계통연계형 풍력, 태양광 및 축전지 하이브리드 시스템의 출력제어 및 동특성 해석

論 文
56-2-14

Power Control and Dynamic Performance Analysis of a Grid-Interactive Wind/PV/BESS Hybrid System

金 슬 기† · 全 鎭 洪* · 趙 昌 熙* · 安 鍾 普**
(Seul-Ki Kim · Jin-Hong Jeon · Chang-Hee Cho · Jong-Bo Ahn)

Abstract - Most conventional hybrid systems using renewable energy sources have been applied for stand-alone operation, but Utility-interface may be an useful and viable option for hybrid systems. Grid-connected operation may have benefits such as reduced losses in power system distribution, utility support in demand side management, and peak load shaving. This paper addresses power control and dynamic performance of a grid-connected PV/wind/BESS hybrid system. At all times the PV array and the wind turbine are individually controlled to generate the maximum energy from given weather conditions. The battery energy storage system (BESS) charges or discharges the battery depending on energy gap between grid invertger generation and production from the PV and wind system. The BESS should be also controlled without too frequently repeated shifts in operation mode, charging or discharging. The grid inverter regulates the generated power injection into the grid. Different control schemes of the grid inverter are presented for different operation modes, which include normal operation, power dispatching, and power smoothing. Simulation results demonstrate that the effectiveness of the proposed power control schemes for the grid-interactive hybrid system.

Key Words : Grid-interactive Hybrid System, Power Control, Wind Turbine, PV Array, BESS

1. 서 론

신재생에너지전원은 자연조건에 의존하는 특성으로 인하여 전력공급의 안정성 및 지속성에 있어 단점을 가지고 있는데, 이를 보완하기 위하여 서로 다른 특성을 가지는 에너지원을 복합적으로 구성한 것이 하이브리드 시스템이다. 에너지원으로는 풍력, 태양광, 연료전지 등 다양한 신재생에너지원을 복합적으로 사용하며, 에너지 구성비를 적절히 하여 최적의 운전효과를 얻을 수 있다. 하이브리드 시스템과 관련하여 원격지나 미전화지역의 전력공급시스템으로서 독립운전을 전제로 한 시스템 출력제어 및 성능에 관련된 연구[1, 2]와 용량 산정, 설계 최적화 등에 관한 연구[3, 4]를 비롯한 독립운전형 시스템의 응답특성 및 과도현상에 관련된 연구결과가 발표되었다[5, 6]. 대부분 하이브리드 시스템은 배전망으로부터 전력공급을 받지 못하는 낙도, 산간지역 등 독립전원용으로 개발되었으며, 계통연계형 시스템에 대한 연구개발은 상대적으로 미약하였다. 그러나 계통연계형 하이브리드 시스템은 구성 에너지원을 적절히 선택하여 연계계통과 협조 운용함으로써, 환경오염을 일으키지 않는 청정에너지를 공급하면서도 단일 전원시스템에 비하여 안정적인 전력공급이 가능하며 첨두부하삭감, 수요제어 등 전력회사의 수요관리 측면에서도 유리하므로 다양한 활용성을 가지고 있다.

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣硏究院 先任硏究員
E-mail : blksheep@keri.re.kr
* 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 先任硏究員
** 正 會 員 : 韓國電氣硏究院 責任硏究員
接受日字 : 2006年 7月 28日
最終完了 : 2006年 11月 23日

본 논문에서는 태양전지와 풍력터빈을 전원으로 구성하고, 축전지시스템 (Battery Energy Storage System : 이하 BESS로 표기)을 에너지저장장치로 사용하여 계통에 연계운전하는 계통연계형 하이브리드 시스템을 제시하고, 그 출력제어방식을 제안하며 동특성을 분석한다. 그림 1은 제안하는 계통연계형 하이브리드 시스템의 구성도이다. 태양광발전 시스템은 태양전지 어레이와 어레이 직류전압 제어를 위한 DC-DC 컨버터로 구성되며, 풍력발전 시스템은 풍력블레이드, 가변속 직축 풍력발전기 및 발전기 출력제어를 위한 AC-DC 컨버터로 구성된다. BESS는 일사량과 풍속 변동을 인한 태양전지 및 풍력터빈의 출력변동을 완만하게 하거나 필요 시 전체 시스템의 출력 조절을 위한 에너지 완충작용을 한다. 축전지와 충방전 제어를 위한 DC-DC 컨버터로 구

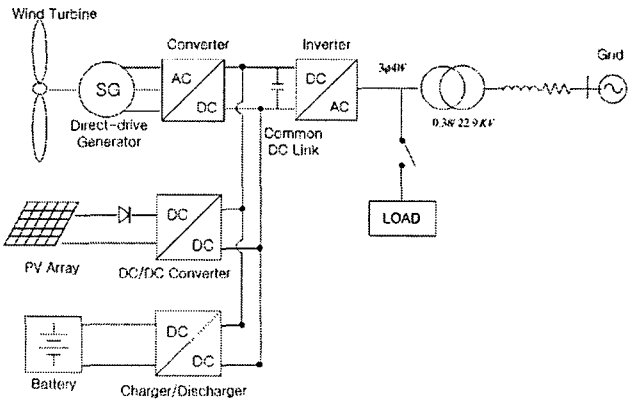


그림 1 제안된 계통연계형 하이브리드시스템
Fig. 1 Proposed Grid-Interactive Hybrid System

성된다. 공통 직류단으로 유입된 태양전지, 풍력터빈 및 축전지의 직류전력은 계통연계 인버터를 통하여 교류전력으로 변환되어 계통에 투입된다. 제안된 하이브리드 시스템은 운전목적에 따라서 일반모드, 일정출력 모드 및 출력평활 모드로 구분되며, 운전모드에 따른 하이브리드 시스템의 출력제어 방식을 기술한다. 전력시스템 해석 패키지인 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제안된 계통연계형 하이브리드 시스템의 출력 동특성을 분석하였다.

2. 하이브리드 시스템 출력제어

제안한 계통연계형 하이브리드 시스템 운전은 세 가지 모드로 구분되며, 표 1은 운전모드에 따른 하이브리드 시스템 출력제어 방식이다.

