

에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 풍력발전시스템의 출력제어 기법

논 문
59-10-3

Power Output Control of Wind Generation System Through Energy Storage System and STATCOM

김 종 율[†] · 박 준 호^{*}
(Jong-Yul Kim · June Ho Park)

Abstract - Utilization of renewable energy is becoming increasingly important from the viewpoints of environmental protection and conservation of fossil fuel. However, the generating power of renewable energy is always fluctuating due to the environmental status. This paper presents a scheme for supervisory control of wind generation system with the energy storage and STATCOM to reduce the power variation. In this paper, we especially concentrate on constant power output control of wind generation system. In order to achieve this purpose, the coordinated control strategy between different types of energy storage system and reactive power compensation device. The proposed control scheme has been validated by PSCAD/EMTDC simulation. As a result, the proposed scheme can handle the power output of wind generation system with a constant value.

Key Words : Wind generation system, Energy storage system, STATCOM, Power output control

1. 서 론

지구 온난화와 기상이변의 환경문제, 화석연료 고갈과 유가 변동의 에너지·경제 문제 및 탄소가스 배출 의무감축과 같은 대외적인 환경변화로 인해 신재생에너지의 개발과 적용에 대한 필요성 및 인식이 급격히 증대되고 있다. 신재생에너지 도입비율을 높이기 위하여 실행 중인 신재생에너지 발전차액보전 제도와 2012년부터 시행될 예정인 신재생에너지 의무할당제(RPS, Renewable Portfolio Standards) 등으로 인하여 에너지사업으로써 신재생에너지 발전에 대한 관심과 투자가 급증하고 있다. 신재생에너지원 중에서도 풍력발전은 발전단가가 저렴하고 소요면적이 작아 많은 도입이 이루어져 유럽의 일부 국가는 전체 발전량의 30% 정도를 풍력발전으로 사용하는 경우도 있다. 우리나라도 2006년 이후 연 20%씩 급증하고 있는 추세에 있으나 풍력발전은 바람과 같은 자연조건에 따라 출력이 변동하기 때문에 이러한 대규모 계통연계는 대규모화에 따른 출력변동의 증대, 특정 지역에 대한 도입량의 집중 및 계통의 단말부에 대한 연계 등의 계통조건에 따라 연계점 근처에서의 전압변동이나 계통 전체에서의 주파수 변동을 발생시키는 원인이 될 수 있다[1,2]. 우리나라의 경우 제주도, 대관령, 영덕 등을 중심으로 풍력발전 설치가 적극적으로 진행되고 있다. 그 중에서도 제주도는 바람자원이 우리나라에서 가장 풍부하여 많은 발전사업자들이 제주지역에서의 발전 사업을 원하고 있다. 그러나

제주도는 육지계통과 HVDC로 연계되어 있으며 HVDC의 고장 혹은 유지 보수 기간에는 고립된 계통으로 운영이 되고 있다. 제주도가 이러한 계통 특성을 가지고 있기 때문에 울릉도와 마찬가지로 일정 용량 이상의 풍력발전기의 운영은 제주 계통의 안정도 및 주파수 유지에 심각한 문제가 일으킬 우려가 있어 풍력 발전 도입량이 제한되고 있다. 대규모 풍력 발전기의 계통연계 운전이 이러한 문제점을 가지고 있음에도 불구하고 유럽의 일부 국가는 전체 발전량의 30% 정도를 풍력발전으로 사용하는 것이 가능한 이유는 크게 두 가지 정도로 생각할 수 있다. 첫째로 수력발전 등 풍부한 예비 발전력과 국가간 계통연계가 이루어져 풍력발전의 출력 변동에 따른 전력 수급 문제를 해결할 수 있는 방안이 마련되어 있기 때문이며, 둘째로 많은 운영 경험을 통해서 풍력발전 계통연계규정에 기존의 대형발전소들이 단순히 계통에 전력을 공급하는 것 외에 전력 시스템의 안정성 유지를 중요한 역할로 수행하는 것처럼 풍력발전 단지도 유·무효전력제어를 포함한 제어능력을 확보하도록 강제하고 있기 때문이다[3-7]. 따라서 계통의 안정성을 확보하면서 풍력발전 도입량을 증가시키기 위해서는 풍력발전 설비가 일반 발전기와 유사하게 전력 시스템의 안정성 유지를 기능을 수행할 수 있도록 유·무효전력제어를 포함한 제어능력을 확보하는 것이 필수적이다. 최근들어 이와같이 에너지저장장치 혹은 무효전력보상장치를 이용하여 풍력발전기 출력을 제어하고자 하는 연구가 국내외에서 진행되고 있다[8-11]. 본 논문에서는 현재 제주도 스마트그리드 실증사업의 일환으로 추진하고 있는 에너지저장장치 및 무효전력보상장치를 이용한 풍력발전기 출력 제어 기법에 대한 기술적 예비 타당성을 검토하였다. 제안한 기법의 타당성을 검증하기 위해 제주 월정리에 구축하고 있는 실증시스템을 대상으로, PSCAD/EMTDC 모델링 및 시뮬레이션 해석을 수행하였다.

[†] 교신저자, 정회원 : 한국전기연구원 SG 연구본부 선임연구원
E-mail : jykim@keri.re.kr

^{*} 펠로우회원 : 부산대학교 전자전기공학부 교수
접수일자 : 2010년 8월 6일
최종완료 : 2010년 9월 20일

2. 실증시스템 개요

2.1 실증시스템 구성

제주 월정리 실증단지에 구축하고자하는 풍력발전 시스템의 구성은 아래 그림 1과 같다. 실증시스템은 풍력발전의 유·무효전력 제어를 위하여 기존의 월정단지 풍력발전기에 유효전력 보상을 위한 에너지저장장치, 무효전력 보상을 위한 전력품질보상장치 및 전체 발전시스템의 제어 및 종합운영센터(TOC: Total Operation Center)와의 연계를 위한 EMS(Energy Management System)의 요소기기로 구성되어 있다. 이러한 시스템 구성을 이용하여 풍력발전 사업자의 입찰시장에의 참여, 계통 신뢰도 및 전력품질 향상에 기여할 수 있는 보조서비스 제공 등의 기술적 항목을 실증하고자 한다.

