

태양광·풍력·디젤 복합발전을 위한 전력균형제어에 관한 연구

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

A Study on Power Balance Control for Photovoltaic/Wind/Diesel Hybrid Generation

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 - Hybrid power system has a power balanced controller to equilibrate generation power with a load demand and it is composed of DC bus-type power systems. And all of power generators in hybrid power system can be equivalent to current-source characteristics. So this paper discusses power balance control for photovoltaic/wind/diesel hybrid power system. And 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 상호보완할 수 있는 태양광/풍력/디젤발전을 연계하는 복합발전 형태의 발전방식이 요구된다. 복합발전 시스템은 기상상태에 따라서 태양광/풍력발전시스템에서 전력을 발생시키고 정격부하를 초과하고 남은 잉여전력은 배터리에 충전하며 발전량이 부족하면 발전하도록 운전된다. 또한 기상조건에 따라서 태양광/풍력발전시스템 용량을 초과하는 부하는 디젤발전시스템이 보완해주는 방식으로 복합발전시스템을 운영하게 된다. 복합발전시스템의 전력변환기의 제어방식은 여러 가지 형태가 있지만 기상변동에 따른 출력전압의 변동에 대해서도 안정된 출력특성을 보장하는 시스템 구성과 제어기법을 채택하는 것이 중요하다. 특히 복합발전 시스템을 하나의 DC링크에서 안정적으로 연결하기 위해서는 각 시스템을 전류원으로 동작시키는 기술이 반드시 필요하다. 이러한 전류원 형태를 발전출력을 제어하게 되면 가변출력의 전압을 변환하여 전압원으로 제어하는 전압원 형태의 복합발전 시스템에 비하여 출력불균형의 문제를 해결할 수 있는 장점을 지닌다. 따라서 본 논문에서는 기상상태에 따른 복합발전시스템의 입력전력과 부하용량의 변동에도 항상 일정한 전력을 공급하는 태양광·풍력·디젤발전시스템을 사용하는 복합발전시스템의 전력균형제어에 대하여 제안하고자 한다. 또한 시뮬레이션을 통하여 입출력변동에도 부하에 항상 일정한 전력을 공급할 수 있음을 검증하였다.

2. 복합발전시스템의 구성과 전력균형제어

그림 1은 복합발전시스템의 전체 회로의 구성도를 보여주고 있다. 태양광발전 시스템은 MPPT 운전을 위해 입력전압을 제어하는 Boost 컨버터를 사용하였으며, 풍력발전기 및 디젤발전기의 출력은 3상 컨버터를 적용하고 입력 리액터를 사용하여 입력전류를 제어한다. 특히 교류발전기용 컨버터는 DC단 커패시터를 제어하지 않고 입력전류만을 정류기모드로 제어하는 특징을 가지고 있다. 복합발전시스템의 전체적인 전력의 평형상태는 배

터리 충·방전시스템으로 사용되는 2상한 DC-DC 컨버터가 제어하게 된다. 2상한 컨버터는 2개의 스위칭소자를 사용하여 백 컨버터 및 부스트 컨버터의 기능을 동시에 수행하여 배터리를 충·방전시킬 수 있는 구조로 구성되었다. 그리고 복합발전 시스템 중에서 유일하게 공동DC단을 전압제어하는 시스템으로 발전량과 부하량을 조절한다.

2.1 태양광 발전 시스템 제어

태양광발전 시스템에 적용되는 DC-DC 컨버터의 경우는 태양전지에서 최대출력을 끌어내기 위한 MPPT (Maximum Power Point Tracking) 알고리즘으로 사용된다. 태양전지의 특성상 일사량과 온도의 변화에 따라 최대전력을 얻을 수 있는 최대전력점 전압이 계속 변동하므로 스위칭을 동작을 통해 태양전지 출력전압을 제어해야한다. 이를 위해 Boost 컨버터의 입력전압 가변제어가 필요하며, 이 전압은 인덕터에 흐르는 전류에 역비례하는 관계를 가진다. 태양전지가 전류원 특성을 가지고 있으므로 컨버터의 입력측에서 MPPT제어를 수행하면 컨버터의 출력측 전압에 상관없이 부하에 최대전력을 전달할 수 있다. 또한 일반적으로 MPPT 제어를 위한 알고리즘은 P&O Method 와 IncCond Method 를 들 수 있다. 실제로 컨버터의 입력측을 제어하기 위해서는 인덕터 전류에 역비례하는 Negative Closed Transfer Function 제어기법을 사용하여야 하며, 그림 2와 같이 평균 전류모드 제어기법을 적용하였다. 전압전류 이중루프 제어기를 표현하면 다음 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