- 일반운전모드 : BESS는 운전정지 상태로 두고 태양전지 및 풍력터빈 출력을 그대로 계통으로 출력한다.
- 급전운전모드 : 첨두부하삭감(Peak Shaving), 능동적인 수요제어 등 목적을 위하여 사용자 또는 계통운영자가 설정하는 임의의 지령값을 발전한다.
- 출력평활모드 : 태양전지 및 풍력터빈으로부터 생성되는 급격한 출력변동을 평활시켜서 계통에 투입하는 모드이며, 출력변동이 비교적 완만한 안정적인 출력을 내보내기 위한 목적이다.

풍력터빈 및 태양전지 어레이는 주어진 풍속 및 일사량 조건에서 최대출력을 생산할 수 있도록 각각 가변속 제어와 MPPT (Maximum Power Point Tracking)제어를 적용한다. BESS의 경우 일반모드에서는 정지상태이며 급전 및 출력평활모드에서는 충방전 제어를 통하여 풍력 및 태양전지의 출력 일부를 충전하거나, 저장된 에너지를 방전한다. 계통연계 인버터는 일반모드에서 공통 직류단 전압을 일정하게 제어함으로써 태양전지 및 풍력터빈 출력을 그대로 계통으로 내보낸다. 급전모드에서는 지령된 값을 계통으로 출력하며, 출력평활모드에서는 태양전지와 풍력터빈 출력 합을 시지연시킨 값을 연계인버터 출력지령값으로 설정함으로써 출력을 평활화한다.

표 1 운전모드 별 하이브리드 시스템 출력제어
Table 1 Power control schemes for different operation modes

구성요소 / 운전모드	Wind	PV	BESS	계통연계 인버터
일반운전 모드	가변속 제어	MPPT	정지	공통 직류단 전압 일정 제어
급전운전 모드	가변속 제어	MPPT	충방전 제어	출력값을 목적에 따라 임의로 지령
출력평활 모드	가변속 제어	MPPT		저역필터를 사용한 평활된 출력값 지령

그림 2는 계통연계형 하이브리드 시스템의 전력변환장치 구성과 각 장치의 출력제어방식이다. 태양광 DC/DC 컨버터는 어레이 출력전압 V_{PV}가 MPPT 제어 지령치를 추종하도록 함과 동시에 공통 직류단 전압과 동일한 전압으로 승압되도록 하는 역할을 한다. 제어기는 최대출력추종 제어기, 전압제어기, 전류제어기로 구성되며, 출력제어기의 출력이 전압제어기의 입력으로 전압제어기 출력이 전류제어기 입력으로 인가되는 방식이다. MPPT 제어기에서 지령한 어레이 기준전압 V^*_{PV}와 실제 값 V_{PV}의 오차는 전압 제어기를 통하여 태양전지 어레이 기준전류 i^*_{PV}로 생성되고, 다시 전류제어기를 통하여 실제 출력전류가 추종하도록 제어된다. 스

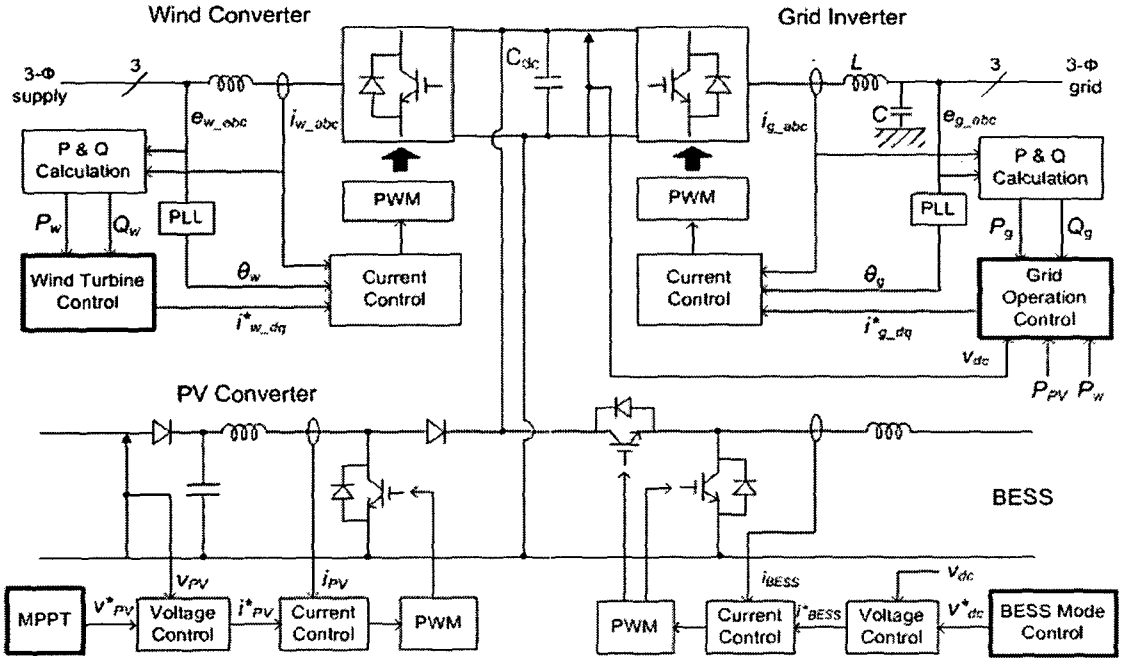


그림 2 계통연계형 하이브리드시스템 출력제어
Fig. 2 Control Schematic of the Grid-Interactive Hybrid System

위칭은 PWM 방식을 적용한다. 전압 및 전류제어기는 비례-적분 제어기를 사용한다.

풍력 AC/DC 컨버터 제어기는 풍력터빈 및 발전기로부터 생산되는 유효전력 및 무효전력을 제어하는 상위 풍력터빈 제어기와 이 제어기가 출력하는 풍력발전기 측 기준전류 $i^*_{w_dq}$를 제어하기 위한 전류제어기로 구성된다. 전류제어기로는 비교적 우수한 제어특성과 손쉬운 제어기 이득 설정, 제어대상 부하 제정수 변동에 대한 강인성으로 산업계에 널리 사용되는 궤환 선형화 기법(Feedback Linearization)에 기반을 둔 3상 교류 전류제어기[7, 8]를 사용한다.

