

에너지저장장치를 이용한 풍력발전 출력 제어 성능 평가

Assessment of performance for Output Power Control of Wind Turbine using Energy Storage System

홍 종 석* · 최 창 호** · 이 주 연*** · 김 재 철†

(Jong-Seok Hong · Chang-Ho Choi · Joo-Yeon Lee · Jae-Chul Kim)

Abstract - In this paper, we describe construction of a wind stabilization demo-site and effects of output power control of wind turbines for suppression of ramp rate using ESS (Energy Storage System). It is difficult to control the output power of distributed generator such as wind turbine which of variation is very large. If the large capacity wind farm be interconnected into power system may cause blackout due to Power Quality. For these reasons, the international standards such as Grid-Code is limited to less than 10 [%/min] of renewable energy ramp rate. The case of Korea, government actively conducts propagating large-scale renewable energy for green growth policy, to interconnecting more renewable energy into power system is necessary for stabilization technology. For these reasons, the POSCO consortium has constructed a wind stabilization demo-site that is configured as 500 [kWh] battery energy storage systems can output up to 3 [C-Rate] and two wind turbines rated 750 [kW]. In POSCO consortium, which implements various methods stabilizing output power of wind turbine such as smoothing, section firming and ramp control, we derive the results of long-term demonstration that can be controlled to satisfy to the international standard about ramp rate [%/kW] of wind turbine output power.

Key Words : ESS (Energy Storage System), Wind turbine, Ramp control, Ramp rate, Smoothing control, Firming control, Power quality

1. 서 론

유럽을 중심으로 신,재생에너지 보급 및 활용이 가속화되고 있으며[1, 2], 국내에서도 신재생에너지 의무 할당제(RPS, Renewable Portfolio Standard)를 도입하여 신재생에너지 보급에 노력하고 있다.

그 중에서도 풍력발전기는 일부 지역에서 기존 전력망의 발전원 중 가장 비싼 발전원의 발전단가와 같거나 작아지는 그리드 패리티에 도달하였으며 제주도과 서남해안을 중심으로 대규모 발전단지조성을 계획하고 구축을 위해 여러 연구가 진행되고 있다.

하지만 신재생에너지는 자연에너지를 이용하는 급전 불가능한(Non-dispatchable)발전원으로서 기존 전력계통에 무한정 연계할 수 없으며[3], 연계 용량을 증가시키고 기존 전력계통의 전력품질을 유지하기 위해서는 신재생에너지 출력안정화 기술이 필수적이다[4].

또한, 신재생에너지 출력변동은 주파수 등 전력품질에 문

제를 야기할 수 있으며 국제규격인 Grid Code에서는 신재생에너지의 출력변동률이 10 [%/min] 미만으로 제한하며 풍력발전기 전력품질 성능 평가 기준에서도 출력변동(Ramp Rate)을 성능 지표로 측정하고 있다[5]. 이러한 필요성에 의해 국외에서는 표 1과 같이 신재생에너지 출력안정화를 위한 실증 프로젝트가 구축되었으며, 미국, 중국, 일본 및 유럽 등 기술 선진국에서는 추가 프로젝트를 진행하고 있다. 본 논문에서는 제주실증 국책과제를 통해 풍력발전 출력안정화 실증단지를 구축하여 다양한 풍력안정화 기술을 적용하였으며 풍력안정화 효과 및 성능평가 결과에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 풍력발전 출력안정화 단지 구성도

시스템 구성도는 그림 1과 같이 750 [kW] 풍력발전기 2기에 2[MVA]/500[kW] 용량의 대용량 리튬이온 에너지저장장치를 이용한 에너지 저장장치를 병렬로 연계하였으며 신재생에너지 전용 에너지관리 시스템을 구축하여 모든 데이터를 운영센터에서 모니터링 및 제어할 수 있도록 구축하였다. 본 논문에서 분석한 데이터는 동기화된 1초 단위의 데이터로 1.5[MW] 풍력발전기 출력단, 2[MVA] 에너지 저장장치 출력단 및 계통 출력단에 데이터를 활용하였으며 Smoothing Control, Firming Control 및 Ramp Control을 이용하여 분석하였다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil Univ., Korea