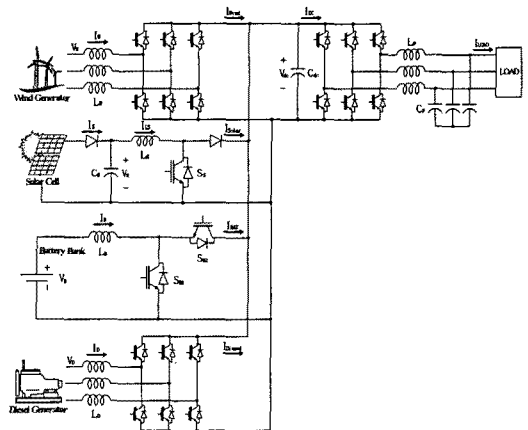


그림 1 복합발전 시스템 전체구성도
 Fig 1. Structure of hybrid power system.

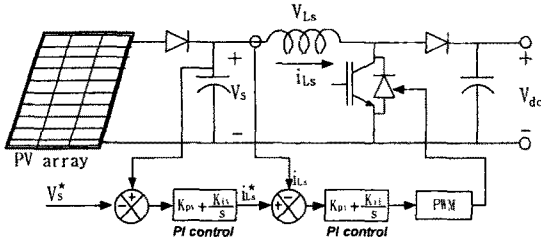


그림 2 태양광발전 시스템 제어 블록 다이어그램

Fig 2. Control block diagram of PV system.

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

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

여기서 $V_{con\ Solar}$: 컨버터 스위칭 전압(Solar)

V_s : 컨버터 입력단 전압 I_{Ls}^* : 인덕터 기준전류

V_s^* : 컨버터 기준전압 I_s : 태양전지의 출력전류

2.2 풍력발전 시스템 제어

그림 1에서 풍력발전기와 3상 PWM 컨버터의 인터페이스를 나타내고 있으며 컨버터출력 DC단이 병렬로 접속된다. 컨버터는 발전기의 교류전압원 출력을 직류전류원으로 변환하는 역할을 수행한다. 식 (3)은 풍력발전기 출력단 전압·전류와 컨버터의 직류단 전압전류의 전력관계식을 보여주고 있다. 식 (3)을 동기좌표계로 변환하여 3상전력식을 2상 dq축으로 표현해서 전력관계식을 전류로 전개하면 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$V_{ua}I_{ua} + V_{ub}I_{ub} + V_{uc}I_{uc} = V_{dc}I_{wd} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_{uq}^e \\ i_{wd}^e \end{bmatrix} = \frac{2}{3(v_{uq}^e + v_{wq}^e)} \begin{bmatrix} v_{uq}^e & -v_{wq}^e \\ v_{ud}^e & v_{wd}^e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_w \\ Q_w \end{bmatrix} \quad (4)$$

풍력발전기는 풍속에 따라 출력전력 (P_w)과 전압 (V_w)이 가변된다. 그러므로 순시적으로 최대전력을 전류원형태로 전달하기 위해서는 풍력발전기의 P_w 와 V_w 를 측정하여 컨버터가 제어할 전류기준값을 계산해야한다. 식(5)는 풍력발전기의 순시출력과 전압을 측정하여 전류기준값을 계산하는 과정을 보여준다. 특히 역률제어를 통해 무효전력을 제거하기 위해서는 d축 전류 기준값은 영으로 설정한다. 이러한 전류기준값으로 식 (6)과 같이 컨버터를 제어하며 컨버터는 역률제어 및 부하에 최대전력을 전류원 형태로 전달할 수 있다.

$$i_{uq}^* = \frac{2P_w}{3v_{uq}^e}, \quad i_{wd}^* = 0 \quad (5)$$

$$V_{uq}^* = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{uq}^* - i_{uq}^e) - \omega L i_{wd}^e + v_{uq}^e \quad (6)$$

$$V_{wd}^* = -(k_p + \frac{k_i}{s})(i_{wd}^* - i_{wd}^e) - \omega L i_{uq}^e + v_{wd}^e$$

2.3 배터리 충·방전 제어

태양광과 풍력발전시스템에 적용되는 컨버터는 전류원 형태로 최대전력전달 기능을 수행하므로 컨버터의 출력단 전압제어를 할 수 없다. 그러므로 부하와 발전시스템 사이에 전력균형을 수행하는 보조시스템이 필요하다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 배터리가 충·방전을 동시에 수행할 수 있는 Buck/Boost의 조합인 2상한 컨버터를 사용하였다. 배터리 충·방전 시스템이 양방향 2상한 컨버터로 구성되어 있으므로 공통 DC축에 연결된 부하와 발전시스템간의 전력균형제어를 수행할 수가 있다.