BESS의 경우 충전 시 공통 직류단으로부터 축전지 방향으로 전류가 흐르고 방전 시에는 반대로 축전지에서 공통 직류단 방향으로 전류가 흐른다. 따라서 충방전용 DC/DC 컨버터는 강, 승압 컨버터 형태로 구성하여 충전 시에는 강압 모드로 동작하고 방전 시에는 승압 모드로 동작하며 양방향 전류제어를 수행한다. BESS 제어기는 충방전을 결정하여 공통 직류단 전압 지령값 V^*_{dc}를 출력하는 운전모드 제어기와 실제 값 V_{dc}를 지령값으로 제어하기위한 전압제어기 그리고 전압제어기 출력인 전류 지령치 i^*_{BESS}를 추종하기 위한 전류제어기로 구성된다. 태양광 컨버터 제어기와 마찬가지로 전압 및 전류제어기는 비례-적분 제어기를 사용한다.

계통연계 인버터는 풍력 AC/DC 컨버터 구성과 동일하고, 제어기는 상위 연계운전 제어기를 제외하면 동일한 제어 구조를 가진다. 연계운전 제어기는 하이브리드 시스템의 운전모드에 따라 필요한 유효전력 제어를 위하여 직류전압 기준값 또는 출력 기준값을 지령하며, 역률을 1로 제어한다.

2.1 풍력터빈 출력제어

풍력터빈 출력제어는 유효전력의 경우 풍력터빈 회전속도를 적절하게 제어함으로써 주어진 풍속조건에서 최대 에너지를 얻고자 하는 가변속 제어이며, 무효전력의 경우 일정역률 1로 제어하여 시스템 규격용량을 최소화하는 것이다. 풍속이 정격풍속 이하일 경우는 외부 풍속조건에서 최대 에너지를 끌어내기 위한 최대출력제어를 수행한다. 풍력터빈에서 얻을 수 있는 최대 출력은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[9]. 여기서 공기밀도 ρ, 블레이드 반지름 R, 최대출력계수 $C_{P,max}$, 및 출력계수가 최대일 때의 λ인 λ_{opt}는 모두 상수로 취급할 수 있으므로 풍력터빈 출력은 터빈 회전속도 ω_m에 따라 결정된다. 풍력컨버터 유효전력 지령치 P^*_W를 식 (2)와 같이 효율계수 η를 곱한 $\eta P_{m,max}$로 설정한다. η는 풍력발전기와 풍력컨버터의 손실을 가정한 효율계수이다.

$$P_{m,\max} = 0.5\pi\rho R^5 \frac{C_{P,\max}}{\lambda_{opt}^3}\omega_m^3 \quad (1)$$

$$P_W^* = \eta P_{m,\max} \quad (2)$$

풍속이 정격풍속을 초과하는 경우, 피치(Pitch) 제어 또는 스톨(Stall) 제어에 의해 풍력터빈 출력은 정격출력을 유지하게 되는데, 여기서는 정격풍속 초과 시 스톨 제어방식에 의해 이상적인 정격출력으로 제한된다고 가정한다.

그림 3은 풍력터빈 출력제어기로서 가변속 제어와 역률제어를 위한 출력지령값 P^*_W와 Q^*_W와 실제 값들과 오차를 비례적분기를 통하여 풍력발전기로부터 컨버터로 유입되는 전류의 q축 및 d축 지령값 $i^*_{w_q}$와 $i^*_{w_d}$를 생성한다.

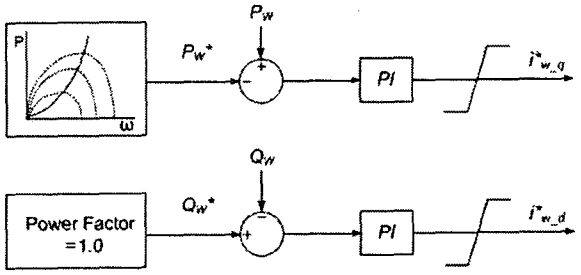


그림 3 풍력터빈 출력제어기

Fig. 3 Power controller of wind turbine

2.2 태양전지 어레이 출력제어

태양전지 어레이는 주어진 일사량과 온도 조건에서 어레이 출력전압에 따라 출력되는 전력이 변하게 된다. 따라서 태양전지를 효율적으로 동작시키기 위해서 태양전지 어레이가 항상 최대전력점 근처에서 동작하도록 하는 최대출력점 추종(MPPT) 제어가 필요하다. 태양전지 어레이에 연결된 컨버터를 제어하여 어레이가 최대출력점에서 동작하도록 출력전압을 조절한다. 다양한 MPPT 제어방식이 있으며, 여기서는 IncCond(Incremental Conductance)법을 적용하였다[10]. 그림 4는 하이브리드 시스템에 적용된 IncCond 법의 흐름도를 나타내는데, 태양전지 어레이 전류 i_{PV} 및 전압 V_{PV}를 측정하여 MPPT 제어 블록에서 태양전지 어레이 전압 지령값 V^*_{PV}를 발생한다.

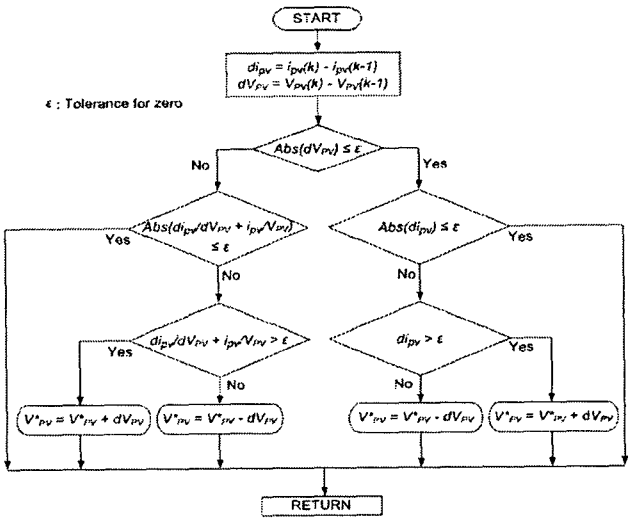


그림 4 IncCond법 흐름도

Fig. 4 Flow diagram of IncCond method

2.3 BESS 충방전 제어

급전모드와 출력평활모드에서 BESS 충방전 제어는 공통 직류단 전압이 설정된 상한과 하한 내에서 유지되도록 제어한다. 이렇게 하는 데는 두 가지 이유가 있다. 첫째는 계통연계 인버터의 정상적인 동작을 위하여 일정 수준이상의 공