E-mail : jckim@ssu.ac.kr

* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil Univ., Korea

** POSCO ICT, Korea

*** Dept. of Industrial Engineering, Ajou Univ., Korea

접수일자 : 2014년 10월 27일

수정일자 : 2014년 11월 17일

최종완료 : 2014년 11월 18일

표 1 국외의 에너지저장장치를 이용한 신재생에너지 출력안정화 실증사례
Table 1 Demo-Project of renewable energy stabilization using ESS at overseas

Project	Renewable Energy	Capacity of ESS	Application
Maui	wind	1.5 MW / 1.0 MWh	Ramp control
Kahuku	wind	15 MW / 10 MWh	Ramp control, Voltage regulation
Xcel	solar	1.5 MW / 1.0 MWh	Ramp control, Ancillary services, Firming/shaping
Lanai	solar	1.125 MW / 0.5 MWh	Ramp control, Ancillary services
KIUC	solar	1.5 MW / 1.0 MWh	Ramp control, Ancillary services, Responsive reserves
KWP II	wind	10 MW / 20 MWh	Ramp control, Curtailment capture, Responsive reserves
Duke	wind	36 MW / 24 MWh	Ramp control, Ancillary services

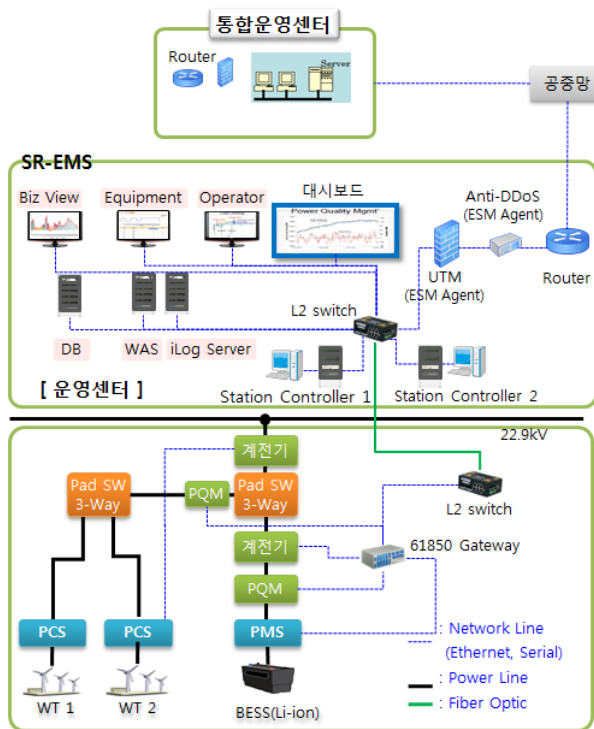


그림 1 시스템 구성도
Fig. 1 System Configuration

2.2 BESS를 이용한 풍력발전 출력안정화

본 논문에서는 에너지 저장장치를 이용한 풍력발전 출력안정화 기법으로 출력변동을 억제하는 Smoothing Control, 일정기간 동안 급전 가능한 Firming Control, 출력변동률을 일정 값 이하로 제한하는 Ramp Control을 각각 구현하여 실증하였으며 그 개념은 그림 2와 같다.

에너지 저장장치를 이용한 풍력발전 출력안정화 알고리즘은 그림 3과 같으며 방법 1, 2, 3은 Smoothing, Firming, Ramp Control을 각각 의미한다. 또한, 에너지 저장장치는 배터리 용량의 한계가 있으므로 배터리 잔존량(SoC, State of Charge)에 따른 상한과 하한에 대한 제약 알고리즘을 갖으며 Power 제약은 전력변환장치(PCS, Power Conditioning System)의 출력을 의미 한다.

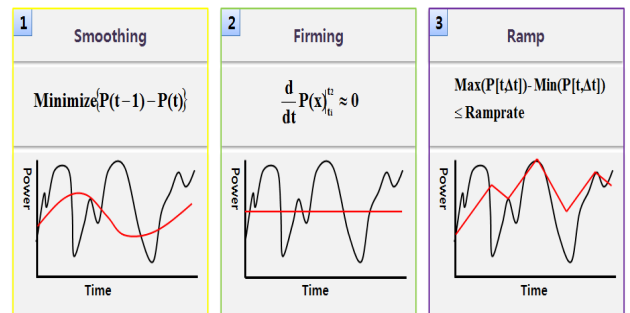


그림 2 풍력발전 출력안정화 개념
Fig. 2 Concept of Smoothing, Firming and Ramp Control for stabilization

