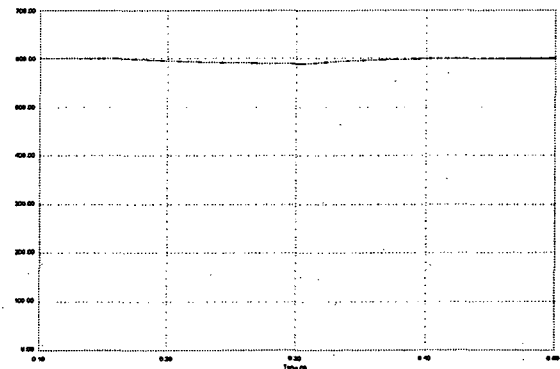


그림 8 발전출력 변동시 공통 DC단 전압  
Fig. 8 DC bus voltage when generation output is varied

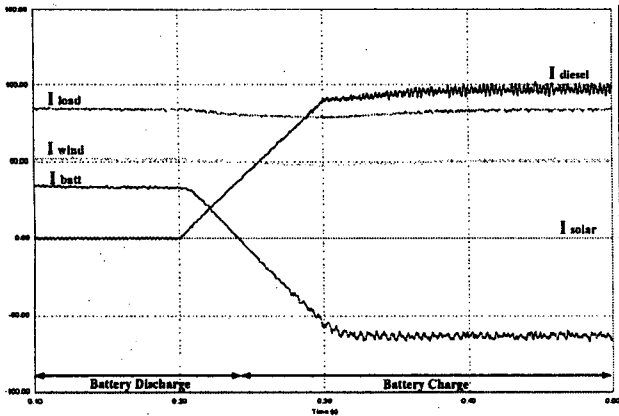


그림 9 배터리 저전압시 전류 파형  
Fig. 9 Current waveform when battery was on low voltage condition

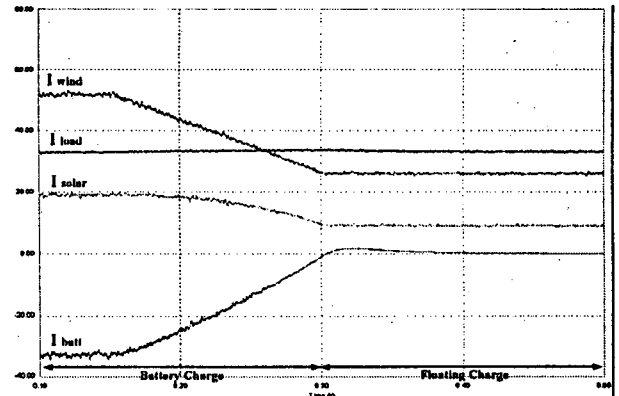


그림 11 배터리 만충전시 전류 파형  
Fig. 11 Current waveform when battery was on floating charge mode

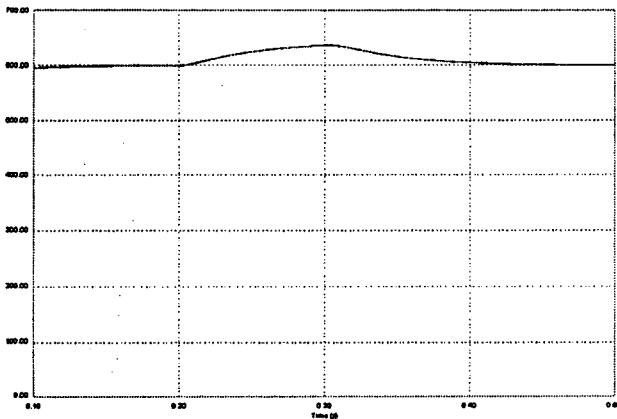


그림 10 배터리 저전압시 공통 DC단 전압  
Fig. 10 DC bus voltage when battery was on low voltage condition

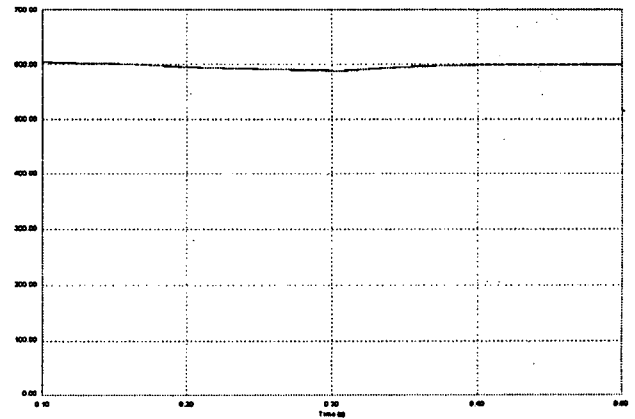


그림 12 배터리 만충전시 공통 DC단 전압  
Fig. 12 DC bus voltage when battery was on floating charge mode

#### 4. 결 론

본 논문에서는 복합발전시스템과 부하와의 전력균형운전을 수행하여 안정된 출력특성을 얻기 위해 발전시스템의 모든 출력을 전류원 형태로 공통 DC단에 연결하는 시스템구성을 논의하였고 발전전력과 부하의 전력균형운전을 위한 전력변환기의 구성과 복합발전시스템의 전력균형운전 알고리즘에 대해 설명하였다. 그리고 기상상태에 따른 복합발전시스템의 입력전력과 부하용량의 변동에도 항상 일정한 전력을 공급하는 복합발전시스템의 제어기법과 회로 토폴로지를 제시하였으며 시뮬레이션을 통하여 복합발전 시스템의 입출력의 변동에도 부하에 항상 일정한 전력을 공급할 수 있음을 검증하였다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 에너지 기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

#### 참 고 문 헌

- [1] Nayar, C.V. Lawrance, W.B. "Solar/wind/diesel hybrid energy systems for remote areas", Energy Conversion Engineering Conference, IECEC-89. Vol. 4, pp. 2029 -2034, 1989.
- [2] 한찬영, "계통연계형 태양광 발전시스템의 태양전지 출력단 전압제어에 관한 연구", 건국대학교 공학석사 학위논문, 2001.
- [3] Wang, Q. Chan, L "An independent maximum power extraction strategy for wind energy conversion systems," *Proceedings of the IEEE*, Vol. 2 pp. 1142-1147 1999.
- [4] 정영석, 유권중, 강기환, 송진수, 김홍성, "태양광·풍력 복합발전용 PCS시스템 제어특성분석" 전력전자학회 논문지 제5권 제1호, pp. 19~25, 2000.2.