통 직류단 전압 확보할 필요가 있기 때문이고, 둘째는 직류단 전압을 단일한 고정값으로 유지시키지 않고 어느 정도 전압차를 갖는 상한과 하한 범위 내에서 변동될 수 있도록 함으로써 축전지 충방전 빈도를 줄이기 위한 목적이다. 직류전압을 고정 값으로 두고 제어할 경우, 직류전압이 설정값보다 조금이라도 높거나 낮으면 계속적인 충방전을 통하여 일정값을 유지하려고 할 것이며, 이에 따라 축전지의 충방전 빈도가 과도하게 높아지므로 축전지에 부담을 줘서 운전수명 감소 등의 원인이 될 수 있다. 그림 5는 BESS 충방전 제어 흐름도이다. 직류단 전압 V_{dc}가 상한 V_{dc_up}보다 크게 되면 전압 지령값은 상한으로 고정되고 직류전압이 상한이하가 될 때까지 강압 모드로 운전하여 축전지는 충전된다. 직류단 전압이 하한 V_{dc_lw}보다 낮은 경우, 지령값은 하한으로 고정되고 직류전압이 하한이상이 될 때까지 승압 모드로 동작하여 축전지는 방전된다. 전압이 상한과 하한 사이에서 유지되면 BESS는 정지되고 별도로 직류전압 제어를 수행하지 않게 된다.

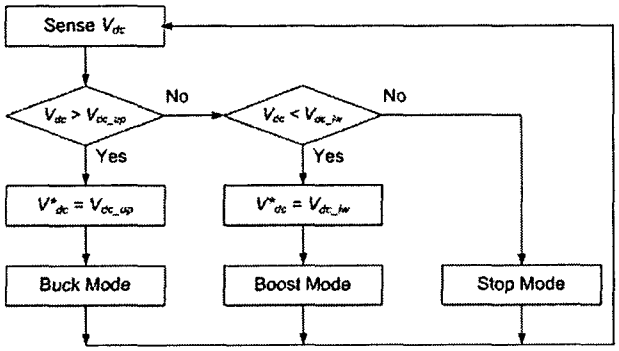


그림 5 BESS 충방전 제어
Fig. 5 BESS Operation Control

2.4 계통연계 인버터 출력제어

계통연계 인버터의 출력제어기는 하이브리드 시스템 운전모드에 따라 다음과 같이 구성되며, 무효전력 제어는 그림 3의 풍력 컨버터 제어와 동일한 구조를 가진다.

• 일반모드 : 공통 직류단 전압을 일정한 값으로 제어하여 태양전지와 풍력터빈에서 발전된 유효전력을 그대로 출력한다. 그림 6은 일반운전모드를 위한 인버터 전압제어기이다.

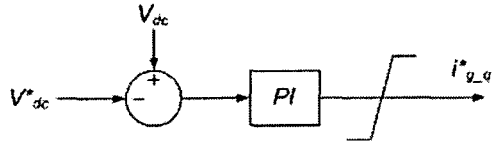


그림 6 일반모드 전압제어기
Fig. 6 Voltage controller for normal mode

• 급전모드 : 유효전력 출력을 사용자 또는 계통운영자에 의해 지령된 임의의 값으로 제어한다. 그림 7은 급전모드를 위한 인버터 출력제어기이다.

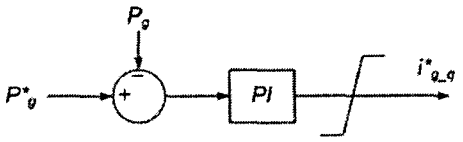


그림 7 급전모드 출력제어기
Fig. 7 Power controller for dispatch mode

• 출력평활모드 : 태양전지 어레이 출력과 풍력터빈 출력합을 저역필터를 통하여 지연시킨 값을 출력값으로 지령한다. 그림 8은 출력평활 운전을 위한 출력제어기이다.

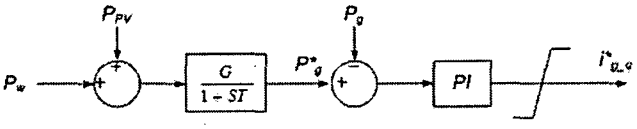


그림 8 출력평활모드 출력제어기
Fig. 8 Power controller for power smoothing mode

3. 시뮬레이션 연구

제안한 계통연계형 하이브리드 시스템을 구성하는 태양전지, 풍력터빈, BESS 및 연계인버터의 출력제어특성을 모의하였다. 일반모드, 급전모드, 출력평활모드에서의 하이브리드 시스템의 출력제어 특성을 모의하고, 출력성능을 검증하였다. 표 2는 모의에 사용된 시스템 파라미터이다. 성능모의를 위한 풍력터빈, 태양전지 어레이 및 축전지 모델은 참고문헌 [11-14]에 제시된 모형을 활용하였다. 모의 프로그램으로는 PSCAD/EMTDC를 사용하였다.

표 4 시뮬레이션 시스템 파라미터
Table 2 System parameters for simulation study

구분	파라미터		값	파라미터		값
풍력터빈	정격		20 [kW]	정격풍속		12 [m/s]
	공기밀도		1.23[kg/m^3]	로터 정격속도		74 [rpm]
	블레이드 반지름		3.7 [m]	관성정수		0.6 [s]
발전기	정격		25 [kVA]	극 수		[42]
	정격출력전압		0.3 [kV]	정격출력전류		27.8 [kA]
	기본주파수		25.9 [Hz]	관성정수		0.4 [s]
풍력 컨버터	정격		25 [kVA]	스위칭주파수		6.3 [kHz]
	출력 제어기	비례 이득	2	전류 제어기	비례 이득	10
		적분 이득	2		적분 이득	500
태양전지 어레이	정격		9.53 [kW]	개방전압		434 [V]
	모듈 정격		53 [W]	단락전류		26.8 [A]
	직렬 모듈 수		20	최대전압		348 [V]
	병렬 모듈 수		9	최대전류		24.4 [A]
태양광 컨버터	정 격		10 [kW]	스위칭 주파수		10 [kHz]
	전압 제어기	비례 이득	100	전류 제어기	비례 이득	100
		적분 이득	2		적분 이득	100
BESS 컨버터	정격		10 [kW]	스위칭 주파수		10 [kHz]
	전압 제어기	비례 이득	0.01	전류 제어기	비례 이득	1
		적분 이득	10		적분 이득	1000
계통연계 인버터	정 격		35 [kVA]	스위칭 주파수		6.3 [kHz]
	LC 필터 - L		6 [mH]	LC 필터 - C		10 [μF]
	출력 제어기	비례 이득	2	전류 제어기	비례 이득	10
		적분 이득	5		적분 이득	500