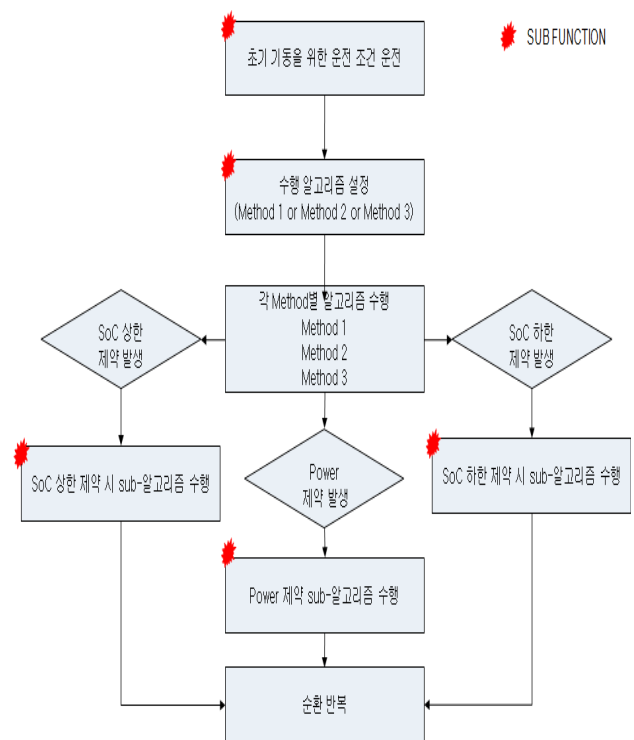


그림 3 풍력발전 출력안정화 순서도
Fig. 3 Flowchart of stabilization for wind turbine output power

2.3 BESS를 이용한 풍력발전 출력안정화 효과 분석

풍력발전기의 출력변동에 대해 분석하기 위하여 750[kW] 용량의 풍력발전기 2기에 대하여 평균풍속 8m/s 이상의 풍속에서 2일 동안에 데이터를 이용하여 분석하였다. 그림 4는 풍력발전기의 출력(상)과 분당변동률(하)을 나타내며 정격대비 분당변동률은 최대 77[%/min]까지 발생하였고 이러한 신재생에너지 출력변동률은 대규모 또는 다수의 신재생에너지가 전력계통에 연계될 경우 주파수 등 전력품질에 문제를 발생시킬 수 있다.

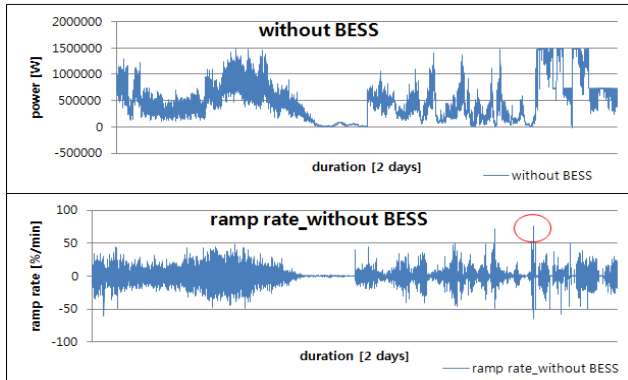


그림 4 풍력발전기의 출력(상) 및 분당변동률(하) 파형
 Fig. 4 Waveform of output power(top) and ramp rate(bottom) for wind turbine

본 논문에서는 신재생에너지 출력변동을 억제하는 Smoothing Control, 일정기간 동안 급전 가능한 Firming Control, 출력변동률을 일정 값 이하로 제한하는 Ramp Control에 대하여 데이터를 분석하였다.

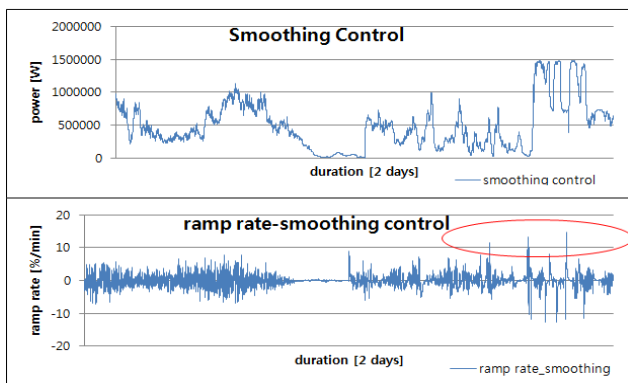


그림 5 Smoothing Control을 이용한 출력(상) 및 분당변동률(하) 파형
 Fig. 5 Waveform of output power(top) and ramp rate(bottom) using smoothing control