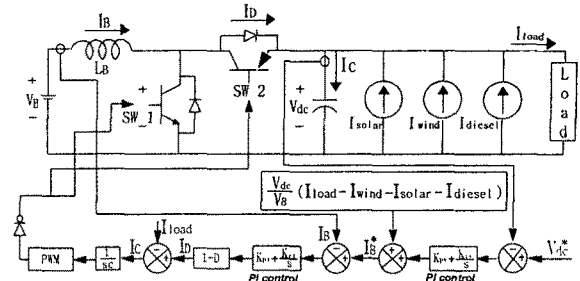


그림 3 배터리 시스템 제어 블록 다이어그램

Fig 3. Control block diagram of Battery system.

즉, 복합발전시스템과 부하용량의 전력불균형이 발생했을 때 이는 공통 DC전압의 변동으로 나타나고 2상한 컨버터의 전압제어기는 일정한 DC전압을 유지하기 위해 전력불균형을 제거할 보상분을 출력한다. 이와 같은 동작을 통하여 발전용량과 부하용량 사이에 평형상태를 유지할 수 있다. 이러한 전력평형 운전시 전력관계식을 나타내면 식 (7), (8)로 나타낼 수 있다.

$$V_{dc} \cdot I_{load} = V_{dc} \cdot (I_{Solar} + I_{Wind} + I_{Batt} + I_{Diesel}) \quad (7)$$

$$V_B \cdot I_B = V_{dc} \cdot I_{Batt} \quad (8)$$

배터리 충·방전시스템은 전압제어기 내부에 전류제어기가 포함된 이중제어루프를 형성하며 다음과 같은 식(9), (10)으로 표현된다.

$$V_{con-Batt} = (I_B^* - I_B) \cdot (K_{pi} + \frac{K_{ii}}{s}) + V_B \quad (9)$$

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

V_B : 배터리 전압, I_B^* : 인덕터 기준전류

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

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

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

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 복합발전 시스템의 공통DC단을 가지는 전류원 형태의 발전시스템의 전력평형제어 알고리즘을 검증하기 위하여 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 4는 시뮬레이션에서 사용된 회로도를 나타내고 있다. 표 1은 시뮬레이션 운전모드를 설명하고 있으며 시스템의 입출력 조건에 따른 운전상태의 모드전환을 나타낸다.

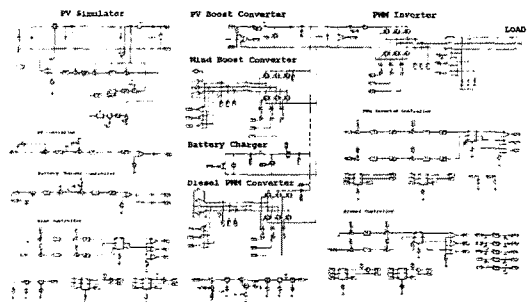


그림 4. 복합발전시스템 시뮬레이션 회로도

Fig 4. Simulation schematic of hybrid system.

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)
Psolar [kW]	10	5 → 10	10	10 → 5
Pwind [kW]	20	30 → 15	30	30 → 15
Pbatt [kW]	-20 → -20 → -20	-5 → +5	10 → -45	-20 → 0
Pdiesel [kW]	0	0	0 → 55	0
Pload [kW]	10 → 50 → 10	30	50	20

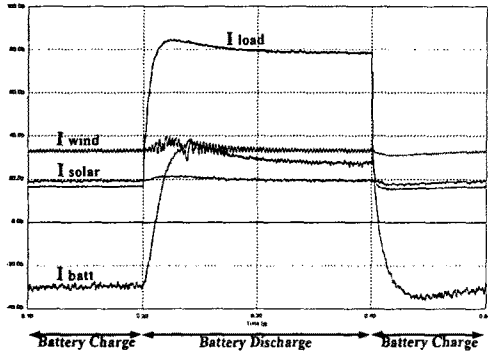


그림 5 부하 변동시 전류 파형
Fig 5. Current waveform when load is changed.