3.1 하이브리드 시스템 출력제어 특성

하이브리드 시스템 출력을 16[kW]로 설정하여 급전모드로 운전한 경우, 태양전지 어레이, 풍력터빈, BESS 및 연계 인버터 개별 시스템의 출력특성과 하이브리드 시스템 전체 출력특성을 분석하였다. 그림 9는 주어진 풍속조건에 대한 풍력시스템 출력특성이다. 풍속변동에 대한 풍력터빈 회전속도(Wtur)는 풍력터빈과 발전기의 관성으로 인해 풍력변동에 비하여 비교적 완만한 변화를 볼 수 있다. 풍력터빈 출력계수 Cp가 최대값인 0.44로 유지되고 있는데, 풍력 컨버터에서 풍속변동에 대한 최대출력제어가 원활하게 이루어지고 있다고 볼 수 있다. 유효전력(Pwind)와 무효전력(Qwind) 곡선을 보면 출력변화가 풍속변화에 비해 완만하게 나타나며, 풍력 컨버터를 통해 역률 1로 제어되고 있다. 또한 풍력발전기에서 컨버터로 입력되는 전류(Icnv_q와 Icnv_d)의 제어가 원활하게 수행되고 있다.

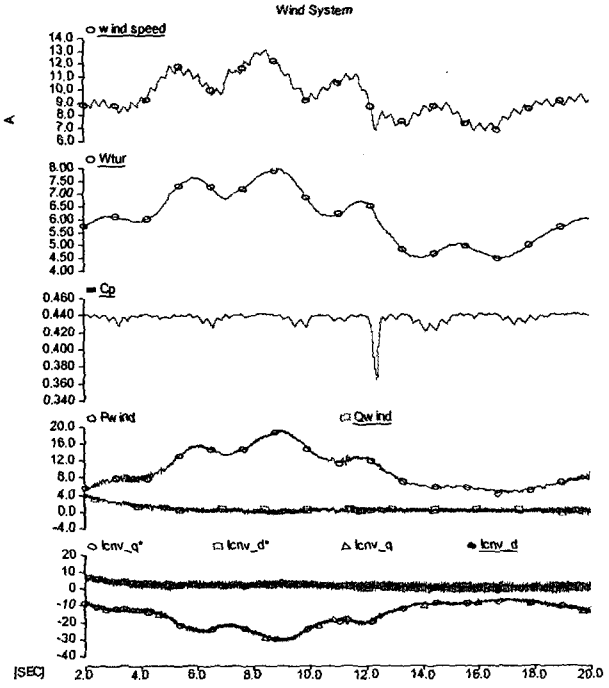


그림 9 풍력터빈 시스템 제어특성

Fig. 9 Control performance of wind turbine system

그림 10은 주어진 일사량 조건에 대한 태양광시스템 출력특성이다. 태양전지 표면온도는 25[°C] 로 가정한다. 일사량 변동 시 태양전지 어레이 전류(IsA) 및 출력(Ppv)은 순시적으로 급변하고 어레이 전압(Vpv)는 MPPT 제어를 위한 기준전압 Vpv*를 추종함에 따라 전류 및 출력이 미세하게 최대출력점으로 이동하며, 그림 10의 확대된 그래프에서 보듯이 변화시간은 대략 130[ms]이다. 그림 11은 일사량 S=400, 800, 1000 [W/m^2]에서 태양전지 어레이 운전점을 각 일사량에 대한 출력-전압 특성 곡선(S400, S800, S1000) 위에 표시한 것으로서, 어레이가 최대전력을 내는 첨두점에서 운전되고 있음을 확인할 수 있다.