그림 5는 Smoothing Control의 경우 출력(상)과 분당변동률(하)에 대하여 나타내었으며 Smoothing Control의 경우 풍력발전기의 출력변동을 억제하는 것은 가능하나 일정 구간에서 Grid Code와 신재생에너지 연계 규정에서 규정한 분

당변동률인 10[%/min]을 초과하는 구간이 나타나는 것을 확인하였다.

그림 6은 제어 불가능한 풍력발전기를 에너지 저장장치를 이용하여 급전 가능한 발전원으로 사용하기 위하여 Firming Control 기법을 사용하여 실증한 결과 파형을 나타낸다. 15분 구간 평균을 이용하여 15분 단위로 Firming 제어를 수행하여 급전 가능한 발전원으로 사용 가능하고 풍력발전기의 출력을 안정화 할 수 있으나 배터리 용량 한계와 풍력발전기의 출력을 결정하는 기상예측의 한계가 존재한다. 그러나 향후 배터리 가격 경쟁력이 향상되어 대용량의 배터리를 적용할 경우 급전 가능한 발전원으로 그 활용가치가 향상될 것으로 사료된다.

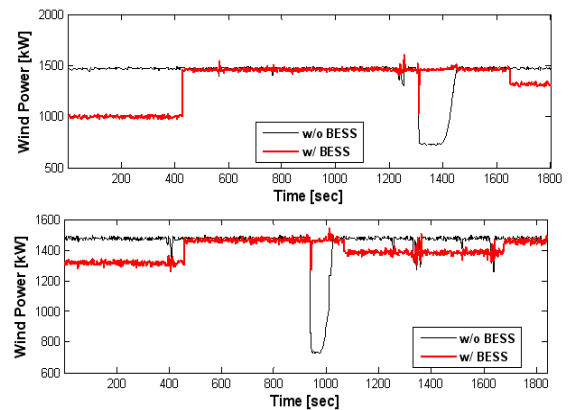


그림 6 Firming 제어를 이용한 출력안정화 결과 파형
 Fig. 6 Waveform of wind stabilization using firming control

Smoothing Control과 Firming Control의 경우 전력계통에서 요구하는 분당변동률에 대해 지속가능한 제어가 어려워 배터리 용량 한계가 존재한다. 이러한 이유로 향후 신재생에너지원이 늘어날 경우 계통 발전기의 빈번한 기동정지를 예방하기 위해 Ramp Control을 이용하여 국내외에서 규정하는 신재생에너지 연계 규정인 분당변동률을 만족하기 위하여 데이터를 분석하였다.

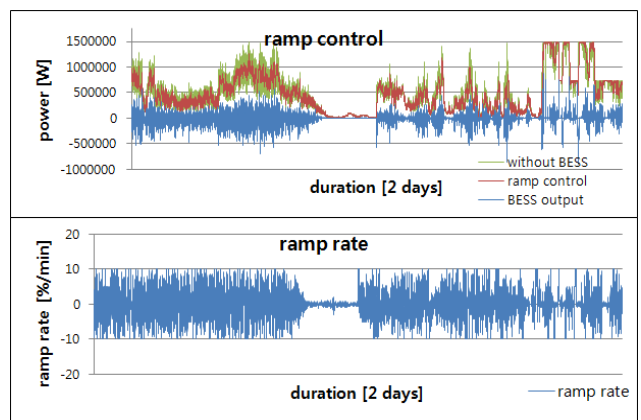


그림 7 Ramp Control을 이용한 출력(상) 및 분당변동률(하) 파형
 Fig. 7 Waveform of output power(top) and ramp rate(bottom) using ramp control

그림 7은 Ramp Control을 이용하여 풍력발전기 출력안정화 출력(상)과 분당변동률(하)을 나타내며 Ramp Control을 이용할 경우 제어하고자 하는 분당변동률에 대하여 만족하는 것을 확인하였다.