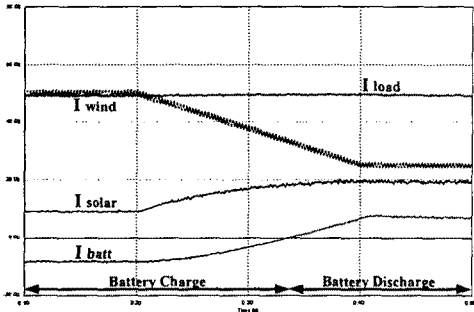


그림 6 태양광·풍력발전출력 변동시 전류 파형
Fig 6. Current waveform when PV/Wind generation output is varied.

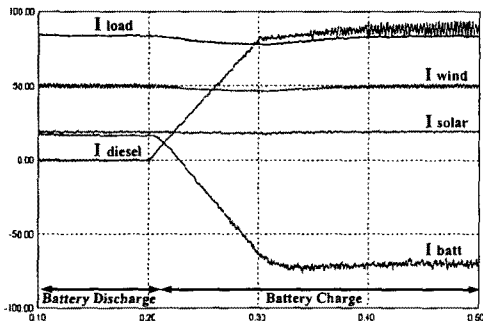


그림 7 배터리 저전압시 전류 파형
Fig 7. Current waveform when battery was on low voltage condition.

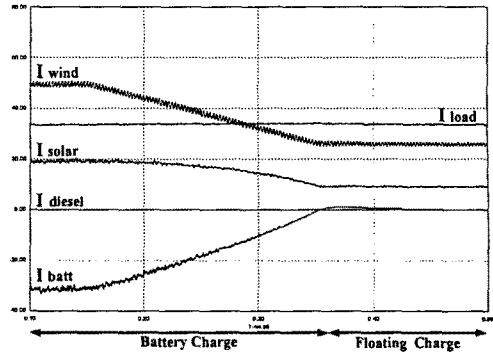


그림 8 배터리 만충전시 전류 파형
Fig 8. Current waveform when battery was on floating charge mode.

그림 5는 부하변동시 복합발전시스템의 각각의 전력변환시스템이 출력하는 전류파형을 나타낸다. 각 시스템의 출력전류가 펄스형태로 인가되므로 본 시뮬레이션에서는 저역필터를 사용하여 각 전력변환기의 출력전류를 표현하였다. 그림 6은 부하용량은 일정하고 태양광발전과 풍력발전 전력이 변동할 때 전류파형을 보여주고 있다. 그림 7은 배터리가 저전압이 될 때 비상용 디젤발전기가 기동하여 백업모드로 운전할 때 복합발전시스템의 출력전류파형을 나타낸다. 그림 8은 배터리 만충전시에 배터리는 부동충전을 하고 각 발전전력을 조절하는 전류파형을 나타낸다. 모든 발전시스템은 전류원 형태로 최대전력을 출력하고 있으며 배터리시스템은 입출력간의 전력평형운전을 정상적으로 수행하고 있음을 보여준다.

4. 결 론

본 논문에서는 태양광·풍력·디젤 복합발전시스템과 부하와의 전력평형운전을 수행하여 안정된 출력특성을 얻기 위하여 각 발전시스템의 모든 출력을 공통 DC단을 가지는 전류원 형태의 발전시스템의 전력균형제어에 관하여 논의하였고 또한 시뮬레이션을 통하여 복합발전시스템의 입출력의 변동에도 부하에 항상 일정한 전력을 공급할 수 있음을 검증하였다. 향후에는 공통 DC단을 가지는 복합발전 시스템을 구축하고 시뮬레이션 결과를 바탕으로 병렬운전을 수행하는 전체 시스템의 전력균형제어를 실증 실험을 통해 검증하고자 한다.

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 에너지
기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

(참 고 문 헌)

- [1] Tadokoro, T. Taira, K. " A photovoltaic-diesel hybrid generation system for small islands ", IEEE, vol.1, pp.708 -715, 1994
- [2] Jun-Seok Cho, Jae-Seok Gho et al. "A Study on Photovoltaic/Wind/Diesel Hybrid Power System". ICPE, pp.698~702, October 2001
- [3] 정영석, 유권중, 강기환, 송진수, 김홍성, "태양광/풍력 복합 발전용 PCS시스템 제어특성분석", 전력전자학회 논문지, 제5권 제1호, pp.19~25, 2000.2
- [4] Muljadi, E. McKenna, H.E. "Power quality issues in a hybrid power system", IEEE, vol.2, pp.773 -781, 2001
- [5] E.I Baring-gould et al. " Field Performance of Hybrid Power Systems", American Wind Energy Association's WIND POWER conference, June 4-7 2001