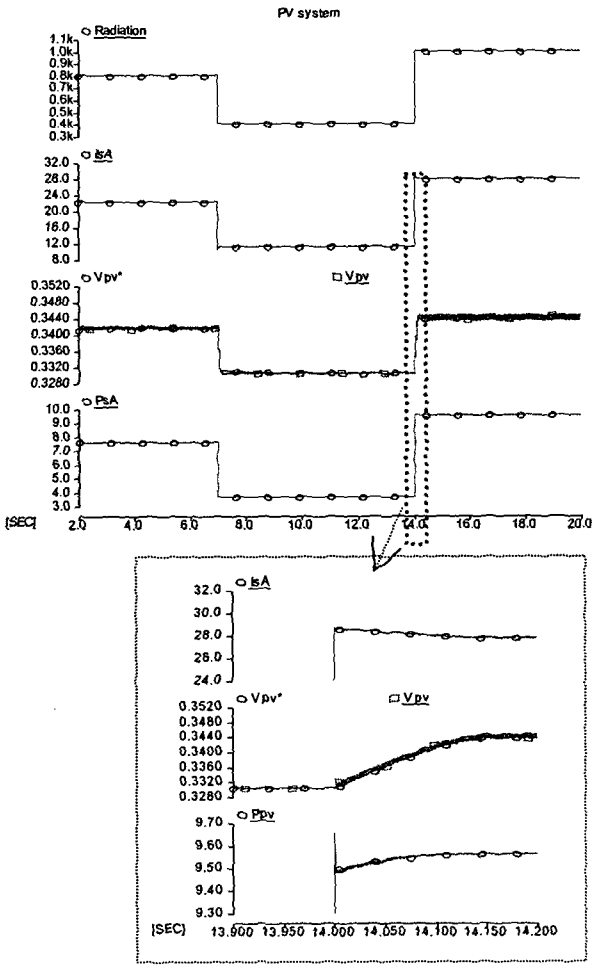


그림 10 태양전지 어레이 제어특성

Fig. 10 Control performance of PV array

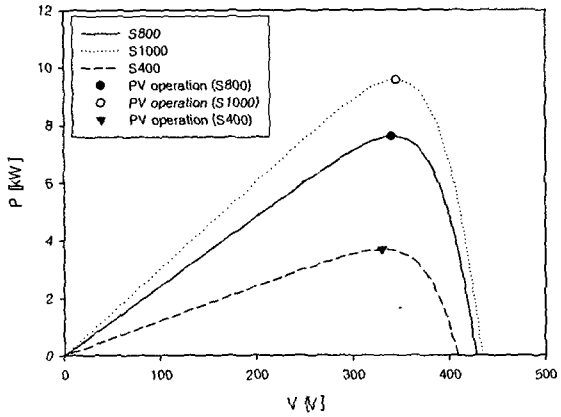


그림 11 일사량 변동에 따른 태양전지 어레이 운전점

Fig. 11 PV array operation for varying irradiance levels

그림 12는 BESS 방전전류 (Ibat)와 방전전력(Pbat), 공통 직류단 전압(V_dc), BESS 운전모드(BESS_M = 0 :방전, 1: 충전)의 제어특성을 나타낸다. 충방전 운전을 통하여 직류단 전압이 상한과 하한을 벗어나지 않도록 제어되었다. 그림 13은 계통연계 인버터 제어특성을 나타내며, 출력 지령된

16[kW]를 출력하고 있으며, 전류제어가 제대로 수행되고 있다. 그림 14는 하이브리드 시스템 출력곡선을 보여준다. BESS는 태양광 및 풍력시스템으로부터 직류단으로 유입되는 출력이 계통연계 인버터 출력 지령값보다 클 경우 잉여 에너지를 충전하고 반대 경우 부족한 출력을 방전을 통하여 보상함으로써 일정한 출력이 계통으로 유입된다.

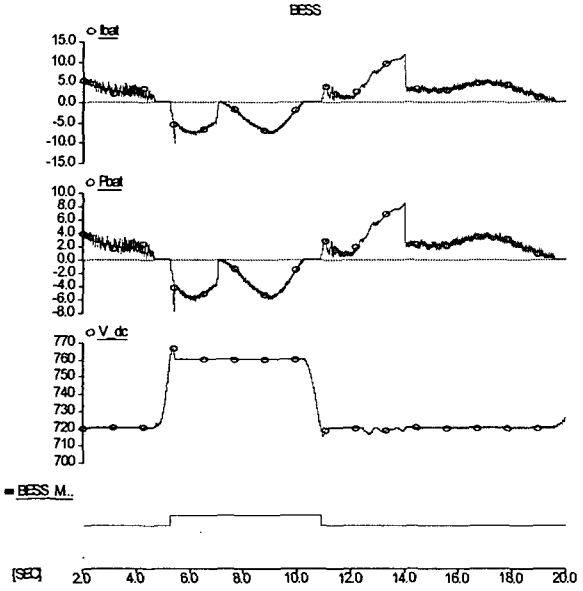


그림 12 BESS 제어특성

Fig. 12 Control performance of BESS

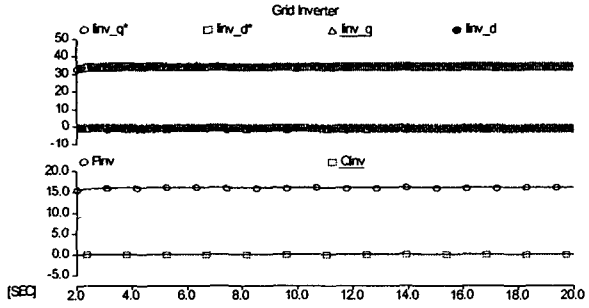


그림 13 계통연계 인버터 제어특성

Fig. 13 Control performance of grid inverter

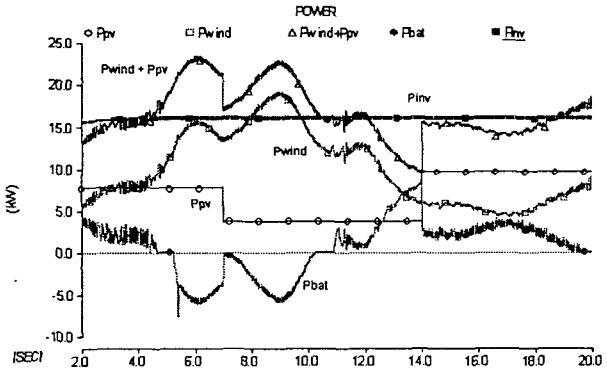


그림 14 하이브리드 시스템 출력변동

Fig. 14 Power variation of grid-interactive hybrid system

3.2 운전모드에 따른 출력특성

그림 9와 10에 적용된 풍속조건과 일사량 조건이 동일하게 적용될 때, 일반운전, 급전운전 및 출력평활운전에 따른 하이브리드 시스템 출력특성을 모의하여 비교하였다.

3.2.1 일반운전모드 모의결과

그림 15는 하이브리드 시스템을 일반모드로 운전할 때 모의결과이다. 직류단 전압이 0.72[kV]로 일정하게 유지되고 있으며 연계인버터는 공통 직류단으로 유입되는 태양광 출력과 풍력 출력의 합만큼 계통으로 흘려보내고 있다. 인버터 출력 (Pinv)이 두 전원 출력 합(Ppv+Pwind)보다 약간 작은데 이는 인버터 손실로 인한 것이라고 볼 수 있다. 전류 종합왜형률(CUR_THD)은 연계인버터 출력에 정확하게 반비례하고 있다. 출력이 클수록 왜형률은 작아지며 반대로 출력이 줄어들수록 왜형률은 증가한다. 이는 출력전류가 증가할수록 출력전류 기본파(60Hz)성분이 커지므로 상대적으로 고조파 성분의 기본파에 대한 비율이 작아지기 때문으로 볼 수 있다. 계통연계점 전압(Vmag)은 계통으로 유입되는 유효전력 출력과 정확하게 동일한 패턴을 보인다. 실제 이러한 분산전원에서 출력 변동은 전류 고조파와 접속점 전압크기에 직접적인 영향을 미치며, 이로 인하여 계통에 유입되는 전력의 품질에 영향을 줄 수 있다.