그림 8은 에너지 저장장치를 이용한 풍력발전 출력안정화 실증 결과에 대해 대표적으로 나타내었다. Smoothing Control의 경우 풍력발전기 출력을 억제하여 기존 전력계통에 전력품질을 향상 시킬 수 있으나 일정 값 이하로 풍력발전기 출력변동률을 제한하는 것은 한계가 있다. Firming Control의 경우 일정 기간 동안 정출력으로 전력계통에 전력을 공급할 수 있으며 급전소와 연동하여 급전 가능한 발전원으로 발전할 수 있으나 풍력발전기의 발전량 예측이 어렵고 배터리 용량에 한계가 있어 지속가능한 풍력발전 출력안정화 및 급전 가능한 발전원으로 운용하는 것은 한계가 있다. Ramp Control의 경우 풍력발전의 출력변동률을 일정 값 이하로 제한할 수 있는 방법으로서 풍력발전 출력안정화 실증 단계에서 장시간 분당변동률을 10[%/min] 이하로 제어가능하며 Grid Code 및 분산전원 연계규정을 만족 시킬 수 있다.

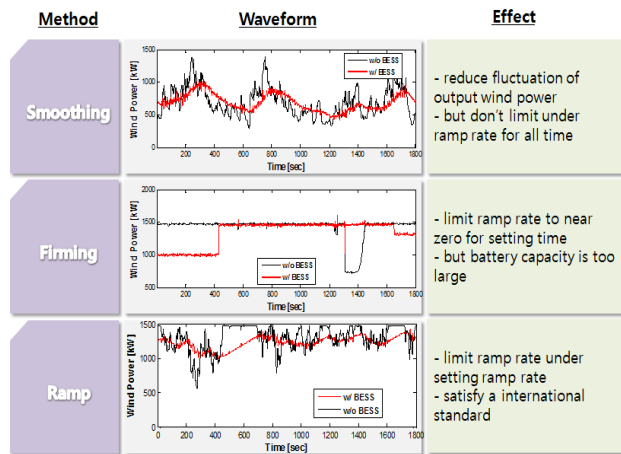


그림 8 에너지 저장장치를 이용한 풍력발전 출력안정화 효과
Fig. 8 Effect on the output power control of wind turbine using energy storage system

2.4 BESS를 이용한 풍력발전 출력안정화 제어성능 평가

2.3절에서는 풍력발전 출력안정화 기법에 대해 기술하였으며 일정 값 이하로 분당변동률을 제어하기 위해서는 Ramp Control이 필요하다. 본 장에서는 Ramp Control에 대한 제어성능 평가에 대해 기술하였으며, 제어를 위한 수식의 표현은 아래 식(1)과 식(2)로 제시하였다.

$$\text{Max}[P_{wt}(t, t + \Delta t)] - \text{Min}[P_{wt}(t, t + \Delta t)] > P_{ramp} \quad (1)$$

$$|P_{wt}(t + \Delta t) - P_{wt}(t)| > P_{ramp} \quad (2)$$

여기서, $P_{wt}(t)$ 는 t시점에서의 풍력발전의 출력
 P_{ramp} 는 분당 변동률에 해당되는 유효전력

본 논문에서는 1.5[MW] 풍력발전기에 에너지 저장장치를

이용하여 분당변동률 10[%/min]인 150[kW] 이하로 제어 목표 값을 설정하였으며 식(1)에 따라 이론적 분당변동률(상), 실증 결과에 따른 분당변동률(중)과 풍력발전기의 분당변동률(하)을 그림 9에 나타내었으며 식(2)에 따른 평가 결과는 그림 10에 나타내었다.