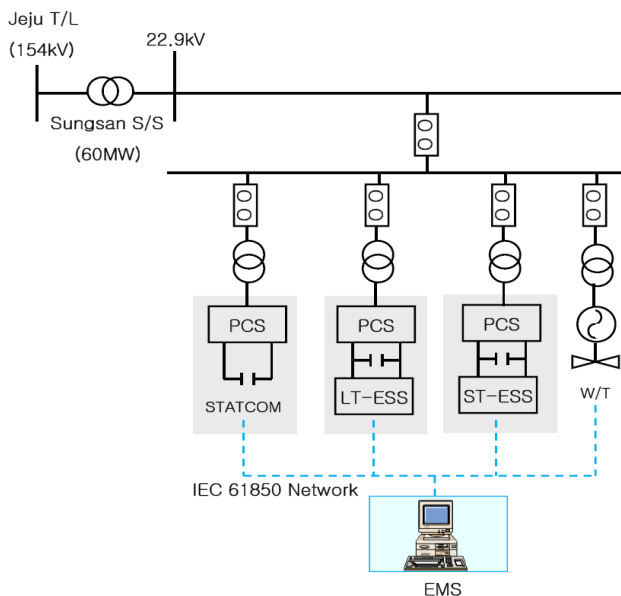


그림 1 실증시스템 구성

Fig. 1 Configuration of test system

그림 1의 구성도에 제시된 요소기기의 주요한 사양 및 기능은 다음과 같다.

- 에너지저장장치(ESS: Energy Storage System)
 - 장주기 에너지저장장치(L/T ESS)
 - : 리튬-폴리머, 용량 1MWh(1MW*1h)
 - 단주기 에너지저장장치(S/T ESS)
 - : 리튬-이온, 용량 250kWh(1MW*15min)
- 무효전력보상장치
 - 정지형 동기보상장치(STATCOM) : 용량 500kVA
- EMS
 - 전체 시스템 상태감시 및 제어

- 입찰참여 및 급전지시 이행을 위한 기본종합운영센터 (TOC)와의 통신연계

- 통신네트워크

- IEC 61850 기반 유선망

2.2 실증시스템 운전방안

기본종합운영센터(TOC)와 연계한 전력거래 서비스 및 각 구성 요소기기의 운전 방안에 대하여 기술하면 다음과 같다. 현대중공업 콘소시엄이 월정리 실증단지에서 실증하고자 하는 풍력발전 시스템의 운전 방안은 크게 풍력발전시스템의 전력거래 참여방안 및 보조서비스 운영방안으로 구성된다.

가. 입찰시장 참여방안

- 1일전 입찰시장에 참여
- 계통운영자의 급전지시에 따른 출력발생
- 전력시장 정산절차에 따른 수익창출
- 에너지저장장치를 이용하여 급전가능 전원으로 운영

나. 보조서비스 운영방안

- 무효전력 공급 서비스
- 에너지저장장치 및 무효전력 보상장치를 이용하여 계통 운영자의 요구에 따라 무효전력 제어
- 풍력발전을 무효전력 관점에서의 급전 가능한 전원으로 활용할 수 있음
- 전체 계통 전압제어 능력에 기여

3. 풍력발전시스템 출력제어를 위한 에너지저장장치 및 STATCOM 운전/제어 방안

에너지저장장치 및 STATCOM을 이용하여 풍력발전시스템의 출력을 제어하는 방안은 전력계통 운영형태 및 시장제도에 따라 여러 가지 가능한 형태가 존재하지만, 본 검토에서는 상기 언급한 전력시장 참여 및 보조서비스 관점에서의 무효전력 보상 방안을 전제로 하였다. 이 방안은 급전 하루전(D-1)에 급전일(D-day)의 발전 스케줄을 전력거래소(KPX)에 제출함으로써 입찰에 참여하고, 실제 급전 당일은 풍력발전 출력을 입찰 결과에 일치하도록 운영하여야 한다. 그러나, 다음 날에 대한 풍력발전 출력예측은 필연적으로 일정한 오차를 가지게 되므로, 그림 2와 같이 예측오차를 에너지저장장치를 통하여 보상해 주어야 한다. 또한, 에너지저장장치를 통해 풍력발전시스템의 급격한 출력변동이 계통에 악영향을 미치지 않도록 출력변동을 완화하는 기능도 함께 수행되어야 한다. 아울러, 농형 유도발전기를 사용하는 경우, 계통으로부터 항상 발전출력에 비례한 무효전력을 흡수하게 되는데, 이를 STATCOM 및 에너지저장장치를 활용하여 연계점에서의 무효전력을 능동적으로 제어할 수 있도록 하여야 한다.

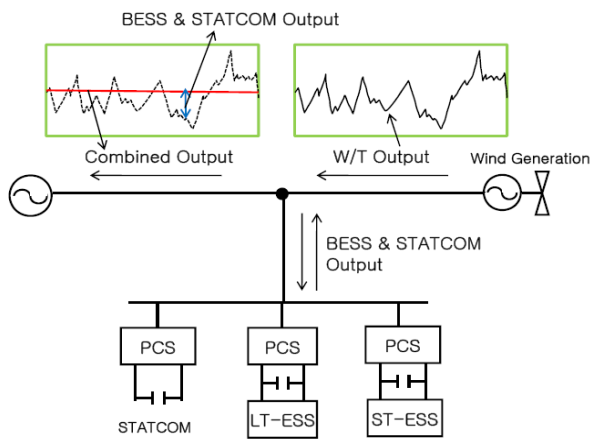


그림 2 에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 풍력발전 출력제어

Fig. 2 Power output control of wind generation system through energy storage system and STATCOM

특성이 다른 복수개의 에너지저장장치 혹은 에너지저장장치와 무효전력보상 장치를 이용하여 상기의 제어를 수행할 경우 그림 3과 같이 상위 통합제어장치에서 이들 각 기기들의 특성 및 운전상태를 고려한 협조제어 기능이 요구된다.