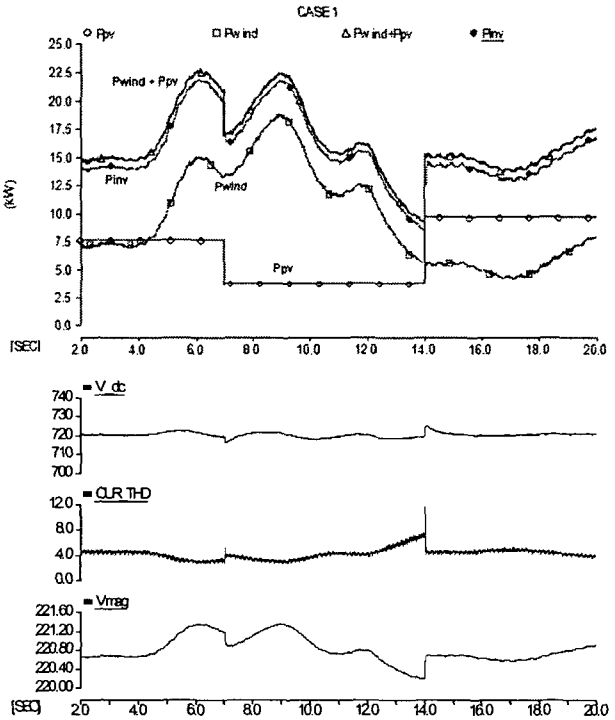


그림 15 일반운전모드 모의결과

Fig. 15 Simulation result of normal operation mode

3.2.2 급전운전모드 모의결과

그림 16은 급전운전 모드 시 모의결과이다. 10[kW]로 설정했다가 10초 순간에 20[kW]로 지령하였다고 가정한다. 연계 인버터는 풍력 및 태양광 출력 변동에 관계없이 일정한 출력을 내고 있으며 풍력과 태양광 출력이 인버터 출력 지

령치보다 작을 경우, 배터리는 방전모드(BESS_M =0)로 동작하고, 인버터 출력 지령치 보다 클 경우, 충전모드(BESS_M = 1)로 동작하여 잉여 전력을 배터리에 저장한다. 배터리 출력곡선을 보면 충방전량이 풍력 및 태양광 출력과 인버터 출력 차이를 정확하게 보상해주고 있다. 직류전압은 배터리가 충전모드 시 상한을 유지하고 있으며, 방전 모드 시 하한으로 유지되고 있다. 배터리 충방전 모드의 빈번한 전환이 요구되지 않아서 배터리에 큰 무리를 주지 않고 안정적으로 운전이 가능하다. 전류 종합왜형률은 하이브리드 시스템 출력에 반비례하며, 접속점 전압은 출력에 비례하여 변동했다.

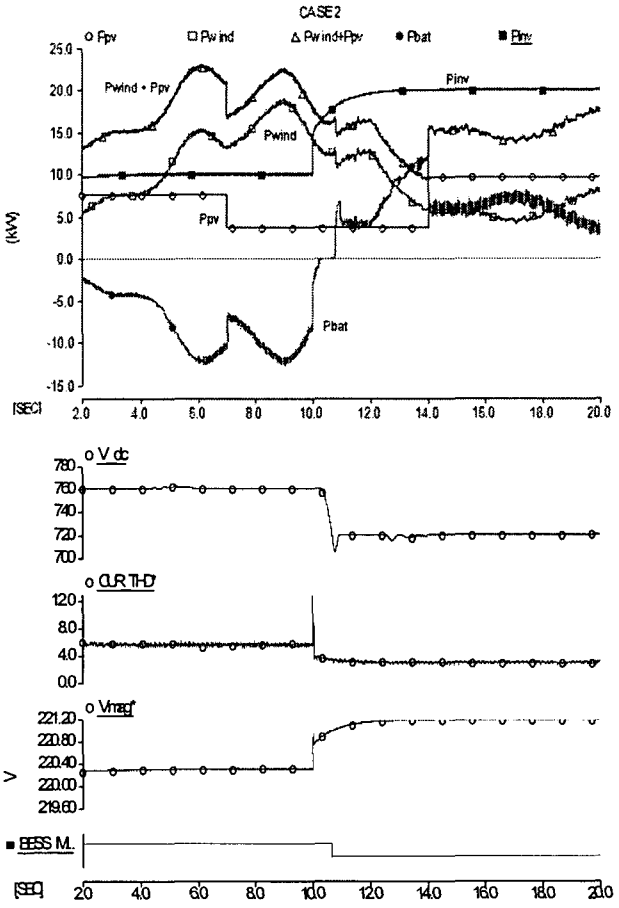


그림 16 급전운전모드 모의결과
Fig. 16 Simulation result of dispatching operation mode

3.2.3 출력평활모드 모의결과

그림 17은 출력평활모드 시 운전결과이다. 저역필터의 시간지연을 3초로 설정하였다. 일반운전 모드와 비교하여 연계 인버터 출력(Pinv)이 완만해졌다. 배터리 출력(Pbat)은 태양광과 풍력의 출력 합이 인버터 출력보다 큰 구간에서 충전모드로 운전되고 있으며, 반대로 인버터 출력이 큰 구간에서는 방전모드로 운전되고 있다. 직류전압은 충전구간에서는 상한 값을 초과하지 않도록 유지되며, 방전구간에서는 하한 값을 초과하지 않도록 유지되고 있다. 평활화된 하이브리드 시스템 출력으로 인하여 전류의 종합왜형률과 접속점 전압 변동이 상당히 완만해졌다. 급전모드와 마찬가지로 배터리 충방전 모드가 지나치게 빈번하게 전환되지 않으므로 배터리에 큰 무리를 주지 않고 안정적으로 운전이 가능하다.