그림 9와 그림 10의 결과를 분석하면 제어 목표인 이론적

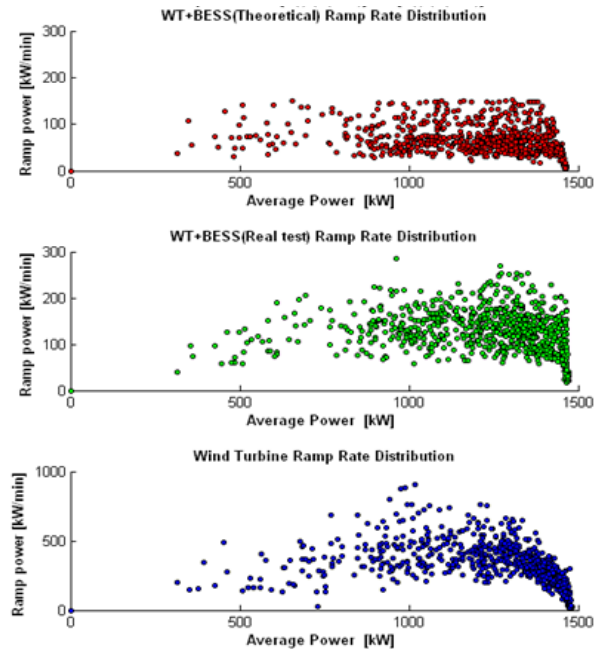


그림 9 식 1에 따른 ramp control 성능 분포도
Fig. 9 Profile of ramp control performance using equation (1)

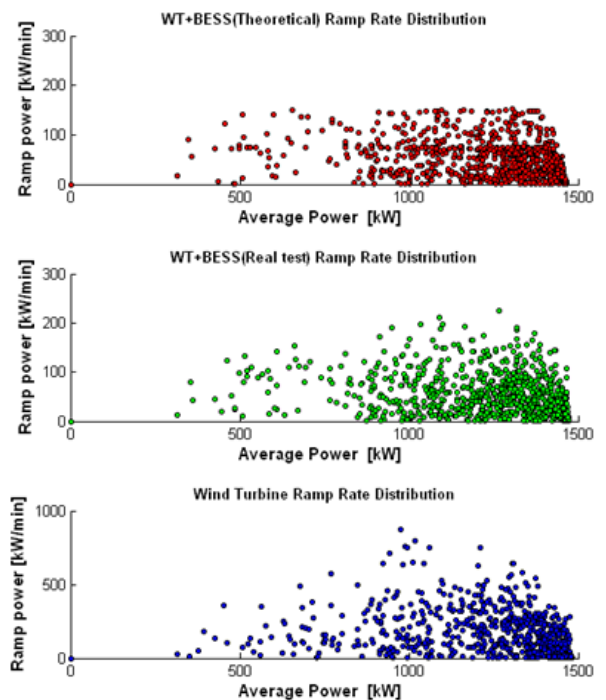


그림 10 식 2에 따른 ramp control 성능 분포
Fig. 10 Profile of ramp control performance using equation (2)

분당 변동률은 모든 범위에서 만족하지만 실제 실증 결과는 이론 값과 차이나 나는 것을 확인하였다. 이는 모든 시스템 간에 발생하는 지연요소와 에너지저장장치를 구성하는 설비 간의 응답시간의 차이로 발생하는 것으로 향후 성능평가에 대한 기준이 필요로 하는 부분이다.

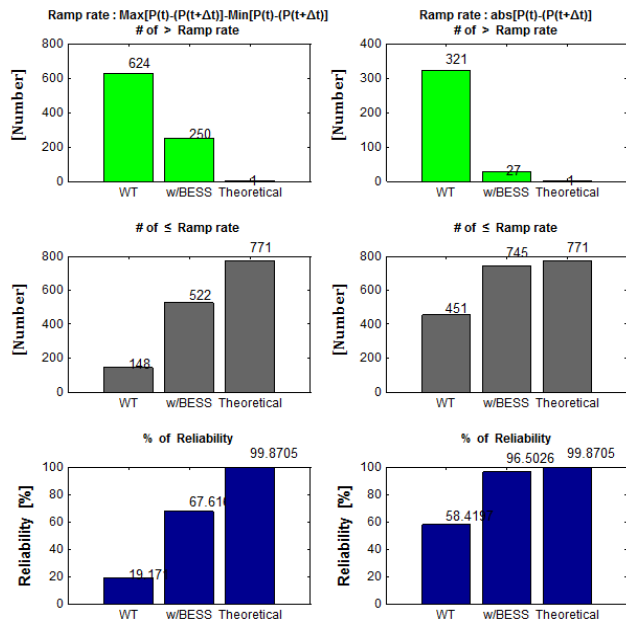


그림 11 제어성능 신뢰성 분석

Fig. 11 Reliability analysis on the control performance

그림 9와 그림 10의 결과를 분석하면 제어 목표인 이론적 분당 변동률은 모든 범위에서 만족하지만 실제 실증 결과는 이론 값과 차이나 나는 것을 확인하였다. 이는 모든 시스템 간에 발생하는 지연요소와 에너지저장장치를 구성하는 설비 간의 응답시간의 차이로 발생하는 것으로 향후 성능평가에 대한 기준이 필요로 하는 부분이다.