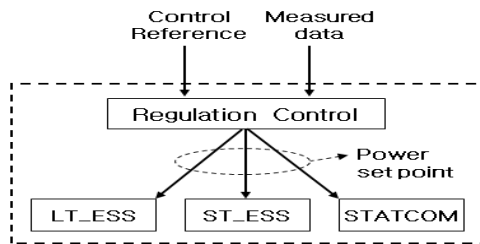


그림 3 실증시스템 통합제어 개념

Fig. 3 Control scheme of test system

그림 4에서는 풍력발전 시스템 연계점 유,무효 제어를 위한 세부 알고리즘을 나타내고 있다. 연계점의 유효전력 명령치와 실제 유효전력의 오차를 PI제어기의 입력으로 이용하게 되고, 제어기의 출력값은 각각 High-Pass Filter(HPF) 및 Low-Pass Filter(LPF) 거쳐 Long-Term 및 Short-Term 에너지저장장치의 유효전력 명령치로 분배되어 전달된다. 즉, HPF를 통해 상대적으로 높은 주파수 대역을 가진 출력변동 성분을 추출하고, 이를 Short-Term 에너지저장장치를 통해 보상하게 된다. 반대로, LPF를 통해서 낮은 주파수 대역의 예측 오차성분을 도출하여 Long-Term 에너지저장장치를 통해 보상하도록 한다. 무효전력은 유효전력과 동일하며, 개별 기기로의 명령치는 상위 PI제어기 출력값에 분배계수(Participation Factor)를 곱하여 결정된다.

단, 분배계수는 1순위로 STATCOM의 무효전력 보상능력을 활용하고, 부족할 경우 Long-Term 및 Short-Term 에너지저장장치의 무효전력 가용량을 이용하여 식 (1)~(3)과 같이 선정하였으며, 그림 5에서는 이러한 과정의 전체 흐름도를 보여주고 있다.

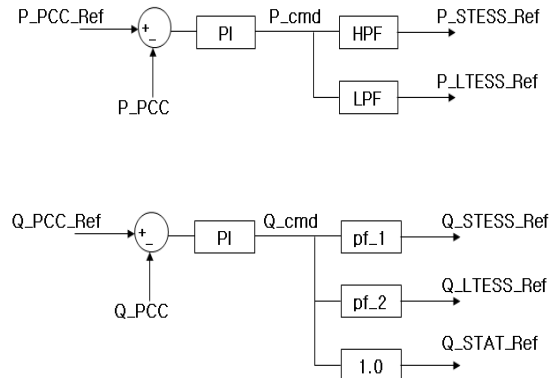


그림 4 풍력발전 유,무효 출력제어 알고리즘

Fig. 4 Power output control algorithm for wind generation system

$$ESS_i_Q_Mar = \sqrt{(S_i^2 - P_i^2)} \quad (1)$$

$$Total_Q_Mar = \sum_{i=1}^n ESS_i_Q_Mar \quad (2)$$

$$pf_i = \frac{ESS_i_Q_Mar}{Total_Q_Mar} \quad (3)$$

여기서, $ESS_i_Q_Mar$ 는 i 번째 에너지저장장치의 무효전력 가용량, S_i 는 i 번째 에너지저장장치의 MVA용량, P_i 는 i 번째 에너지저장장치의 유효전력 출력, $Total_Q_Mar$ 는 에너지저장장치 전체 무효전력 가용량, pf_i 는 i 번째 에너지저장장치의 분배계수 이다.

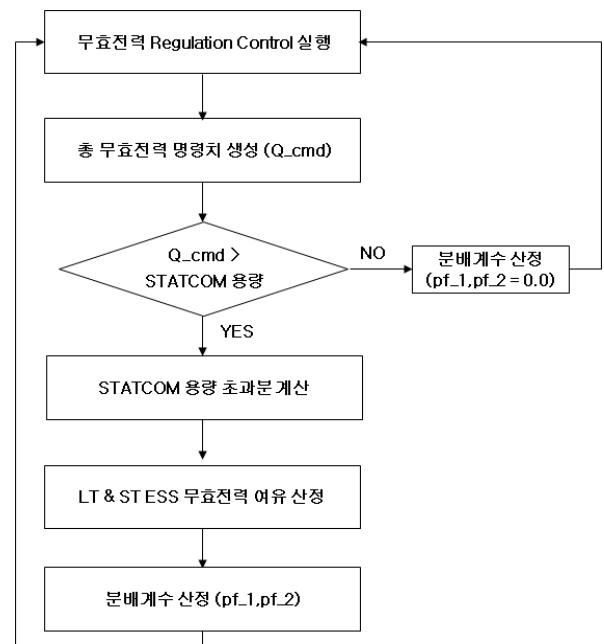


그림 5 무효전력 제어 흐름도

Fig. 5 Flowchart of reactive power control

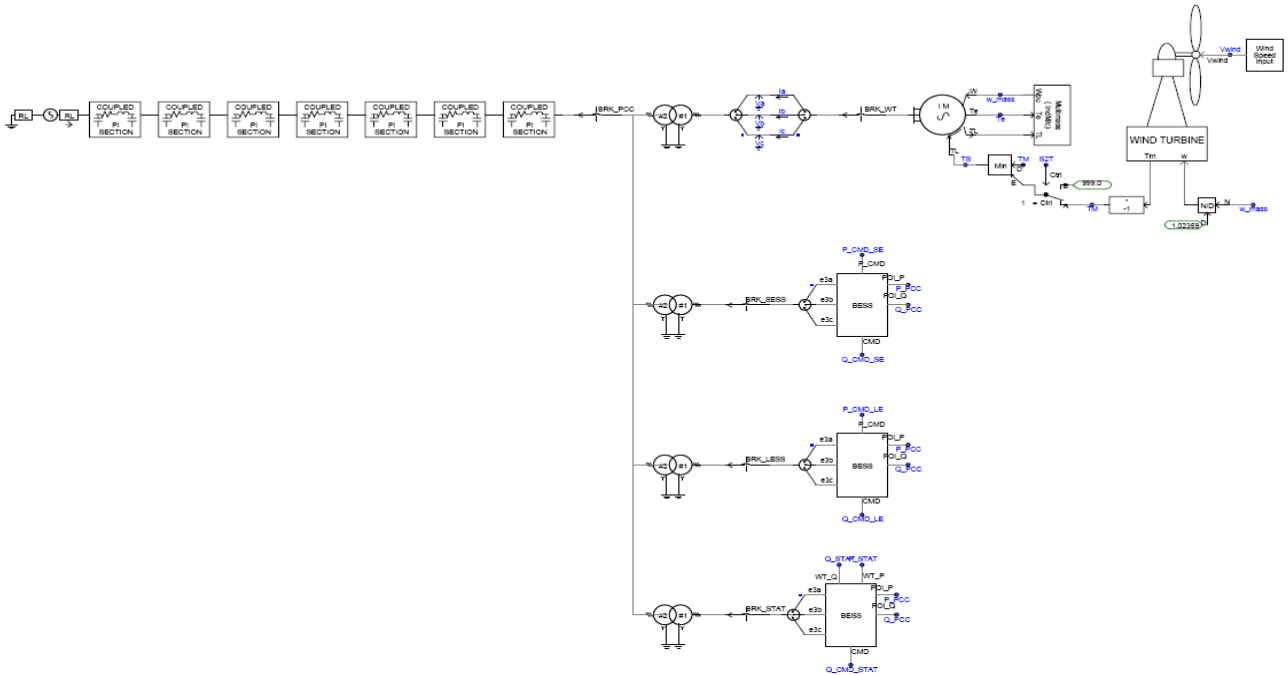


그림 6 실증시스템 PSCAD/EMTDC 모델
Fig. 6 PSCAD/EMTDC model for test system

4. PSCAD/EMTDC 모델링 및 시뮬레이션 검토

4.1 PSCAD/EMTDC 모델링

본 논문에서는 풍력발전 시스템의 효율적, 안정적 계통연계 운영을 위한 에너지저장장치(ESS) 및 STATCOM의 운전방안을 제시하고, 이에 대한 기술적 타당성을 계통해석 프로그램을 이용하여 검증하였다. 성능검증을 위한 모의해석은 PSCAD/EMTDC 프로그램을 이용하였으며, 모의 시스템의 각종 변수는 실제 데이터를 기반으로 하였으며, 실제 데이터가 없는 경우는 일반적인 Typical 값을 사용하였다. 현재 연구단계에서 검토목적이 상세한 기기 설계사양 검증보다는 실증시스템의 구성 및 운전방안에 대한 기술적 가능성 및 타당성을 검증하는데 있으므로, 본 검토에서는 이를 반영하여 정량적 분석과 더불어 정성적인 분석에 중점을 두고 모의해석을 수행하였다.

가. 실증시스템 모의

그림 6은 PSACAD/EMTDC로 모의된 실증시스템 해석모델이다. 실증시스템 모델은 크게 등가 교류전원, 선로모델, 풍력발전, Long-Term 및 Short-Term 에너지저장장치, 무효전력보상장치로 구성되어 있다.

1) 교류계통

교류계통은 성산 S/S 상위계통과 22.9kV 만장 D/L로 모의하였으며, 성산 S/S 상위계통은 그림 7과 같이 등가전압 및 등가 임피던스로 표현되는 3상 등가전원으로 모의하였다.

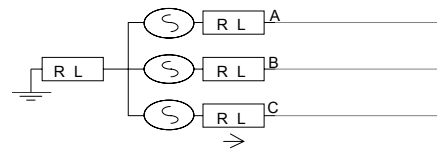


그림 7 등가전원 모델
Fig. 7 Equivalent voltage source model

표 1 등가전원 파라미터
Table 1 Parameters of equivalent voltage source

항목	데이터
등가전압 [kV]	22.9
위상 [deg]	0
정상분 임피던스 [ohm]	0.0479+j2.4611
영상분 임피던스 [ohm]	j2.5097

2) 배전선로

만장 D/L은 공장이 25.8km로서 가공 및 지중 구간이 혼재되어있다. 본 검토에서는 가공/지중, 선종 등에 따라 총 7개의 구간으로 나누어 모의하였으며, 각 구간은 그림 8과 같은 π 선로모델로 나타내었다. 각 선로모델에 입력되는 데이터는 표 2와 같다.

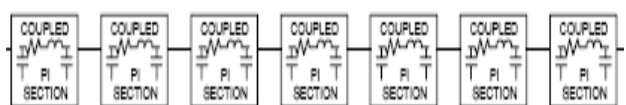


그림 8 만장 D/L 선로모델
Fig. 8 Equivalent line model for Manjang D/L

표 2 선로모델 파라미터

Table 2 Parameters of equivalent distribution line model

구간	항목	길이 [km]	정상분임피던스 [%/km]	영상분임피던스 [%/km]
구간-1		1.0	5.74+j7.90	13.22+j24.58
구간-2		0.085	1.79+j2.84	5.32+j1.73
구간-3		11.954	3.5+j7.74	9.58+j9.61
구간-4		9.362	5.76+j8.08	11.84+j19.95
구간-5		1.26	3.54+j8.02	9.62+j19.88
구간-6		1.119	5.97+j8.39	13.38+j20.9
구간-7		1.029	9.23+j8.36	16.62+j20.76

3) 풍력발전시스템

그림 9는 실증시스템에 설치된 1.5MW급 풍력발전시스템 모델을 나타내고 있으며, 크게 풍력터빈, 유도발전기, 연계변압기로 구성되어 있다. 풍력발전기는 일반 농형 유도발전기이며, 발전기 측은 기어박스를 통해 로터와 물려있다. 기어박스와 회전축의 동특성은 multi-mass torsional shaft 모델을 이용하여 표현하였다. 연계변압기는 풍력발전기 단자 전압을 22.9kV 전압으로 승압하여 배전망에 연결하는 역할을 수행하게 되며, 세부 데이터는 아래 표와 같다.

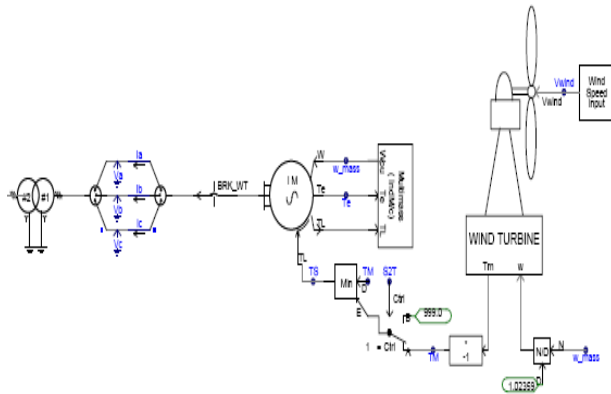


그림 9 풍력발전시스템 모델

Fig. 9 Wind generation system model

4) 에너지저장장치 및 STATCOM

표 5에서는 에너지저장장치와 STATCOM의 기본사양을 나타내고 있으며, 에너지저장장치는 유,무효 전력보상을 위한 Long-Term 및 Short-Term용 BESS 시스템으로 구성되어 있고, 무효전력보상을 위해 1대의 STATCOM이 설치되어 있다. 본 검토의 목적이 에너지저장 매체의 상세 모델링 및 동특성 해석이 아니라 계통관점에서 풍력발전과 연계 운전되는 이들 장치의 기술적 효과를 검증하는데 있으므로, 에너지저장 매체에 대한 세부모델은 생략하였다. 대신 DC 링크 전압이 항상 일정하게 유지된다는 전제하에, 계통연계용 전력변환장치 모델만을 고려하였다. 계통연계용 전력변환장치의 상세 스위칭 모델은 IGBT 소자를 갖는 PWM 컨버터로 모의가능하나, 본 검토에서는 기본 타당성을 검증하는 관점에서 상세 스위칭 모델 대신 그림 10과 같은 등가 전류

원 모델을 사용하였다. STATCOM의 경우도 에너지저장장치와 동일하게 등가 전류원 모델로 표현하였으며, 그림 11에서는 전류원 모델로 표현된 계통연계용 전력변환장치의 유,무효 출력제어 블록을 도시하고 있다.

표 3 풍력발전기 파라미터

Table 3 Parameters of wind generator

기기	항목	데이터	항목	데이터
풍력터빈	정격용량 [kW]	1,500	정격풍속 [m/s]	13
	블레이드 길이 [m]	34	시동풍속 [m/s]	3
	정격회전속도 [rpm]	17.08	중단풍속 [m/s]	25
	공기밀도 [kg/m ³]	1.225	-	-
발전기	유형	농형유도발전기	관성정수 [kgm ²]	40
	정격용량 [kW]	1,500	정격역률	0.9
	정격회전속도 [rpm]	1,832	정격효율 [%]	96.2
	정격출력전압 [V]	690	시동전류 [%]	425
	정격출력전류 [A]	1,400	시동토크 [%]	72
	정격주파수 [Hz]	60	최대토크 [%]	215
	정력슬립 [%]	1.8	극수	4

표 4 변압기 파라미터

Table 4 Parameters of transformer

항목	데이터
정격용량 [kVA]	1,6009
정격전압(1차/2차) [V]	690/22,900
결선방식	Y-Y 결선
% 임피던스 [%]	5.91

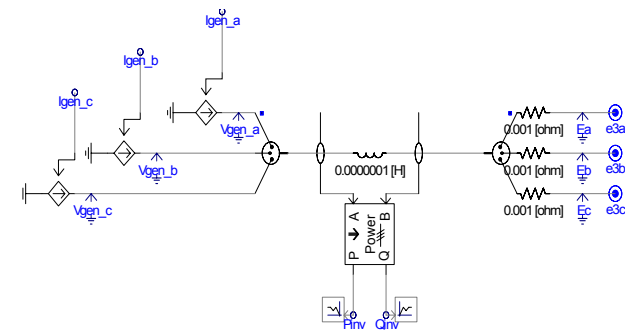


그림 10 에너지저장장치 및 STATCOM 등가전류원 모델

Fig. 10 Equivalent current source model for ESS and STATCOM

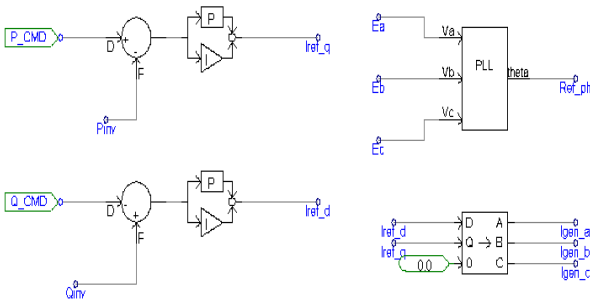


그림 11 전력변환장치 유,무효 출력제어 블록
 Fig. 11 Active and reactive power control block of power electronic device

표 5 에너지저장장치 및 STATCOM 사양
 Table 5 Specifications of ESS and STATCOM

기기	LT-BESS	ST-BESS	STATCOM
배터리 종류	Li-Po	Li-Ion	-
배터리용량 [MWh]	1	0.25	-
PCS 용량 [MVA]	1	1	0.5
정격전압 [kV]	3.3	0.38	0.44
연계변압기 [kV]	3.3/22.9	0.38/22.9	0.44/22.9

4.2 모의해석 결과

에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 풍력발전 시스템의 유,무효 제어 방안에 대한 기본적인 시뮬레이션 검토를 수행하였으며, 각 모의사례에 대한 세부조건은 아래 표 6과 같다. 본 시뮬레이션 검토에 사용된 풍속데이터는 현재 운전 중인 양양 풍력발전기의 풍속데이터를 활용하였으며, 데이터 샘플링 주기는 1Hz 이다. 실증시스템 통합제어장치와 세부 구성 기기간의 데이터 취득 및 제어신호 전달은 SCADA 시스템을 이용하게 되며, 전송되는 데이터는 일정 시간 동안의 Delay를 가지게 된다. 본 시뮬레이션에서는 보상기기의 정성적인 적용효과를 부각하는데 주안점을 두고 10msec 정도의 작은 지연만을 가정하였다.

표 6 모의사례별 조건
 Table 6 Conditions of studied cases

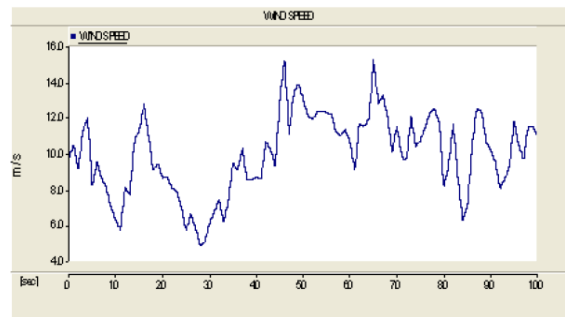
Case	항목	연계점 전력기준치 (MW,MVar)	보상장치 적용여부	
			ESS	S/C
Case-1	기본 출력특성	-	×	×
Case-2	유효전력제어	1MW	○	×
Case-3		1MW → 0MW	○	×
Case-4	무효전력제어	-0.5MVar	×	○
Case-5		1MW+j 0.5MVar	○	○

*) S/C : STATCOM

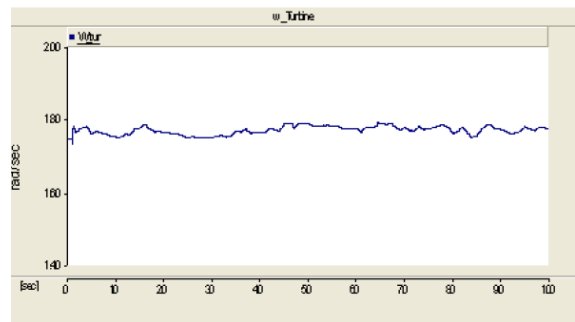
(Case-1) 기본 출력특성

Case-1에서는 앞서 기술한 PSCAD/EMTDC 모델을 이용하여 1.5MW 유도발전기형 풍력발전시스템의 출력특성을 모의하고 결과를 검토하였다. 그림 12(a)의 풍속이 입력될 때 시스템 각 구성요소에서의 응답특성을 살펴보면, 그림 12(b)에서는 풍속변동에 따른 풍력터빈 회전속도의 변화, 그림 12(c)에서는 터빈속도 변화에 대한 출력계수 값을 보여준다.

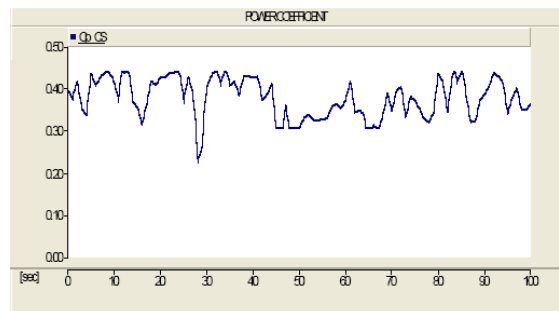
여기서, 터빈 회전속도는 1.8rad/sec 부근에서 거의 유지가 되는 반면, 출력계수는 0.25~0.44 사이에서 계속 변동하게 되는데, 이는 농형 유도발전기의 경우 구조적으로 가변속이 아닌 고정속으로 운전되기 때문에 항상 최대출력점에서 운전하지 못하기 때문이다. 그림 12(c)에서는 풍력발전시스템 유,무효 전력을 나타내고 있으며, 풍속변화에 따라 유효전력이 급격히 변동하고, 풍력발전 시스템에서 소비되는 무효전력도 -0.3Mvar~-0.8Mvar까지 변동하고 있음을 확인할 수 있다.



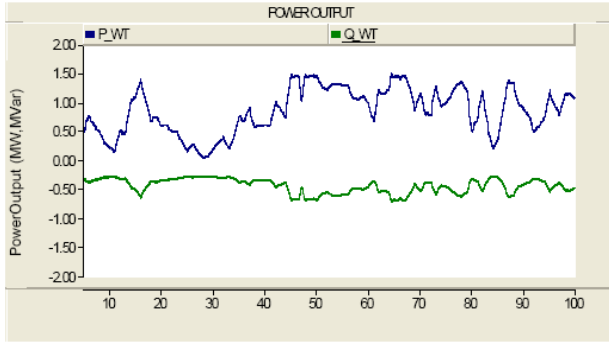
(a) 풍속 (m/sec)
 (a) Wind speed (m/sec)



(b) 풍력터빈 회전속도 (rad/sec)
 (b) Generator speed (rad/sec)

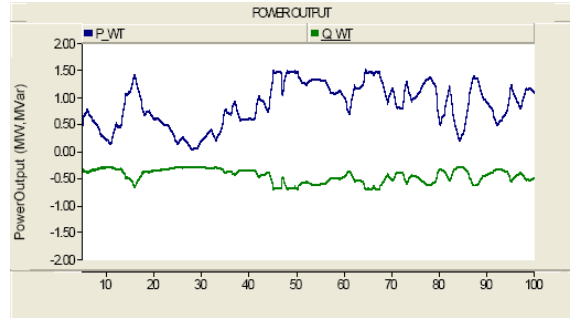


(c) 풍력터빈 출력계수
 (c) Power coefficient of wind turbine



(d) 풍력발전시스템 유,무효 전력

(d) Active and reactive power of wind generation system



(a) 풍력발전시스템 유,무효 전력

(a) Active and reactive power of wind generation system

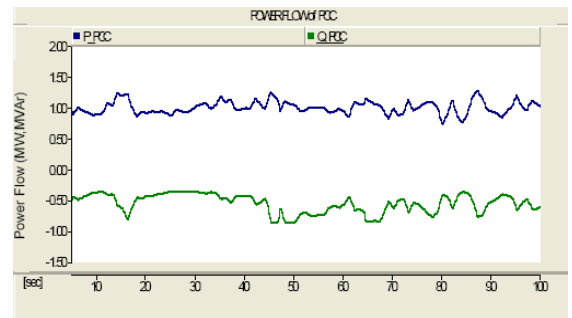
그림 12 시뮬레이션 결과 : Case-1

Fig. 12 Simulation results of Case-1

(Case-2 & Case-3) 에너지저장장치를 이용한 유효전력 제어

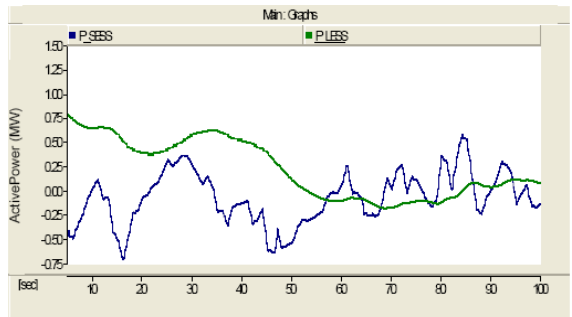
Case-2에서는 에너지저장장치를 이용한 유효전력 제어특성을 살펴보았다. 풍속은 앞선 Case-1과 동일한 데이터를 적용하였으며, 에너지저장장치의 출력명령치 배분을 위한 HPF 및 LPF의 시정수는 10sec로 선정하였다. 그림 13(a)는 풍력발전시스템 유,무효 전력, 그림 13(b)는 연계점의 유,무효 전력을 보여주고 있으며, 에너지저장장치의 출력보상으로 인해 연계점의 유효전력이 기준치(Ref = 1MW)를 잘 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 13(c)는 에너지저장장치의 유효전력을 나타내고 있으며, 연계점 유효전력을 기준치로 유지하기 위해 필요한 유효전력을 흡수 또는 방출하고 있다.

표 7에서는 에너지저장장치 적용 전,후의 연계점 유효전력 평균치를 검토한 결과이다. 보상장치 적용 전 평균전력은 0.8584MW로서 기준치 1MW 대비 약 -9% 정도 벗어난 반면, 보상장치 적용 후 기준치 대비 오차율이 약 +0.17%로서 유효전력 제어가 잘 이루어지고 있다. Case-3에서는 연계점의 유효전력 기준치를 초기 Ref=1MW에서 t=50sec 시점에 Ref=0MW로 변경한 경우의 응답특성을 살펴보았으며, 그림 14(a)에서 알 수 있듯이, 기준치를 잘 추종하고 있음을 확인할 수 있다. 그림 14(b)에서는 에너지저장장치의 유효전력을 나타내고 있으며, 연계점 유효전력을 기준치로 유지하기 위해 필요한 유효전력을 흡수 또는 방출하고 있다.



(b) 연계점의 유,무효 전력

(b) Active and reactive power at the PCC



(c) 에너지저장장치 유효전력

(c) Active power of ESS

그림 13 시뮬레이션 결과 : Case-2

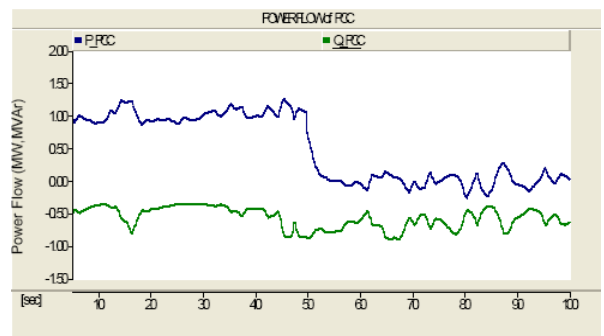
Fig. 13 Simulation results of Case-2

표 7 유효전력 제어결과

Table 7 Performance of active power control

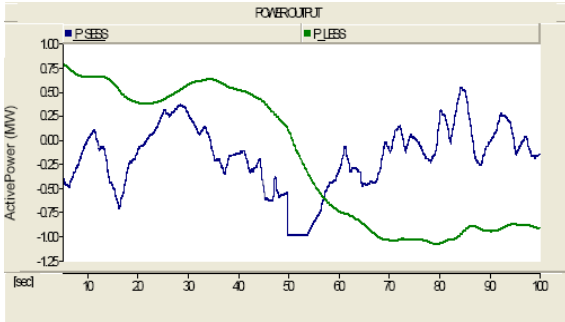
항목	ESS 적용전	ESS 적용후
기준치 [MW]	1	1
평균전력 [MW]	0.8584	1.0025
오차율 [%]	-9.43	+0.17

$$*) \text{오차율}(\%) = \frac{\text{평균전력} - \text{기준치}}{\text{풍력발전용량}} \times 100$$



(a) 연계점의 유,무효 전력

(a) Active and reactive power at the PCC

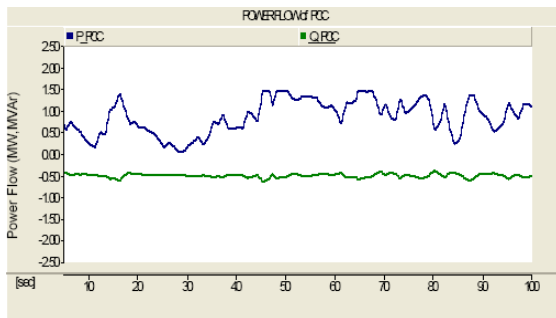


(b) 에너지저장장치 유효전력
(b) Active power of ESS

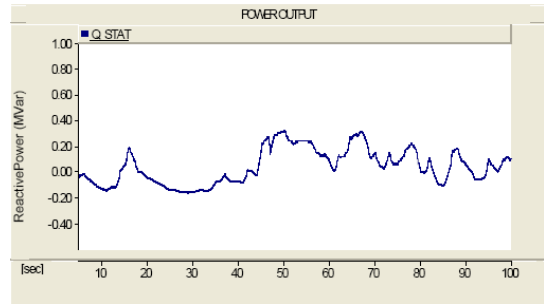
그림 14 시뮬레이션 결과 : Case-3
Fig. 14 Simulation results of Case-3

(Case-4 및 Case-5) 에너지저장장치 및 STATCOM을 이용한 무효전력 제어

Case-4에서는 STATCOM만을 이용한 무효전력 제어 특성을 살펴보았으며, 풍속은 앞선 Case-1과 동일한 데이터를 적용하였다. 그림 15(a)는 연계점의 유,무효전력, 그림 15(b)는 STATCOM의 무효전력을 나타내고 있다. 검토결과, 보상 전 $-0.3\text{MVar} \sim -0.8\text{MVar}$ 까지 변동하던 연계점의 무효전력이 STATCOM의 무효전력 보상으로 기준치(Ref = -0.5MVar)를 잘 유지하고 있음을 알 수 있다. Case-5에서는 STATCOM과 에너지저장장치의 무효전력 협조제어 특성을 살펴보았다. 연계점의 무효전력 제어가능 범위를 확대하기 위해서는 STATCOM 뿐만 아니라 에너지저장장치의 무효전력 가용량을 적극 활용하여야 하며, 이를 위해서는 상호간의 협조제어가 요구된다. 앞서 언급한 바와 같이 STATCOM이 우선적으로 무효전력을 보상하고 부족분이 발생할 경우 에너지저장장치가 추가로 보상하도록 하였다. 그림 16(a)에서는 연계점 기준치를 $\text{Ref}=1\text{MW}+j0.5\text{MVar}$ 로 설정하였을 경우의 연계점 유,무효전력을 나타내고 있으며, 그림 16(b) 및 16(c)에서는 에너지저장장치 및 STATCOM의 유,무효 전력을 보여주고 있다. 0.5MVar 의 무효전력을 일정하게 계통에 공급하기 위해 STATCOM은 최대용량인 0.5MVar 로 운전하고, 나머지 필요한 무효전력을 에너지저장장치에서 나누어 공급하고 있다. 또한, 연계점 유,무효 전력을 동시에 제어하더라도 상호간에 간섭 및 동요가 없이 독립적으로 원활한 제어가 수행됨을 알 수 있다.

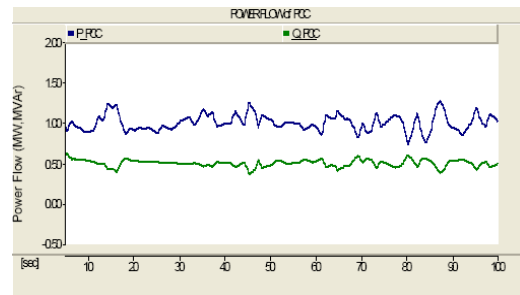


(a) 연계점의 유,무효 전력
(a) Active and reactive power at the PCC

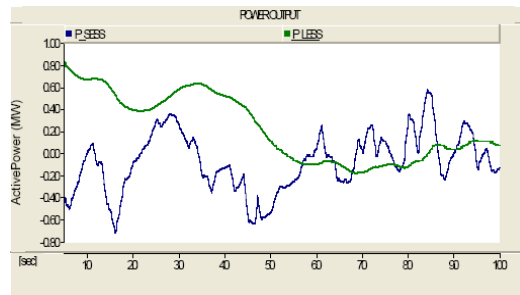


(b) STATCOM 무효전력
(b) Reactive power of STATCOM

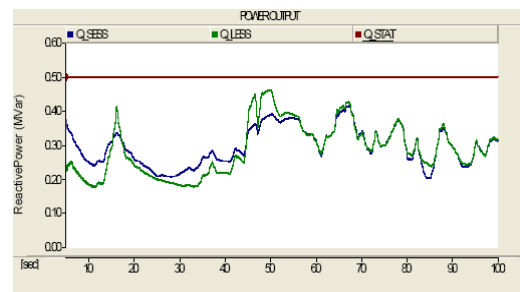
그림 15 시뮬레이션 결과 : Case-4
Fig. 15 Simulation results of Case-4



(a) 연계점의 유,무효 전력
(a) Active and reactive power at the PCC



(b) 에너지저장장치 유효전력
(b) Active power of ESS



(c) 에너지저장장치 및 STATCOM 무효전력
(c) Reactive power of ESS and STATCOM

그림 16 시뮬레이션 결과 : Case-5
Fig. 16 Simulation results of Case-5

5. 결 론

계통의 안정성을 확보하면서 풍력발전 도입량을 증가시키기 위해서는 풍력발전 설비가 일반 발전기와 유사하게 전력 시스템의 안정성 유지를 기능을 수행할 수 있도록 유·무효 전력제어를 포함한 제어능력을 확보하는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 현재 제주도 스마트그리드 실증사업으로 일환으로 추진 중인 에너지저장장치 및 STATCOM을 활용한 풍력발전시스템 출력제어 기법에 대한 기술적 기본 타당성을 검토하였다. 이를 위해 PSCAD/EMTDC를 이용하여 제주 월정리 실증시스템을 모델링하였으며, 각 장치의 협조제어를 위한 알고리즘의 가능성을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 검토결과, 에너지저장장치 및 STATCOM을 상호 협조제어 함으로써 효율적이고 효과적으로 풍력발전시스템의 유·무효 출력을 제어할 수 있는 것으로 나타났다. 향후에는 농형 유도발전기 타입 풍력발전시스템에 설치되어 있는 커패시터 뱅크를 함께 고려한 무효전력 협조제어 기법에 대한 연구가 추가로 필요할 것으로 보인다. 또한, 보다 구체적인 전력거래 및 보조서비스 전략을 바탕으로 에너지저장장치의 활용방안 등에 대한 연구와 실증운전 검토가 진행될 예정이다.

감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

[1] Z. Lubosny, "Wind turbine operation in electric power systems," Advanced modeling, New York: Springer-Verlag, 2003.

[2] E. Muljadi, C.P. Butterfield, J. Chacon, and H. Romanowitz, "Power quality aspects in a wind power plant," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun, pp. 18-22, 2006.

[3] I. Erlich and U. Bachmann, "Grid code requirements concerning connection and operation of wind turbines in Germany," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun, pp. 12-16, 2005.

[4] I. Erlich and W. Winter, and A. Dittrich, "Advanced grid requirements for the integration of wind turbines into the German transmission system," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun, pp. 20-24, 2006.

[5] NORDEX N90, Technical Description, N90-1tech-description-en.doc, 2005-04-19, NORDEX Energy GmbH.

[6] J.R. Saenz, A. Tapia, F. Jurado, X. Ostolaza, and I. Zubia, "Reactive power control of a wind farm through different control algorithms," in Proc. 4th

IEEE Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems, Oct, pp. 22-25, 2001.

[7] M. P. Palsson, T. Toftevaag, K. Uhlen, and J. O. G. Tande, "Control concept to enable increased wind power penetration," IEEE Trnas. Power Syst., vol. 20, no. 4, pp. 1958-1966, Nov, 2005.

[8] A. Joseph and M. Shahidhpour, "Battery storage systems in electric power systems," in Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, Jun, pp. 20-24, 2006.

[9] Z. Lubosny and J. W. Bialek, "Supervisory control of a wind farm", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 3, pp. 985-994, Aug, 2007.

[10] H. Gaztanaga, I. E. Otadui, D. Ocnasu, and S. Bacha, "Real-time analysis of the transient response improvement of fixed speed wind farms by using a reduced-scale STATCOM prototype", IEEE Trans. Power Syst., vol. 22, no. 2, pp. 658-666, May, 2007.

[11] C. Abbey and G. Joos, "Supercapacitor energy storage for wind energy applications", IEEE Trans. Industry Applications, vol. 43, no. 3, pp. 769-776, May, 2007.

저 자 소 개



김 종 울 (金鍾律)

1974년 07월 06일생, 1997년 부산대학교 전기공학과 졸업, 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 현재 한국 전기연구원 스마트그리드 연구본부 신재생에너지시스템 연구센터 선임연구원
Tel : 055-280-1336
Fax : 055-280-1390
E-mail : jykim@keri.re.kr



박 준 호 (朴俊灝)

1955년 9월 17일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1978~1981년 충남대 공대 전기공학과 전임강사 및 조교수. 현재 부산대 공대 전자전기정보컴퓨터공학부 교수.
Tel : 051) 510-2370
Fax : 051) 513-0212
E-mail : parkjh@pusan.ac.kr