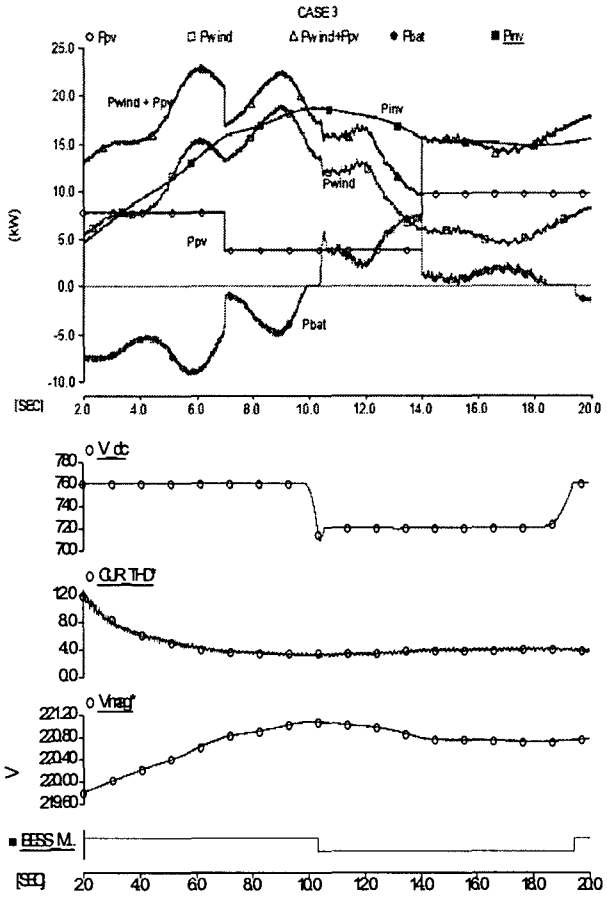


그림 17 출력평활모드 모의결과
Fig. 17 Simulation result of power smoothing operation mode

4. 결 론

계통연계 운전형 풍력, 태양광 및 축전지 하이브리드 시스템의 출력제어 방식을 제안하였다. 제안된 시스템은 운전목적에 따라 일반운전, 급전운전 및 출력평활운전으로 구분된다. 개별전원 및 전체 하이브리드 시스템 운전 및 제어 특성과 운전모드에 따른 하이브리드 시스템 출력특성을 모의하고 고찰하였다. 계통연계 인버터나 BESS의 제어전략에 관계없이 태양광 및 풍력발전의 상호 독립적인 최대출력제어가 가능하며, BESS 충방전을 통한 에너지 완충작용과 계통연계 인버터의 적절한 출력제어를 통하여 급전모드 및 출력평활모드로 운전을 수행하였다. 시뮬레이션을 통하여 제안된 하이브리드 시스템은 태양광 및 풍력의 신재생에너지 이용효율을 최대화하면서 계통으로 보다 유연한 또는 안정적인 전력공급이 가능함을 검증하였다. 그러나 이러한 기능적인 이점이 있으나, 실용화를 위해서는 고가의 BESS 등으로 인한 경제성 문제 해결 등이 숙제로 남아 있으며, 비용적인 약점을 극복하기 위하여 시스템 최적 용량 산정, 다양한 지능형 기술 적용 등을 통하여 비용 최소화와 기능 최대화를 위한 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 전력산업연구개발사업의 연구비에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] B. S. Borowy and Z. M. Salameh, "Dynamic Response to a Stand-alone Wind Energy Conversion System with Battery Energy Storage to a Wind Gust", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 12, No. 1, pp. 73-78, March 1997.

[2] F. Valenciaga, P. F. Puleston, and P. E. Battaiotto, "Power Control of a Solar/Wind Generation System without Wind Measurement: A Passivity/Sliding Mode Approach", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 18, No. 4, pp. 501-507, December 2003.

[3] R. Chedid and S. Rahman, "A Decision Support Technique for the Design of Hybrid Solar-Wind Power Systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 13, No. 1, pp. 76-83, March 1998.

[4] R. Chedid and S. Rahman, "Unit Sizing and Control of Hybrid Wind-Solar Power Systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 12, No. 1, pp. 79-85, March 1997.

[5] M. J. Khan and M. T. Iqbal, "Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system", Renewable Energy 30 (2005), pp. 421-439.

[6] F. Bonanno, A. Consoli, A. Raciti, B. Morganna, and U. Nocera, "Transient Analysis of Integrated Diesel-Wind-Photovoltaic Generation Systems", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 14, No. 2, pp. 232-238. June 1999.

[7] 설승기, *전기기기 제어론*, 홍릉과학출판사, 한국, 2002년.

[8] 한국전기연구원, *자율적 수요관리형 Microgrid 개발*, 과학기술부, 2006년

[9] Z. Lubsony, *Wind Turbine Operation in Electric Power Systems,* Springer-Verlag, Germany, 2003.

[10] Mukund R. Patel, *Wind and Solar Power Systems.* CRC Press, USA, 1999.

[11] 김슬기, 김응상, "계통연계형 가변속 풍력발전방식의 PSCAD/EMTDC 모의 및 해석", 대한전기학회 논문지 52B권 8호, 2003년 8월, pp. 413-420.

[12] Minwon Park and In-Keun Yu, "A Novel Real-Time Simulation Technique of Photovoltaic Generation Systems Using RTDS", *IEEE Trans. on Energy Conversion,* Vol. 19, No. 1, pp. 164-169, March 2004.

[13] L Zhang, A Al-Amoudi, Yunfei Bai, "Real-time Maximum Power Point Tracking for Grid-Connected Photovoltaic Systems", Power Electronics and Variable Speed Drives, 18-19 September 2000, Conference Publication No. 475.

[14] W. A. Lynch, "Ni-Cd Battery Modeling, Evaluation, and Applications in Electric Car", Doctoral Dissertation, University of Massachusetts Lowell, Lowell, MA, June 1996.

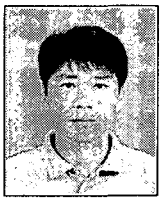
저 자 소 개

김 슬 기 (金 슬 기)

1972년 5월 7일생. 1998년 고려대학교 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원.
Tel : 055-280-1332,
E-mail : blksheep@keri.re.kr

전 진 홍 (全 鎭 洪)

1972년 12월 16일생. 1995년 성균관대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원.
Tel : 055-280-1355
E-mail : jhjeon@keri.re.kr



조 창 희 (趙 昌 熙)

1967년 2월 4일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 선임연구원.
Tel : 055-280-1473
E-mail : chcho@keri.re.kr

안 종 보 (安 鍾 普)

1961년 8월 16일생. 1986년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1995년 한국과학기술원 제어 및 자동화 설계공학과 졸업(석사). 1986년~1996년 이천전기공업(주) 중앙연구소 근무. 2004년 부산대학교 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기연구원 신재생에너지 연구그룹 그룹장.
Tel : 055-280-1306
E-mail : jbahn@keri.re.kr