또한, 평가 수식에 따라 오차 범위는 차이가 발생하며 식 (1)이 식 (2)보다 가혹한 평가 수식으로 사료되었다. 이러한

표 2 사례분석 결과

Table 2 Result of case study

case	Reliability[%]	Wind Power [kW]				Wind Power + BESS [kW]				
		Def.1 (Def.2)	avep	maxp	ΔPave	ΔPmax	avep	maxp	ΔPave	ΔPmax
10[%]	1	98.8 (99.0)	339	1483	70	783	319	1453	68	171
	2	97.8 (99.7)	375	752	78	434	348	770	78	201
	3	67.6 (96.5)	1209	1503	129	873	1222	1571	127	225
	4	89.8 (98.9)	570	1452	101	544	544	1394	101	164
5[%]	5	79.4 (95.7)	448	1324	55	623	407	1010	55	228
	6	95.0 (99.3)	69	1042	28	397	77	474	11	151
	7	94.6 (98.2)	195	940	38	241	175	770	38	129
3[%]	8	57.0 (91.0)	218	737	46	455	260	792	46	97
	9	67.0 (90.0)	104	743	42	486	88	781	44	155
	10	42.0 (81.0)	356	749	88	734	357	868	88	242

결과를 이용하여 제어성능에 대한 신뢰도를 그림 11에 나타 내었으며 식 (2)에 따라 평가할 경우 제어 신뢰도가 96.5[%]로 분석되었다. 하지만 수식에 따라 제어 성능이 변하는 것은 아직 신재생에너지 출력안정화에 대한 평가 방법이 정량화 되지 않았으며 향후 정량적인 분석 기법 및 표준이 필요 할 것으로 사료된다.

2.5 사례 분석

2.4절에서 분석한 방법으로 분당변동률을 10[%], 5[%], 3[%]로 가변하고 풍속과 무관하게 대표사례를 선정하여 실 증시험을 수행하였으며 평가 수식에 따른 제어성능 신뢰도 와 분당변동률을 분석하기 위하여 풍력발전기 출력과 에너 지 저장장치를 이용한 출력안정화 출력에 대해 분석하였으 며 그 결과는 표 2와 같다. 제어성능 신뢰도는 풍력발전기 의 출력 변동이 심할 경우 그 신뢰성이 저하되며 식(1)보다 는 식(2)로 평가할 경우 신뢰성이 높게 분석 되었다.

또한, 풍력발전기 출력 변동 범위와 에너지 저장장치를 이용하여 출력 변동을 제한하였을 때의 출력 변동 범위에 대해 나타 내었으며 그림 12와 같이 에너지 저장장치를 이 용할 경우 개선되는 것을 확인하였다. 개선 결과는 그림 13 과 같으며 경우에 따라 최소 46[%]에서 최대 79[%]를 개선 하는 것으로 분석 되었다.

3. 결 론

본 논문에서는 다양한 풍력안정화 기법에 따른 효과를 분 석하였으며 성능 평가 결과를 도출하였다.

Smoothing Control의 경우 풍력발전의 출력 변동을 억제 할 수 있으나 일정 값 이하로 출력변동을 제한하는 것은 한 계가 있다. Firming Control의 경우 풍력발전기와 에너지 저 장장치를 이용하여 급전가능한 발전원으로 사용가능하며 출 력변동률을 억제할 수 있으나 배터리 용량한계와 신재생에 너지의 출력을 결정하는 기후예측 한계가 존재하여 지속가 능한 급전원으로써 활용하는 것은 한계가 있다.

하지만 배터리 가격 경쟁력이 향상되고 기후예측 기법이 향상될 경우 풍력발전기를 에너지 저장장치를 이용하여 급

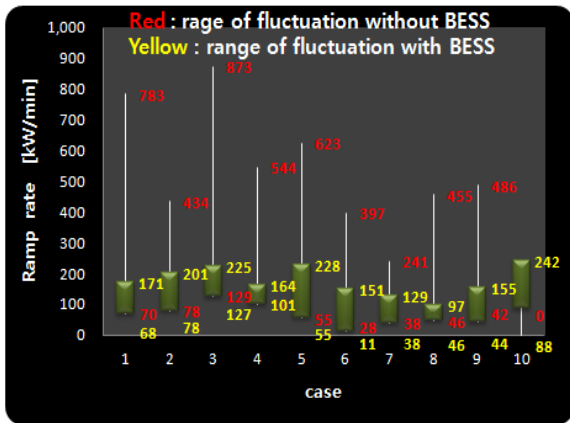


그림 12 사례별 분당변동률 변동 범위
Fig. 12 Rage of fluctuation for ramp rate of cases

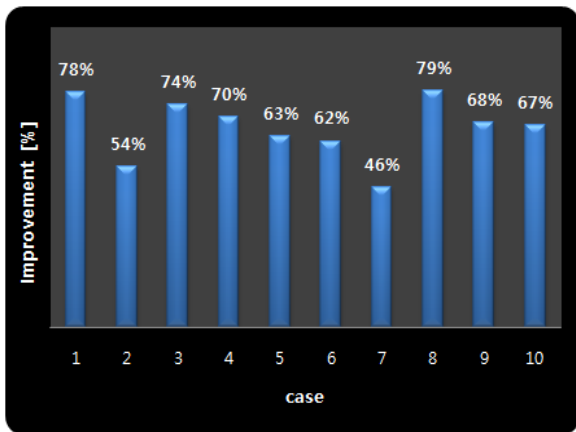


그림 13 사례별 분당변동률 개선률
Fig. 13 Improvement rate for ramp rate of cases

전가능한 발전원으로 활용한다면 그 가치는 매우 클 것으로 사료된다. Ramp Control의 경우 국내의 규격에서 규정하는 분당 변동률에 대하여 부합할 수 있는 제어 기법으로서 본 실증을 통해 일정 범위로 풍력발전기의 출력 변동률을 제한하는 것을 확인하였다.

또한, 제어 성능을 평가하기 위해 실증결과 데이터를 정량적으로 분석하였으며 수식 (2)에 따라 평가할 경우 97% 이상의 제어 신뢰성을 갖는 것으로 분석되었으며 에너지저장 장치를 이용할 경우 최대 79%까지 풍력발전 출력변동을 개선할 수 있다.

이러한 연구는 신재생에너지의 보급을 확대하고 신재생에너지 출력변동 평가 기법을 정량화 하는데 기초자료로 활용될 것으로 사료된다. 또한 풍력발전의 출력변동 억제는 주변압기의 전압조정을 위한 탭조절 횟수와 급격한 변동에 대응하기 위한 계통의 발전기의 스트레스 억제효과가 있을 판단되며 향후 정량적인 효과를 위한 연구를 수행할 예정이다.

References

[1] RE-thinking 2050, "A 100% Renewable Energy Vision for the European Union", EREC, 2010

[2] The European Wind Energy Association, "EU Energy Policy to 2050", March 2011.
[3] Kim Yeong-Hwan, Kim Se-Ho, "Increasing Effect Analysis of the Wind Power Limit Using Energy Storage System in Jeju-Kore" Journal of the Korean Solar Energy Society Vol. 34, No. 1, pp. 81-90, February 2014.
[4] Jin-woo Park, Young-ho Park, and Seung-il Moon, "Instantaneous wind power penetration in Jeju Island", Power and Energy Society General Meeting, July 2008.
[5] IEC-61400-21, "Wind Turbines, Part 21: Measurement and assessment of power quality characteristics of grid connected wind turbines"

저 자 소 개



홍종석 (洪鍾碩)

1972년 12월 02일생, 2002년 숭실대학교 원 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료. 포스코ICT 수석연구원
Tel : 02-817-7966
Fax : 02-925-1812
E-mail : entrany@gmail.com



최창호 (崔昌鎬)

1956년 10월 18일생. 서울대학교 전기공학과 졸업(석사). 한양대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 포스코ICT 기술고문.
Tel : 031-723-2016
Fax : 031-723-2111
E-mail : choi97@poscoict.com



이주연 (李株衍)

1961년 03월 25일생. 2004년 인하대 경영학과 졸업(박사). 현재 아주대 산업공학과 교수.
Tel : 031-219-3569
Fax : 031-219-3748
E-mail : jooyeoun325@ajou.ac.kr



김재철 (金載哲)

1955년 07월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 숭실대 전기공학부 교수.
Tel : 02-820-0647
Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr