



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

단기 평균값을 이용한 풍력발전
출력 평활화 제어

濟州大學校 大學院

電氣工學科

尹 太 燮

2017 年 2 月

단기 평균값을 이용한 풍력발전 출력 평활화 제어

指導教授 金 一 煥

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2017 年 2 月

尹太燮의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 金 世 鎬
委 員 金 一 煥
委 員 陳 영 규

濟州大學校 大學院

2017 年 2 月

Smoothing Control of Wind Power Output using Short-term Average Value

Tae Seop Yoon
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
MASTER OF SCIENCE

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2017. 2.

목 차

그림 목차	ii
표 목차	iii
SUMMARY	iv
1. 서 론	1
2. 출력 평활화 제어	3
2.1 저역 통과 필터에 의한 풍력발전 출력 평활화 제어	4
2.2 램프비율 제어	5
2.3 단기 평균값을 이용한 풍력발전 출력 평활화 제어	8
3. 제안된 방법의 효과 분석	11
3.1 평균 이용률 시 효과 분석	11
3.2 최대 이용률 시 효과 분석	18
3.3 결과 및 고찰	25
4. 결 론	28
참 고 문 헌	29

그림 목 차

Fig. 1 Power quality analysis device connected	3
Fig. 2 Output oscillation from ramp rate control	6
Fig. 3 Algorithm for ramp rate control	7
Fig. 4 Maximum wind power fluctuation rate during 1 minute according to k8	
Fig. 5 Algorithm for proposed method	9
Fig. 6 Output power of wind farm on Feb. 21 2015	11
Fig. 7 Wind power fluctuation rate during 1 minute	12
Fig. 8 Output power of wind farm with ESS by LPF	13
Fig. 9 Output power of ESS by LPF on Feb. 21 2015	13
Fig. 10 Wind power fluctuation rate during 1 minute by LPF on Feb. 21 2015	
14	
Fig. 11 Output power of wind farm by ramp rate control	15
Fig. 12 Output power of ESS by ramp rate control	15
Fig. 13 Wind power fluctuation rate during 1 minute by ramp rate control on	
Feb. 21 2015	16
Fig. 14 Output power of wind farm by proposed method	17
Fig. 15 Output power of ESS by proposed method	17
Fig. 16 Wind power fluctuation rate during 1 minute by proposed method on	
Feb. 21 2015	18
Fig. 17 Output power of wind farm on Mar. 24 2015	19
Fig. 18 Wind power fluctuation rate during 1 minute	19
Fig. 19 Output power of wind farm by LPF on Mar. 24 2015	20
Fig. 20 Output power of ESS by LPF on Mar. 24 2015	20
Fig. 21 Wind power fluctuation rate during 1 minute by LPF on Mar. 24 2015	
21	
Fig. 22 Output power of wind farm by ramp rate control	22
Fig. 23 Output power of ESS by ramp rate control	22
Fig. 24 Wind power fluctuation rate during 1 minute by ramp rate control on	
Mar. 24 2015	23
Fig. 25 Output power of wind farm by proposed method	24
Fig. 26 Output power of ESS by proposed method	24
Fig. 27 Wind power fluctuation rate during 1 minute by proposed method on	
Mar. 24 2015	25

표 목 차

Table 1. Simulation results on Feb. 21 2015	26
Table 2. Simulation results on Mar. 24 2015	26

SUMMARY

Energy storage system (ESS) attached wind farm can reduce the wind power fluctuation and increase the grid stability. However, the operation of ESS can cause a losses and negative effect on lifecycle of batteries. From this point, this thesis proposes wind power smoothing control by using short-term mean value. In this case, the operation of ESS will be determined by wind power fluctuation rate during one minute. It means that the ESS will not operate at small fluctuation of wind power which does not affect grid stability.

In order to verify the effectiveness of proposed method, this thesis will compare the wind power smoothing control by low pass filter, the ramp rate control and the proposed method by using Matlab program.

And also, to analyze the effect of power quality, simulations will be carried out with the wind power data measured by 15,000 kW wind farm located in Jeju Island.

1. 서 론

화석 연료의 사용으로 인한 환경문제를 해결하기 위해 유럽을 중심으로 풍력 발전에 대한 연구가 활발하게 시작되면서 유럽에서는 전력 사용량 대비 풍력발전기의 보급률이 타 대륙에 비해 매우 높은 비율을 차지하고 있다. 유럽의 경우 국가 간 전력망이 연계되어 있어, 실시간으로 전력 송·수전이 가능하게 되어 풍력발전단지별 출력변동에도 불구하고 출력변동 완화효과를 가질 수 있기 때문에 계통을 안정적으로 유지시킬 수 있다 [1],[2]. 반면에 아이슬란드와 영국 사이에 위치한 조그마한 섬으로 구성된 덴마크령 페로제도는 전력망이 독립적으로 운영되고 있어 계통망에 연계된 분산전원의 급격한 출력변동은 계통의 안정도를 악화시킬 수가 있다. 이에 따라 2015년 배터리 제조사 Saft와 풍력발전기 제작사 Enercon를 중심으로 풍력발전 출력 안정화를 위한 Húsahagi project를 시작하여 단지용량 12.0 MW Húsahagi 풍력발전단지에 PCS (Power conversion system) 2.3 MW, 배터리 0.7 MWh로 구성된 ESS (Energy storage system)를 설치한 후 풍력발전 출력 램프비율 제어(Ramp rate control)에 대한 연구를 진행하였다 [3].

국내에서는 제주특별자치도가 2012년 “Carbon Free Island Jeju by 2030” 정책을 수립하고, 2020년까지 1.09 GW, 2030년까지 2.35 GW의 풍력발전단지 보급을 강력하게 추진하고 있다. 이 경우 역시 대규모 풍력발전 보급에 따른 계통 안정도 저하 문제가 예상되어 이를 해결하기 위해 제주특별자치도에서는 “풍력발전기 출력안정용 에너지저장장치 시범구축사업”을 2015년부터 시작하여 행원 3.0 MW 풍력발전기에 PCS 1.0 MW, 배터리 0.5MWh로 구성된 ESS를 설치한 후 풍력발전 출력안정화에 대한 실증 사업을 진행하고 있다 [4],[5].

풍력발전 출력 안정화 방법에는 풍력발전기 자체에서 램프 한계를 설정하여 급격한 출력 변동을 억제하는 방법과 ESS를 이용한 충·방전을 통해 출력제어를 하는 방법이 있다. ESS를 이용한 방법 중에서는 평활화(Smoothing), 정출력(Firming), 램프비율(Ramp rate) 제어가 있다. 이 중 평활화 제어는 저역통과필터(Low pass filter : LPF), 칼만필터, 이동평균 등을 사용하여 ESS 충·방전량

을 결정하는 방법이 있으나, 이는 큰 배터리 용량이 요구되며, ESS의 가동률 또한 높아진다는 단점이 있으므로 이를 해결하기 위해 슈퍼캐패시터(Supercapacitor), SMES(Superconducting magnetic energy storage)를 이용한 하이브리드 ESS 형태의 평활화 제어 기법에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다 [6],[7].

정출력 제어는 풍력발전기의 정출력 운전을 위한 제어 기법으로 가장 안정된 계단과 형태의 출력을 도출할 수 있으나, 아주 방대한 ESS 용량이 필요하고 시간단위 이상의 풍력발전량 예측을 요구하기 때문에 제어의 어려움과 예측 불확실성에 대한 문제가 있다 [8].

마지막으로 램프 비율 제어의 경우, 풍력발전 출력의 기울기를 제어하는 방법으로 출력이 설정된 기울기를 초과할 경우에만 동작하기 때문에 ESS 용량과 가동률이 타 제어 기법에 비해 적어지는 장점을 가지고 있다. 그러나 풍력발전기의 기울기를 판단하기 위해서는 현재 출력과 바로 직전 샘플링 시간의 출력을 비교하여 ESS의 출력을 결정하기 때문에 ESS의 출력 지령값의 정확도가 저하될 뿐만 아니라 제어 이탈로 인한 출력 진동현상이 발생할 우려가 있다 [9],[10].

본 논문에서는 풍력발전 출력에 대한 램프 비율 제어의 정확성 및 안정성을 향상시키고 ESS의 충·방전 횟수를 줄이기 위한 방법으로 풍력발전 출력의 실시간 분당 변동률 계산을 통해 제어 유·무를 결정하고 풍력발전 출력의 단기 평균값을 이용하여 ESS의 충·방전 지령을 내리는 방법을 제안한다. 제안된 방법의 타당성을 검증하기 위해 제주 지역 15.0 MW 풍력발전단지의 0.2초 주기의 측정 데이터를 가지고 제안된 방법과 램프 비율 제어, 평활화 제어방법을 Matlab프로그램을 활용하여 컴퓨터해석 결과들을 비교·분석하였다. 이때 각 방법들에 사용된 풍력출력 평활화 제어기준은 한국전력공사의 『송·배전용 전기설비 이용규정』 별표 6. 신재생발전기 계통연계기준의 3. 송전용전기설비 접속기준 5)항에서 규정된 분당 변동률이 10% 범위 이내에서 운전되도록 적용하였다 [11].

2. 출력 평활화 제어

분당 변동률 제어의 검증을 위한 샘플 데이터 수집을 위해 제주지역 15.0MW 풍력발전단지 변전실 MOF 2차측에 그림 1과 같이 전력품질분석기를 2014년 10월 1일부터 2015년 3월 30일까지 5개월간 연계하여 측정하였다. 전력품질분석기는 DEWETRON 社의 DEWE-571-PNA-200K 모델을 사용하였으며, 데이터 수집 주기는 0.2초로 24시간당 432,000개의 데이터를 수집하였다. 이때 측정 데이터의 연산을 용이하게 하기 위해 1초 단위 24시간 86,400개로 가공하였으며, Matlab 프로그램을 이용하여 각 분당 변동률 제어기법을 비교·분석하였다.



Fig. 1 Power quality analysis device connected
15.0 MW wind farm

여기서 수집된 데이터 중 2015년 3월 24일은 풍력발전 출력이 가장 컸으며, 해당 일의 이용률은 64.1%로 평균 출력은 9,612 kW를 기록하였다. 또한 2014년 제주지역 풍력발전의 평균 이용률인(2015년 풍력발전설비 시운전 및 정비 등으로 인한 이용률 저조) 23.2%와 유사한 수치를 기록한 2015년 2월 21일의 이용률은 23.6%이며, 해당 일의 평균 출력은 3,544 kW를 기록하였다. 따라서 발전량이 평균을 기록한 2015년 2월 21일 출력 데이터를 이용하여 각 제어방법의 파라미터를 결정하고 풍력발전 출력량이 가장 큰 2015년 3월 24일에 2015년 2월 21일 파라미터를 적용하여 제안된 방법의 타당성을 분석하였다.

2.1 저역통과필터를 이용한 풍력출력 평활화 제어

평활화 제어 기법에는 칼만필터, 이동평균 등 다양한 방법이 있으나, 본 논문에서는 저역통과필터를 사용하여 평활화한 출력 결과와 제안된 방법의 결과를 비교하였다. 낮은 주파수는 통과시키고 그 이상의 주파수는 제거하는 1차 저역통과필터는 식(1)과 같이 연속시간에서 표현될 수 있으나 본 논문에서는 1초의 샘플링 시간을 갖는 불연속시간에서 계산하므로 식(2)를 이용하여 계산하였다. 이때 ESS의 출력 지령값은 저역통과필터를 통과한 풍력발전 출력과 기존의 풍력발전 출력의 차로 식 (3)과 같이 계산할 수 있고, 평활화된 풍력출력은 식(4)와 같이 다음 샘플링 시간의 풍력 발전 출력과 ESS 출력 지령값의 차로 결정된다 [12].

$$P_{ftd_cont} = \frac{1}{\tau s + 1} \times P_t \quad (1)$$

$$P_{ftd_t} = \frac{\tau}{\tau + t_s} P_{ftd_t-1} + \frac{t_s}{\tau + t_s} P_t \quad (2)$$

$$P_{ref} = P_{ftd_t} - P_t \quad (3)$$

$$P_{total_t+1} = P_{t+1} - P_{ref} \quad (4)$$

여기서, P_{ftd_cont} : 연속시간에서 저역통과필터 출력 [kW]

τ : 평활화 시정수 [s]

t_s : 샘플링 시간 [s]

P_t : t초에서의 풍력발전 출력 [kW]

P_{ftd_t} : t초에서의 저역통과필터 출력 (불연속 시간) [kW]

P_{ref} : ESS 출력 지령값 [kW]

P_{total_t+1} : t+1초에서의 풍력 발전, ESS 합성 출력 [kW]

이때 평활화 효과는 평활화 시정수 τ 에 의해서 결정되나, 저역통과필터에 의한

평활화 시정수는 매일의 풍력 출력이 다르기 때문에 적합한 값에 대한 기준이 모호하다. 따라서 본 논문에서는 ESS의 용량을 고려하지 않았을 때 2015년 2월 21일 기준으로 분당 변동률을 10% 이하로 만들 수 있는 샘플링시간 t_s 가 1초일 때 τ 의 값인 79로 Matlab 프로그램을 통한 컴퓨터 해석으로 결정하였다.

2.2 램프비율 제어

램프 제어는 과거의 풍력 출력과 현재 출력의 증·감발 기울기를 판단하여 다음 출력을 결정한다. 이때 풍력발전과 ESS의 합성 출력의 경우 다음 샘플링 시간에서의 기울기를 결정하기 때문에 램프비율 제어의 정확도가 저하될 우려가 있다. 식(5)는 불연속시간의 풍력발전 출력 변화량을 나타내고, 식(6)은 1초당 제한해야하는 풍력발전 출력 변화량을 나타낸다. 본 논문에서는 15.0MW 단지를 대상으로 분당 변동률을 10%이하로 제어하기 위해 제어 상·하한값을 $\pm 25.0\text{kW}$ 로 설정하였다. 식(7)은 ESS의 출력 지령값을 나타내며, 본 논문에서는 초당 풍력 출력 변화량이 25.0kW 이하일 경우에는 0, +25.0kW보다 크면 충전, -25.0kW보다 작으면 방전하도록 설정하였다. 이에 따라 식(8)과 같이 다음 샘플링 시간의 풍력발전 출력과 ESS 출력 지령값의 차로 합성 출력을 결정할 수 있다 [9],[10].

$$\Delta P = P_t - P_{total,t-1} \quad (5)$$

$$Ramp_{limt} = Rate_{set} \times capacity / (100 \times 60s) \quad (6)$$

$$P_{ref} = \begin{cases} \Delta P - Ramp_{limt} & \frac{\Delta P}{t_s} > Ramp_{limt} \\ \Delta P + Ramp_{limt} & \frac{\Delta P}{t_s} < -Ramp_{limt} \\ 0 & -Ramp_{limt} \leq \frac{\Delta P}{t_s} \leq Ramp_{limt} \end{cases} \quad (7)$$

$$P_{total,t+1} = P_{t+1} - P_{ref} \quad (8)$$

여기서, ΔP : 샘플링 시간 동안 출력변화량 [kW]

$Ramp_{lmt}$: 풍력발전 출력 기울기 제한 값 [kW]

$Rate_{set}$: 출력변동 제한률 [%]

$P_{total_{t+1}}$: t+1초에서의 풍력발전, ESS 합성출력 [kW]

식(5)-(9)와 동일하게 $P_{total_{t-1}}$ 과 P_t 의 기울기를 통해 제어 유무를 판단하여 P_{t+1} 을 제어할 경우 $\frac{\Delta P}{t_s}$ 의 부호가 바뀌는 순간에서 그림 2와 같이 제어이탈로 인한 출력 진동현상이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 현상은 합성 출력과 풍력 출력이 우연하게 비슷해지는 순간까지 지속된다.

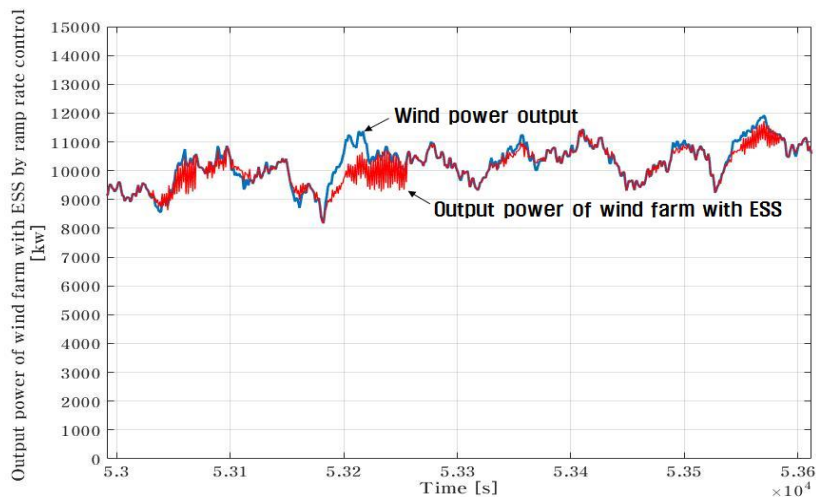


Fig. 2 Output oscillation from ramp rate control

램프비율 제어의 경우 풍력 출력의 기울기가 설정된 기울기를 초과하면 제어를 시작하지만, 실제 풍력발전단지에 적용 시 한번의 샘플링 시간에서 기울기를 초과하였다더라도 분당 변동률은 설정된 제한 값을 넘지 않을 수도 있으므로 ESS 동작을 샘플링 주기에 따라 초당 기울기가 제한 값을 수회-수십회 초과할 경우 제어를 시작해야 한다. 따라서 램프 제어 시 풍력발전 출력 기울기 제한 값이 일 정횟수를 초과하는 경우에 제어를 수행하도록 설정하였다. 이때 그림 2과 같은

출력 진동현상을 방지하기 위해 ESS 출력요구치의 기울기와 풍력 출력이 만나는 지점까지 충전 또는 방전하도록 추가적인 제어가 필요하다. 이를 위해서 본 논문에서는 그림 3과 같은 알고리즘을 램프비율 제어에 도입하였다.

이때 램프 제어 시작을 결정하는 k 를 선정하기 위해 Matlab 프로그램을 이용하여 k 는 1부터 10까지 컴퓨터 해석 진행한 결과, 그림 4와 같이 2015년 2월 21일 기준 최대 분당변동률을 최소로 만들 수 있는 값인 3으로 선정하였고 따라서 기울기가 3회 초과할 경우 즉시 제어를 시작하도록 설계하였다.

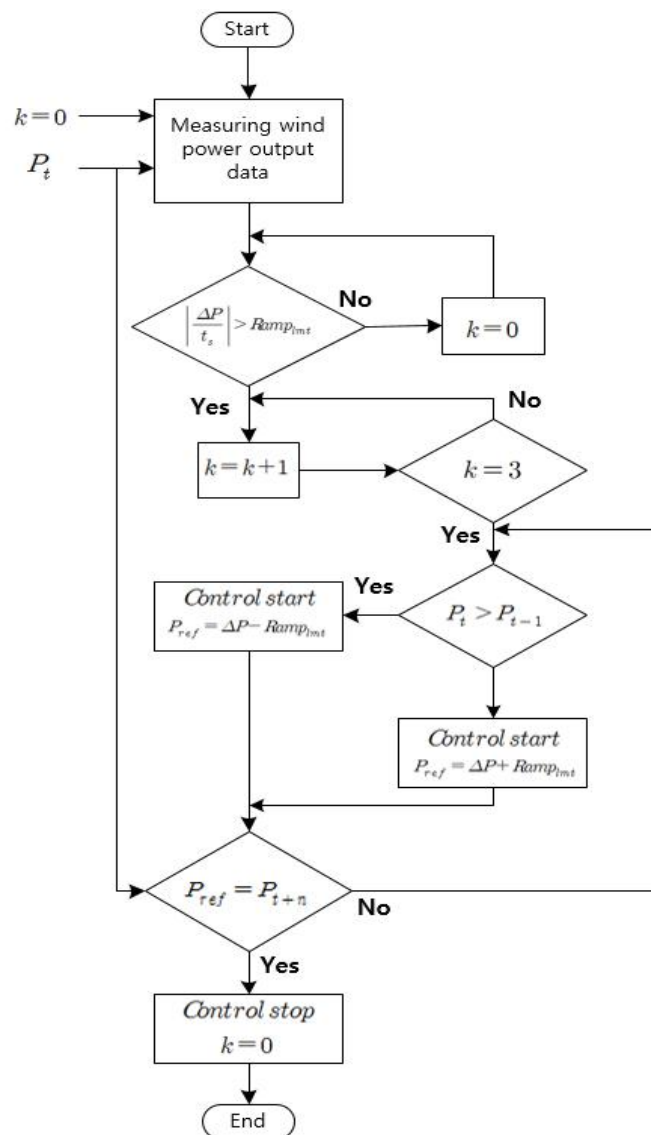


Fig. 3 Algorithm for ramp rate control

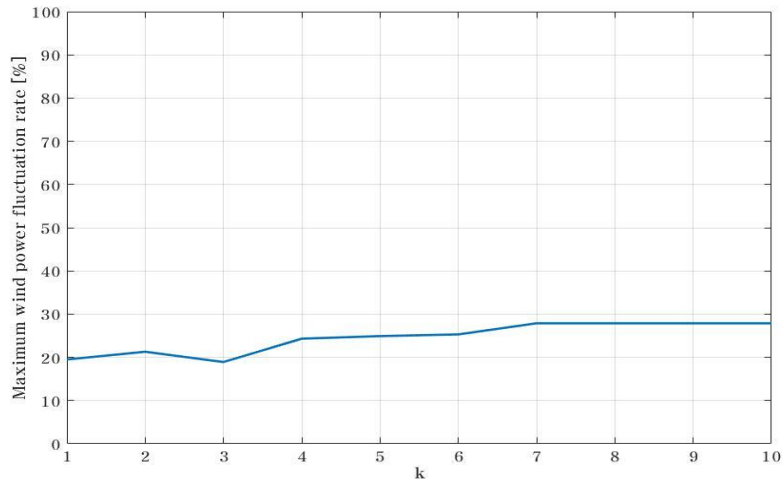


Fig. 4 Maximum wind power fluctuation rate during 1 minute according to k

2.3 단기 평균값을 이용한 풍력발전 출력 평활화 제어

본 논문에서는 단기 평균값을 이용한 풍력발전 출력 평활화 제어방법을 제안한다. 이때 ESS의 풍력발전 출력 평활화 제어는 분당 변동률을 기반으로 판단하며, 제안된 풍력발전 출력 평활화 제어기법은 아래 식(9)-(11)과 같이 결정된다. 식(9)는 풍력발전 출력 분당 변동률 계산식으로 60초 동안의 최대 출력과 최소 출력의 차를 단지용량으로 나눈 값을 나타낸다. 식(10)은 제안된 방법에서의 ESS 출력 지령값으로 분당 변동률이 설정된 값을 넘어가는 순간부터 n초 동안의 평균 값과 풍력발전 출력의 차로 나타낼 수 있다.

$$fluc_{rate} = \frac{f_{max}(P_{t-59} : P_t) - f_{min}(P_{t-59} : P_t)}{capacity} \times 100 \quad (9)$$

$$P_{ref} = f_{mean}(P_{t-n} : P_t) - P_t \quad (10)$$

$$P_{total_t+1} = P_{t+1} - P_{ref} \quad (11)$$

여기서, $fluc_{rate}$: 풍력발전 출력 분당 변동률

$f_{\max}(P_{t-59} : P_t)$: t-59부터 t초까지의 풍력발전 출력 최대값 [kW]

$f_{\min}(P_{t-59} : P_t)$: t-59부터 t초까지의 풍력발전 출력 최소값 [kW]

$f_{\text{mean}}(P_{t-n} : P_t)$: t-n부터 t초까지의 풍력발전 출력 평균값 [kW]

n : 단기 평균 구간 수

capacity : 풍력발전단지 용량 [kW]

이때, 램프비율 제어와 마찬가지로 제안된 방법은 $(t-n)$ 초부터 t 초까지의 단기평균 구간 수 n 개의 풍력발전 출력의 평균값에 의해 다음 $t+1$ 초의 합성 출력이 결정되거나 ESS의 동작을 직전 출력의 기울기가 아닌 분당 출력 변동률에 의해 결정하므로 출력 진동현상이 발생할 우려가 없다. 제안된 풍력발전 출력은 그림 5와 같은 방법으로 동작하며, 그림 3과 비교하였을 때 알고리즘이 훨씬 단순화되었음을 확인 할 수 있다.

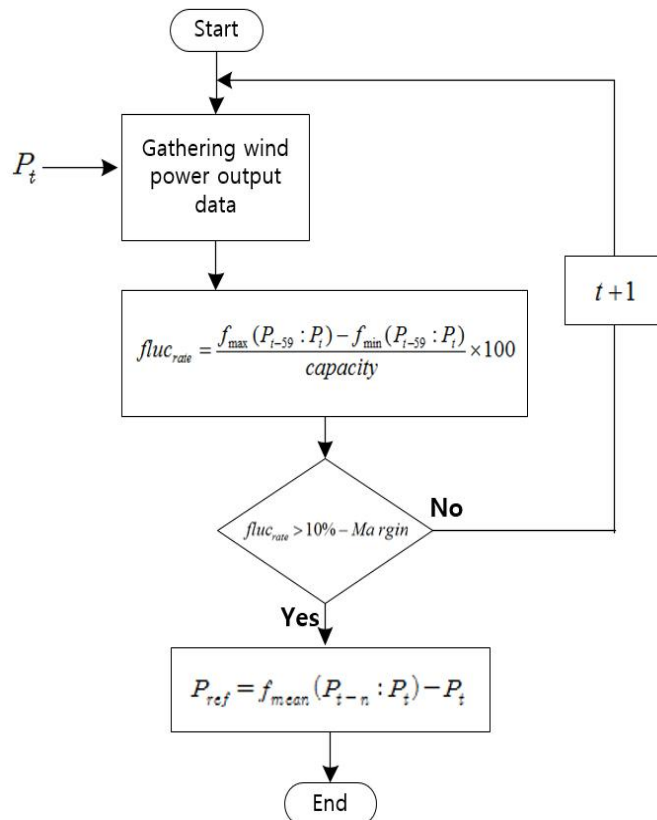


Fig. 5 Algorithm for proposed method

제안된 방법은 분당 변동률이 10%를 초과하였을 때만 ESS가 동작하도록 설계 되었으며, 이때 여유분(margin)을 통해 풍력 출력 평활화의 효과를 더욱 개선시킬 수 있도록 하였다. 본 논문에서는 여유분을 0.5%로 설정하였으며, 따라서 풍력 출력 분당 변동률이 9.5%를 초과하였을 시 동작하도록 하였다.

ESS의 출력을 결정하는 단기 풍력 출력 평균값은 단기 평균 구간 수 n 에 의해 결정된다. 이때 n 의 크기가 클수록 평활화 효과는 높으나, ESS의 용량과 출력이 방대하게 커지며 충·방전 횟수가 잦아지는 경향이 있다. 따라서 본 논문에서 PCS의 용량을 단지용량의 10%로 제한하였을 때 2015년 2월 21일 기준으로 분당 변동률을 최소로 유지함과 동시에 ESS 충·방전 횟수를 최소화한 단기 평균 구간 수 n 의 값을 2초부터 60초까지 컴퓨터 해석을 통해 6으로 도출하였다.

3. 제안된 방법의 효과 분석

제안된 풍력출력 평활화 제어의 분당 출력 변동률을 비교·분석하기 위하여 2015년 2월 21일과 2015년 3월 24일 실제 풍력발전단지 출력 데이터를 기존의 지역통과필터 제어와 램프비율 제어방법에도 동일하게 적용하였다. 여기서 각각의 적용된 제어방법별 ESS 출력 요구치의 부호 변화 횟수는 1일간의 ESS의 충·방전 횟수를 의미하며, 절대 값의 적분 값은 ESS로 충·방전된 에너지의 하루 총량을 의미한다. 이때 선행 사례인 제주특별자치도 실증사업의 구매요구서에 명시된 PCS 효율 90%와 배터리 Round trip 효율 90%을 토대로 종합 효율을 약 85.4%로 산정하였으며, 이를 통해 손실을 계산하였다 [5].

3.1 평균 이용률 시 효과 분석

그림 6은 풍력발전 출력이 평균 이용률을 기록한 2015년 2월 21일 실제 풍력발전 출력을 나타낸다. 해당 일의 풍력발전 출력 분당 변동률은 최고 약 27.9%를 기록한 것을 그림 7를 통해 확인 할 수 있다.

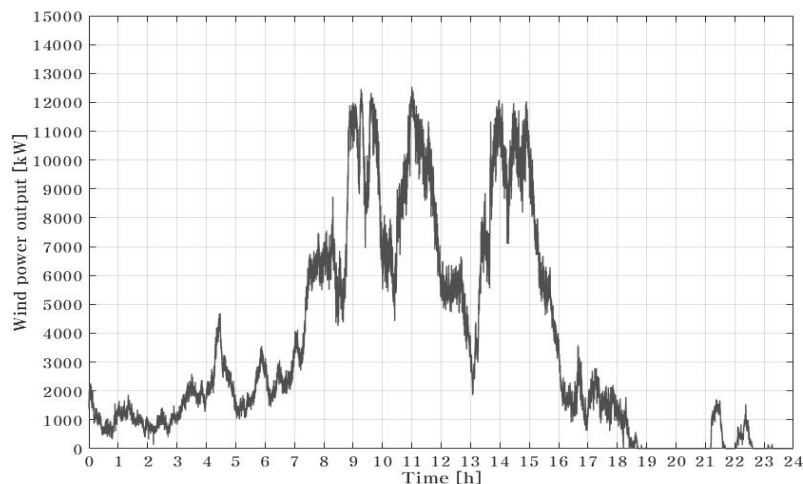


Fig. 6 Output power of wind farm on Feb. 21 2015

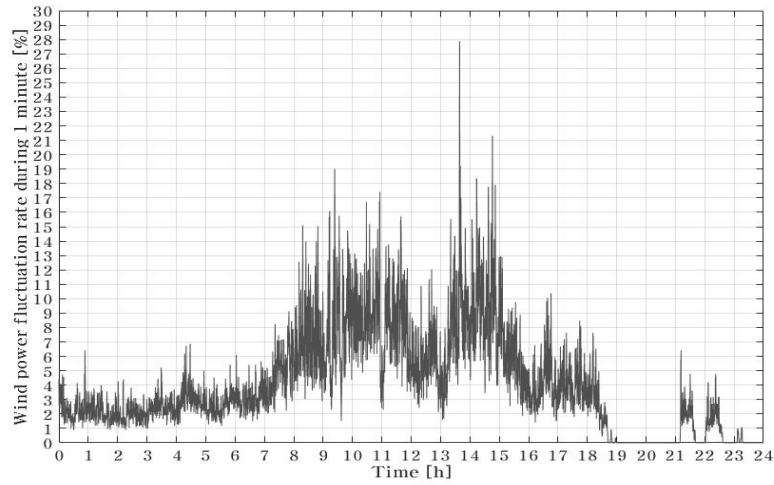


Fig. 7 Wind power fluctuation rate during 1 minute
on Feb. 21 2015

가. 저역통과필터를 이용한 풍력출력 평활화 제어

그림 8은 2015년 2월 21일 기준 저역통과필터를 적용한 풍력출력 평활화 제어 시 풍력과 ESS의 합성출력을 나타낸다. 그림 6과 비교할 때 상당히 평활화된 것을 확인할 수 있으나, 17시까지 ESS의 충·방전이 끊이지 않고 이어지는 것을 그림 9를 통해 확인할 수 있다. 또한 그림 10은 풍력출력 분당 변동률을 나타낸 것으로 대부분 설정된 10% 이하로 유지하나 PCS의 용량에 따른 출력 제한이 있기 때문에 모든 출력을 평활화 시키지 못하는 것을 나타내고 있다.

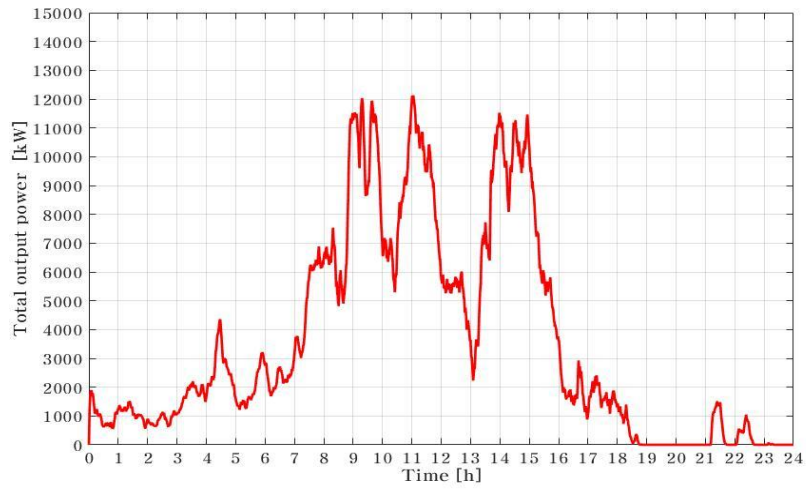


Fig. 8 Output power of wind farm with ESS by LPF on Feb. 21 2015

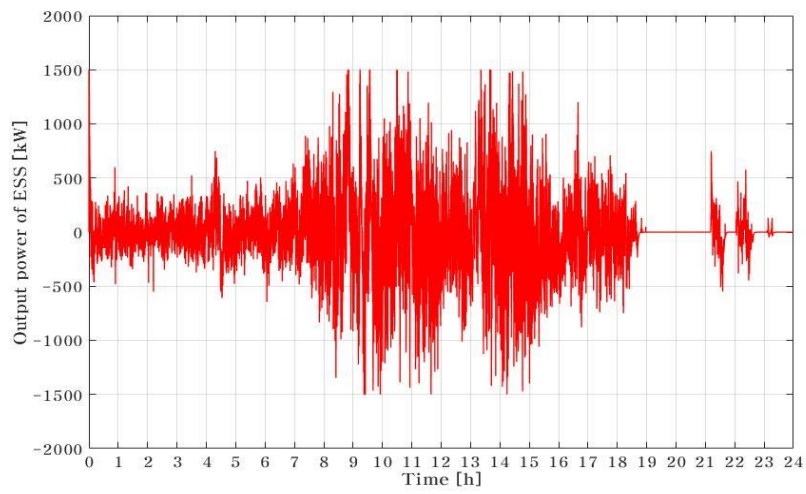


Fig. 9 Output power of ESS by LPF on Feb. 21 2015

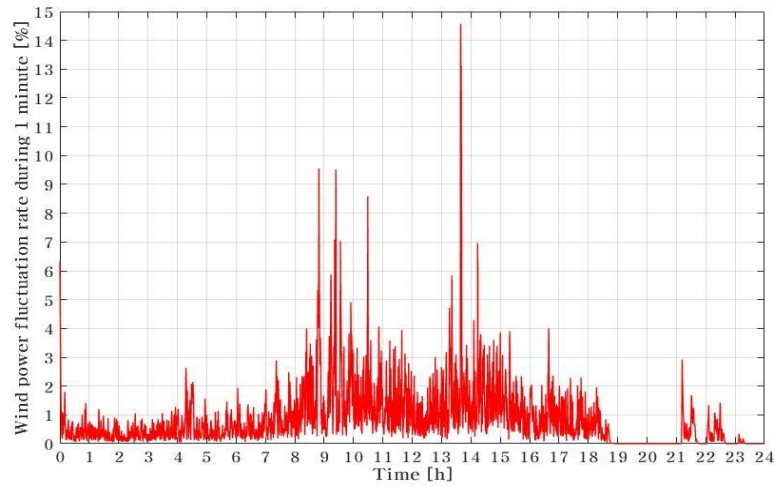


Fig. 10 Wind power fluctuation rate during 1 minute by LPF on Feb. 21 2015

나. 램프비율 제어를 이용한 풍력발전 출력 제어

그림 11은 램프비율 제어 알고리즘을 이용하여 2015년 2월 21일 풍력출력과 ESS의 출력이 합성된 출력을 나타낸다. 이때 그림 6과 비교해 보았을 때 거의 일치하는 모습을 보여준다. 그림 12는 램프비율 제어 시 ESS의 출력을 나타내며, 그림 9의 저역통과필터를 이용한 평활화 제어 시 ESS 출력과 비교하였을 때 ESS의 충·방전 횟수가 많이 줄어든 것을 확인할 수 있으나, 그림 13의 풍력발전 분당 변동률에 있어서는 10%를 초과하는 경우가 다소 많이 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

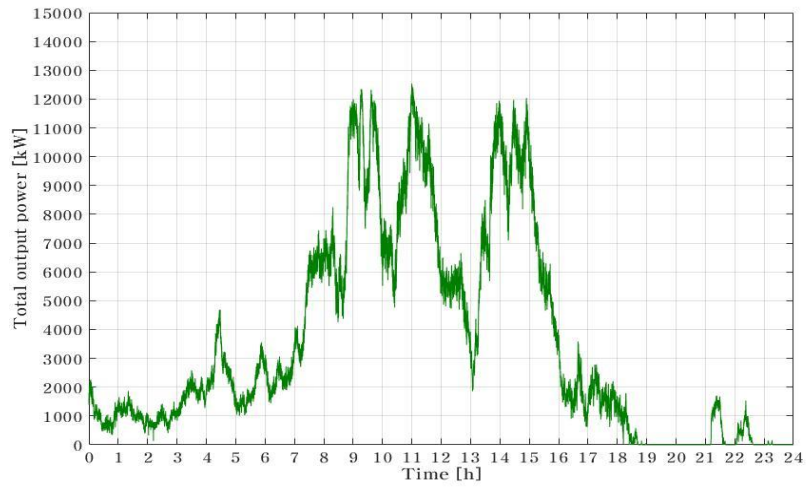


Fig. 11 Output power of wind farm by ramp rate control on Feb. 21 2015

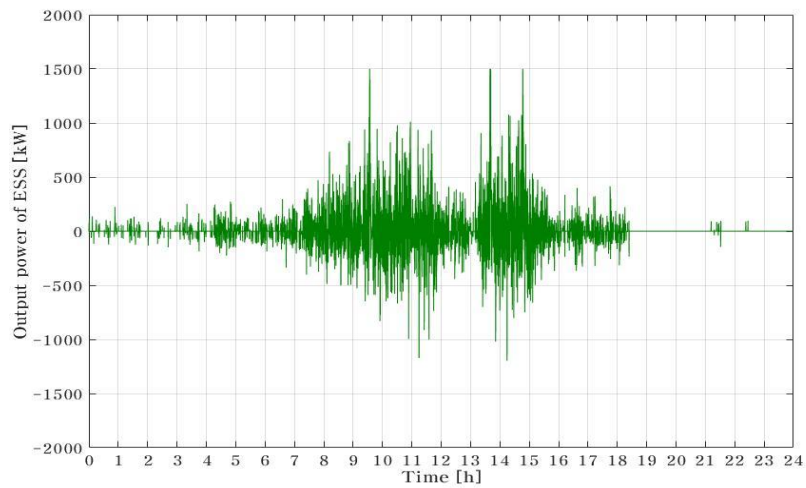


Fig. 12 Output power of ESS by ramp rate control on Feb. 21 2015

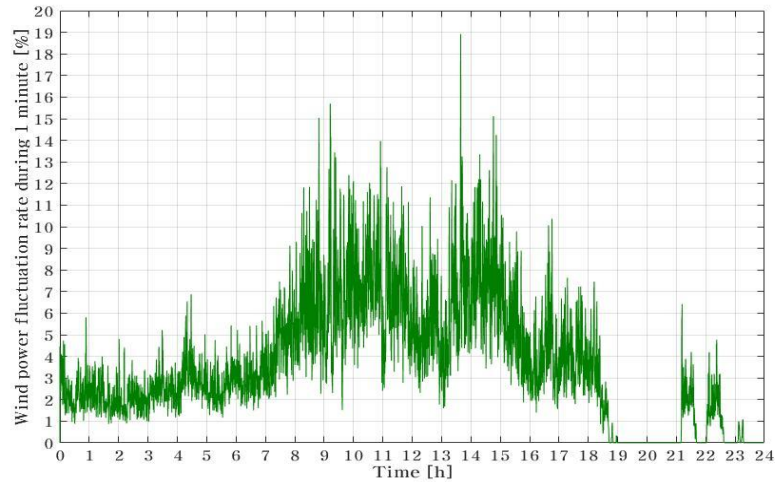


Fig. 13 Wind power fluctuation rate during 1 minute by ramp rate control on Feb. 21 2015

다. 단기 평균값을 이용한 평활화 제어

그림 14는 제안된 풍력출력 평활화 방법을 적용하였을 때 풍력과 ESS의 합성 출력을 나타낸다. 기존의 풍력출력과 비교하였을 때 유사한 출력을 보이고 있다. 그림 15는 제안된 방법을 적용하였을 때 ESS 출력을 나타낸다. 램프비율 제어 시 ESS의 출력과 유사한 출력을 보이고 있으나, 출력의 크기는 커진 것을 확인할 수 있으며 저역통과필터를 이용한 평활화 방법과 비교하였을 때는 ESS 총·방전 횟수가 많이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그림 16은 제안된 방법을 사용하였을 때 풍력출력 분당 변동률을 나타낸다. 이때 07시까지의 풍력 출력 분당변동률은 10% 미만이므로 제어를 수행 하지 않는 것을 그림 15의 ESS의 출력그래프를 통해 확인할 수 있다. 그러나 08시경부터 분당 변동률이 10%를 초과하여 제어를 시작하는 것을 확인할 수 있으며, 약 17시 이후부터 다시 분당 변동률이 10%이하로 안정화되어 제어를 중단하는 것을 확인할 수 있다.

또한 제어가 진행되는 기간 중에도 분당 변동률이 10%를 초과하는 경우가 다소 나타나는데 이는 PCS의 용량에 따른 출력 제한이 있기 때문이다.

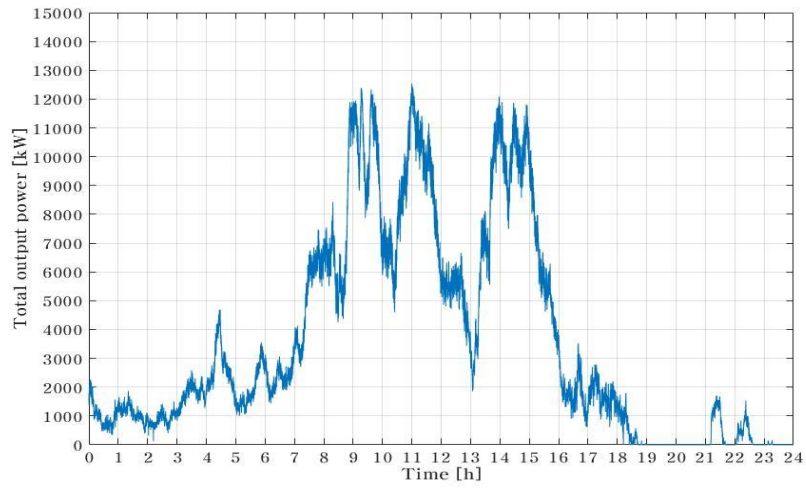


Fig. 14 Output power of wind farm by proposed method on Feb. 21 2015

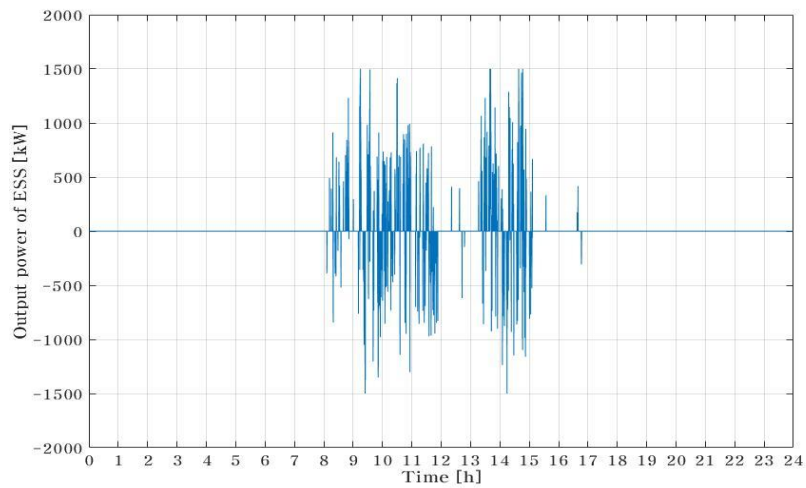


Fig. 15 Output power of ESS by proposed method on Feb. 21 2015

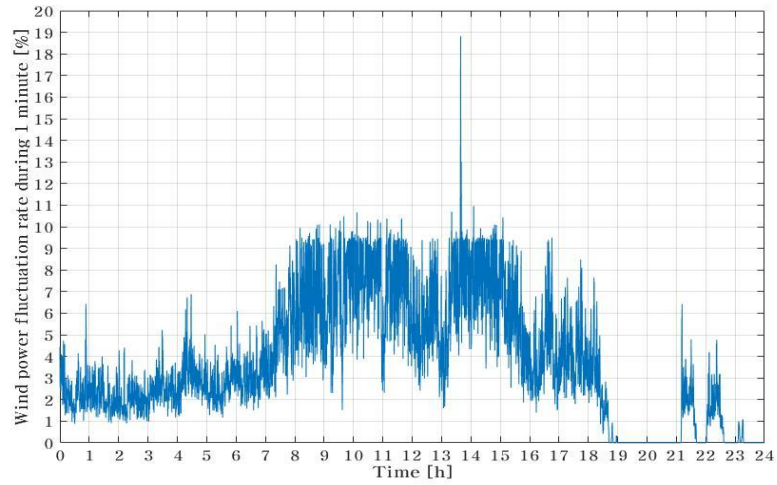


Fig. 16 Wind power fluctuation rate during 1 minute by proposed method on Feb. 21 2015

3.2 최대 이용률 시 효과 분석

제안한 방법의 타당성을 검증하기 위하여 그림 17와 같이 풍력발전 출력이 측정된 데이터 중 가장 큰 2015년 3월 24일을 택하여 컴퓨터 해석하였다. 해당 일의 풍력발전 출력 분당 변동률은 최고 약 29.9%를 기록한 것을 그림 18을 통해 확인할 수 있다.

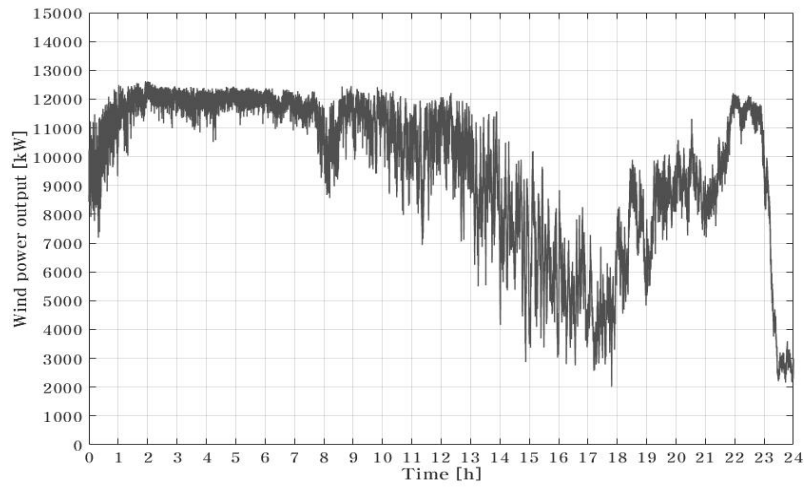


Fig. 17 Output power of wind farm on Mar. 24 2015

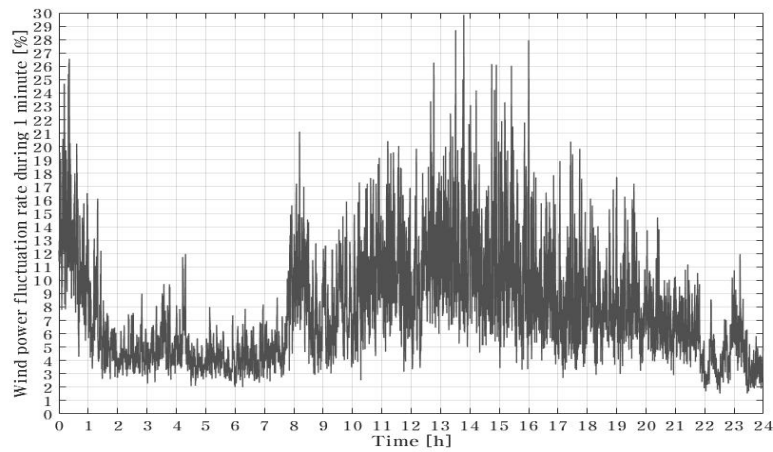


Fig. 18 Wind power fluctuation rate during 1 minute on Mar. 24 2015

가. 지역통과필터를 이용한 풍력출력 평활화 제어

그림 19는 2015년 3월 24일 기준 지역통과필터를 사용한 풍력출력 평활화 제어 시 풍력과 ESS의 합성출력을 나타낸다. 이때 풍력출력 평활화 시정수 τ 는 2015년 2월 21일 기준인 79를 그대로 사용하여 컴퓨터 해석하였다. 그림 8과 마찬가지로 그림 17과 비교할 때 상당히 평활화된 것을 확인할 수 있으나, ESS의

충·방전이 24시간 동안 끊이지 않고 이어지는 것을 그림 20을 통해 확인할 수 있다. 또한 그림 21의 풍력출력 분당 변동률인 경우 대부분 설정된 10% 이하로 유지하고 있으나, 평활화시정수 τ 의 값이 2015년 2월 21일 값과 동일하기 때문에 변동률은 이전만큼 개선되지 않는 것을 확인 할 수 있다. 이 경우 평활화 시정수 τ 를 바꾸어 주어야 하나, 이를 위해서는 풍력 발전량 예측이 아닌 변동률에 대한 예측이 필요하기 때문에 현실적인 어려움이 있다.

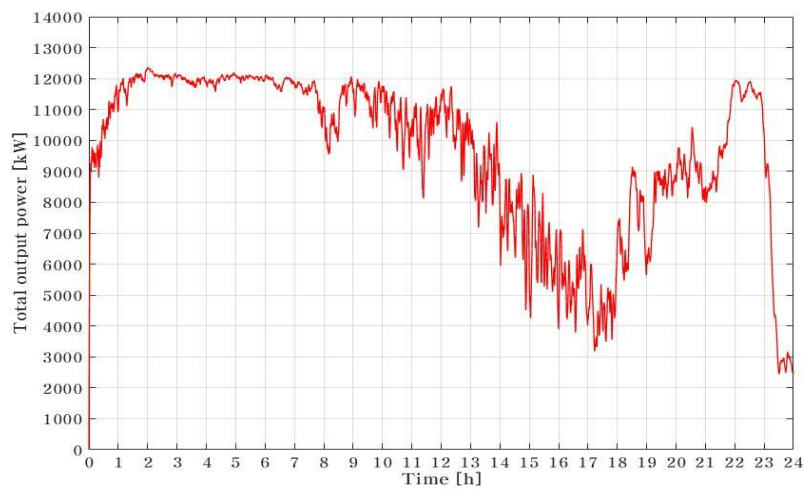


Fig. 19 Output power of wind farm by LPF on Mar. 24 2015

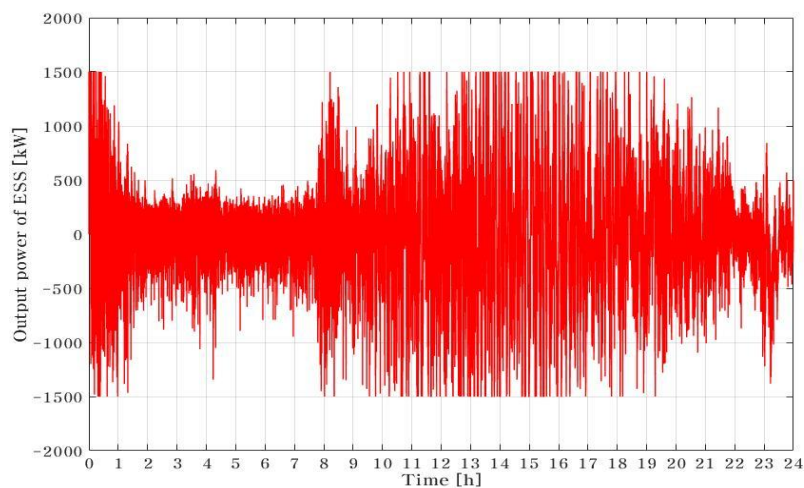


Fig. 20 Output power of ESS by LPF on Mar. 24 2015

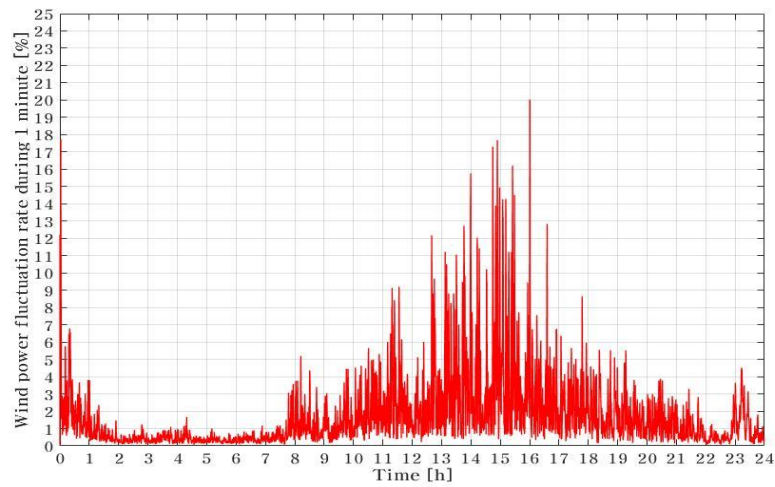


Fig. 21 Wind power fluctuation rate during 1 minute by LPF on Mar. 24 2015

나. 램프비율 제어를 이용한 풍력발전 출력 제어

그림 22는 2015년 3월 24일 기준 풍력과 ESS의 합성출력을 나타낸다. 이때 제어 전인 그림 17와 비교해 보았을 때 상당히 일치하는 결과를 보여준다. 그림 23는 램프비율 제어 시 ESS 출력을 나타내며, 그림 20의 저역통과필터를 이용한 평활화 제어 시 ESS 출력과 비교하였을 때 ESS의 운전이 많이 줄어든 것을 확인할 수 있으나, 2015년 2월 21일인 그림 12와 비교하였을 때는 상당히 증가한 것을 확인할 수 있다. 그림 24의 풍력발전 분당 변동률에 있어서는 10%를 초과하는 경우가 다소 많이 나타는 경향을 확인할 수 있다.

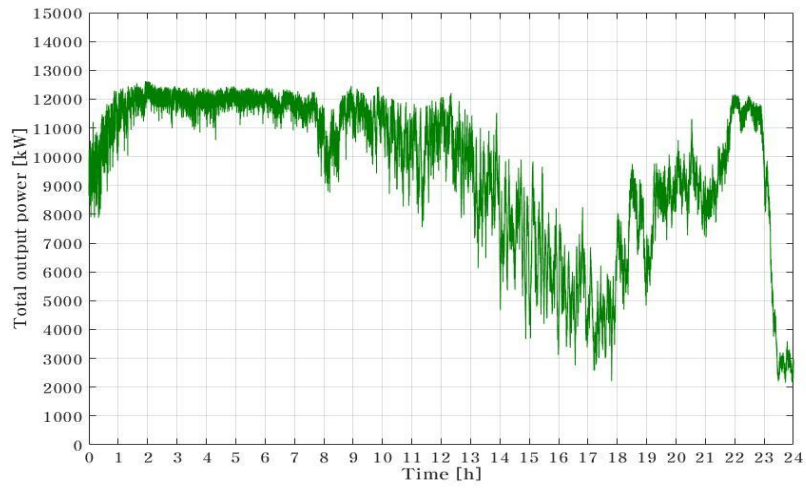


Fig. 22 Output power of wind farm by ramp rate control on Mar. 24 2015

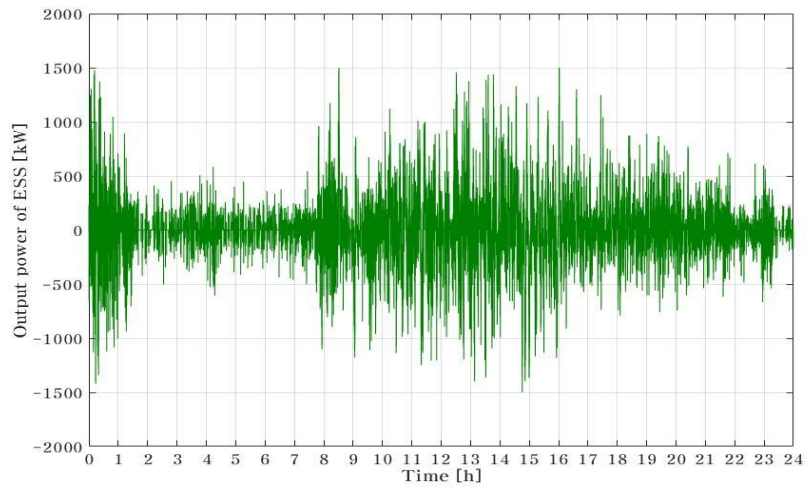


Fig. 23 Output power of ESS by ramp rate control on Mar. 24 2015

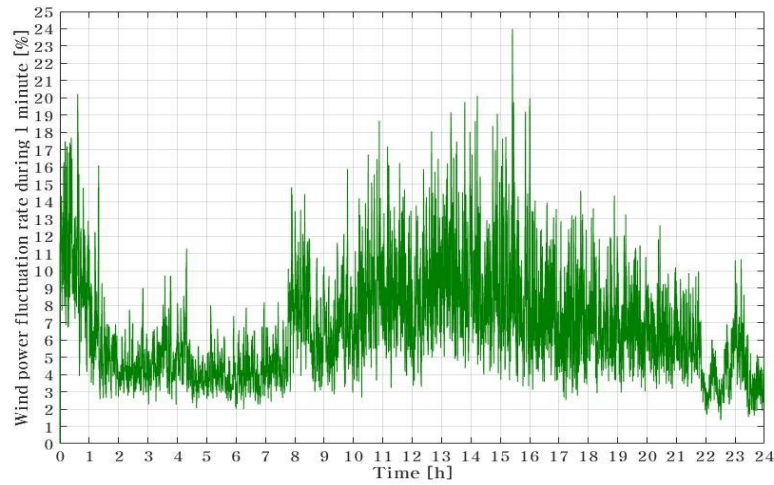


Fig. 24 Wind power fluctuation rate during 1 minute by ramp rate control on Mar. 24 2015

다. 단기 평균값을 이용한 평활화 제어

그림 25는 2015년 3월 24일 기준으로 제안된 풍력출력 평활화 방법을 적용하였을 때 풍력과 ESS의 합성출력을 나타낸다. 이때 단기 평균 구간 수인 n 은 2015년 2월 21일과 동일하게 6을 적용하여 컴퓨터 해석 하였다. 기존의 풍력출력과 비교하였을 때 램프비율 제어와 마찬가지로 유사한 출력을 보이고 있다. 그림 26은 제안된 방법을 적용하였을 때 ESS 출력을 나타낸다. 램프비율 제어 시 ESS의 출력과 유사한 출력을 보이고 있으나 출력의 크기는 커진 것을 확인할 수 있으며, 풍력 출력 변동률이 10% 이하에서 대부분 출력을 하지 않는 것을 확인할 수 있다. 저역통과필터를 이용한 평활화 방법과 비교하였을 때는 ESS 운전이 상당히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 그림 27은 제안된 방법을 사용하였을 때 풍력 출력 분당 변동률을 나타낸다. 이때 02시부터 08시까지는 풍력 출력 분당변동률은 대부분 10%미만이므로 제어를 거의 수행 하지 않는 것을 그림 26의 ESS 출력으로부터 확인할 수 있다. 허나 그 외 분당 변동률이 10%를 초과한 대부분의 지점에서 제어를 시작하는 것을 확인할 수 있다. 제어기간 중 분당 변동률이 10%를 초과한 경우는 시간지연과 PCS의 용량에 따른 출력제한 때문이다.

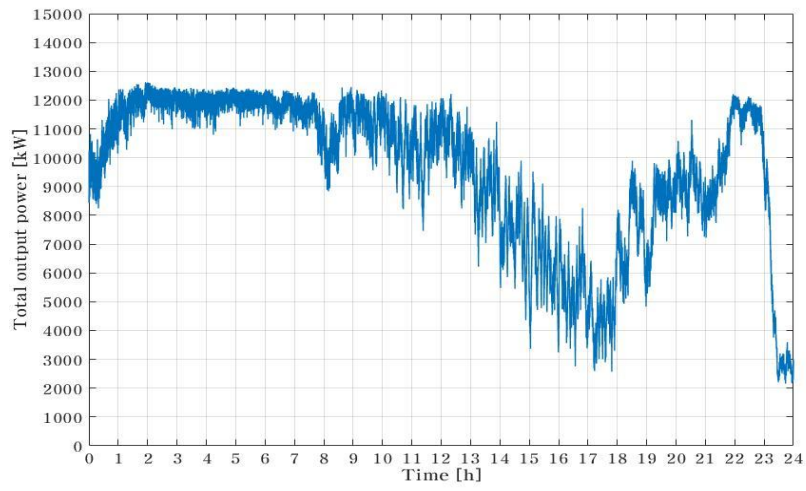


Fig. 25 Output power of wind farm by proposed method on Mar. 24 2015

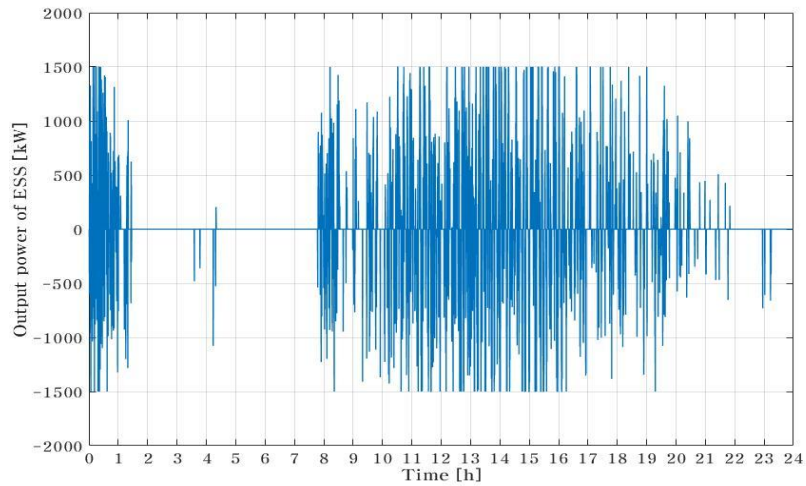


Fig. 26 Output power of ESS by proposed method on Mar. 24 2015

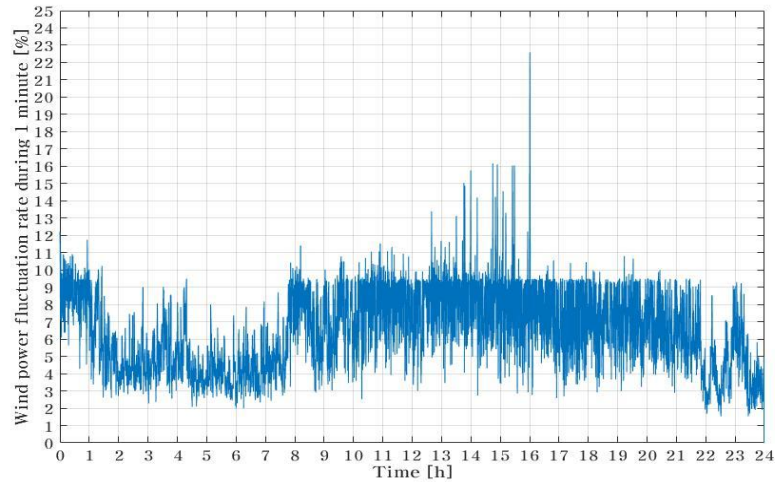


Fig. 27 Wind power fluctuation rate during 1 minute by proposed method on Mar. 24 2015

3.3 결과 및 고찰

표 1은 2015년 2월 21일을 기준으로 저역통과필터를 이용한 평활화 제어, 램프비율 제어 그리고 제안된 방법을 각각 컴퓨터 해석한 결과를 수치화하여 정리하였다. 제안된 방법의 경우에는 저역통과필터 제어보다 최대 분당 변동률은 약 4% 정도, 10%를 초과하는 분당 변동률도 약 4% 정도 큰 값으로 나타났으나, ESS의 가동시간과 충·방전 횟수에 있어서는 각각 약 24배, 15배의 우수한 값을 보였다. 램프비율 제어에 비해서는 최대 분당 변동률은 거의 유사한 값을 나타내었으나, 이를 제외한 모든 면에서 우수한 결과를 나타내었다. 각 제어방법에서 제어기간 중 10%를 초과하는 분당 변동률이 나타나는 이유는 시간지연과 PCS의 용량제약에 기인한다.

Table 1. Simulation results on Feb. 21 2015

Items	Normal operation	LPF	Ramp rate control	Proposed method
Maximum wind power fluctuation rate [%]	27.9	14.6	18.9	18.8
The number of wind power fluctuation rate over 10% [times]	6,438	83	2,392	371
Operation time of ESS [s]	-	74,307	15,373	2,995
Charging and discharging cycles of batteries [cycle]	-	6,448	4,026	437
Total losses [kWh]	-	687	147	75

표 2는 2015년 3월 24일을 기준으로 2015년 2월 21일의 파라미터를 적용하였을 때의 저역통과필터를 이용한 평활화 제어, 램프비율 제어 그리고 제안된 방법을 각각 컴퓨터 해석한 결과를 수치화 하여 정리하였다. 제안된 방법의 경우 저역통과필터 보다 최대 분당 변동률은 약 2% 높게 나타나있고, 10%를 초과하는 분당 변동률 역시 약 5% 정도 높은 수치를 나타내었으나, ESS의 가동시간에서는 5배, 충·방전 횟수에 있어서는 7배 이상의 우수한 결과를 나타내었다. 램프비율 제어에 비해서는 손실을 제외한 모든 면에서 우수한 결과를 나타내었다.

Table 2. Simulation results on Mar. 24 2015

Items	Normal operation	LPF	Ramp rate control	Proposed method
Maximum wind power fluctuation rate [%]	29.9	20.0	24.0	22.6
The number of wind power fluctuation rate over 10% [times]	23,244	1,023	12,970	2,169
Operation time of ESS [s]	-	86,400	35,565	13,915
Charging and discharging cycles of batteries [cycle]	-	9,593	7,810	1,434
Total losses [kWh]	-	1,330	445	461

표 1과 2에서 나타난 각 제어방법별 10%를 초과하는 분당 변동률의 원인은 시간 지연과 제한된 PCS용량에 의해서 나타난다. 따라서 이를 최소화하기 위해서는 향후 제안된 방법 이외의 새로운 알고리즘에 대한 연구를 할 필요가 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 풍력발전단지의 출력 안정화를 위하여 단기 평균값을 이용한 풍력 출력 평활화 방법을 제안하였으며, 기존 방법들과 비교·분석하고 실제 계통 적용을 위한 컴퓨터 해석을 수행하였다.

제안된 방법은 평활화 기법과 램프비율 제어의 장점을 모두 가질 수 있도록 설계하였다. 이때 풍력 출력의 개선은 평활화 방법 중 하나인 단기 평균값을 이용하여 평활화 하였으며, 램프비율 제어와 마찬가지로 제어가 필요한 시점에서만 ESS를 동작할 수 있도록 제어 알고리즘을 설계하였다. 이때 ESS의 제어 수행 여부는 풍력 출력의 기울기가 아닌 분당 변동률에 의하여 결정하도록 하였다.

기존의 방법들과 제안된 방법을 Matlab 프로그램을 사용하여 비교·분석한 결과, 저역통과필터를 이용한 평활화 방법과 비교하였을 때 평활화 측면에서는 저역통과필터를 사용한 평활화 방법이 더 우수하였으나, ESS의 가동률과 충·방전 횟수의 저감을 위해서는 제안된 방법이 더 효과적이었다. 또한 램프비율 제어와 비교하였을 때는 분당 변동률과 충·방전 횟수에서 모두 우수한 특성을 보였다.

제안된 방법을 ESS에 도입한다면 풍력 출력의 안정화를 통하여 전력계통 안정도 향상에 기여할 뿐만 아니라 ESS의 가동률과 충·방전 횟수를 저감할 수 있어서 배터리의 수명 또한 증대될 수 있을 것이며, 향후 제안된 방법과 다른 풍력 출력 안정화 기법들을 결합한 방법들을 연구한다면 풍력발전 출력 안정화에 더욱 효과적인 방법을 도출할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Stijn Cole, Karim Karoui Til Kristian Vrana, Olav B. Fosso Jean-Baptiste Curis, Anne-Marie Denis, Chen-Ching Liu, “A EUROPEAN SUPERGRID: PRESENT STATE AND FUTURE CHALLENGES”, 17th Power Systems Computation Conference, 2010.
- [2] Feltes J.W, Gemmell B.D, Retzmann D, “From Smart Grid to Super Grid: Solutions with HVDC and FACTS for grid access of renewable energy sources”, Power and Energy Society General Meeting, 2011.
- [3] SAFT, “Saft and ENERCON’s megawatt-scale energy storage system to help Faroe Islands stabilize its grid while increasing wind power usage”, Press release, 2015.
- [4] 제주특별자치도, “제주형 저탄소 녹색성장 - Carbon Free Island Jeju by 2030”, 2012.
- [5] 제주특별자치도, “풍력발전기 출력안정용 에너지저장장치 시범구축사업 공고”, 제주특별자치도 공고 제 2015-1115호, 2015.
- [6] LIN Jin, Sun Yuan-zhang , Poul Sorensen, Li Guo-jie, Li Xiong, “Frequency modeling of wind power fluctuation and the application on power systems” in Proc. Int. International Conference on Power System Technology, pp. 1~8, 2010.
- [7] Changling Luo, Hadi Banakar, Baike Shen, Boon-Teck Ooi, “Strategies to Smooth Wind Power Fluctuations of Wind Turbine Generator” IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 22, pp. 341~349, 2007.
- [8] Andrew Hamann, Gabriela Hug, “Using cascaded hydropower like a battery to firm variable wind generation”, 2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.
- [9] Duehee Lee, Joonhyun Kim, Ross Baldick, “Stochastic Optimal Control

of the Storage System to Limit Ramp Rates of Wind Power Output”,
IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 4, No. 4, pp2256-2265, 2013.

[10] Ali Esmaili, Adel Nasiri, “Power smoothing and power ramp control for wind energy using energy storage”, 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2011.

[11] 한국전력공사, “송·배전용 전기설비 이용규정 : 별표 6 신재생발전기 계통 연계기준”, 2013.

[12] 진경민, “풍력발전단지의 유효전력 증발률 조정을 위한 BESS 용량 산정”, 제주대학교, 2013.

感謝의 글

대학 졸업 후 직장생활과 병행하면서 대학원 전기공학과에 입학한지도 어느덧 16년이 흘렀습니다.

그동안 직장과 가정생활을 핑계로 석사 학위논문을 제출하지 못한 저에게 애정 어린 조언과 격려를 베풀어 주신 김일환 지도교수님께 먼저 감사의 말씀을 전합니다.

교수님께서서는 항상 배움을 게을리 말라는 가르침을 주시는 참스승의 본모기를 보여주신 바, 저로 하여금 매너리즘으로부터 벗어나게 해주신 좋은 귀감이셨습니다. 아울러 새롭게 배우고 익힌다는 자세로 학위논문을 준비하게 된 계기 또한 교수님의 격려가 아니었다면 지금 이 자리가 없었을 것입니다.

논문 준비기간과 논문심사를 준비하면서, 논어의 ‘學如不及 猶恐失之’(배움이 미치지 못하는 듯이 생각하여 끊임없이 노력하고 오히려 그것을 잃을까 두려워해야 한다)란 글귀가 단순한 자구에 불과하지 않다는 것을 깨닫는 소중한 경험이 되었습니다.

학문적 조언과 지도로 논문의 부족함을 보완하고 심사해 주신 김세호 교수님과 진영규 교수님께도 깊은 감사를 드립니다.

기계공학을 전공한 저에게는 전기공학이 낯설고 어렵게 느껴지는 분야였지만 항상 열정적으로 가르쳐 주시고 하나라도 더 배울 수 있도록 배려해 준 오성보 교수님, 이개명 교수님, 김호찬 교수님, 김호민 교수님께도 지면을 통해 감사의 뜻을 전합니다.

본 논문의 준비와 작성을 위해 필요한 프로그램의 사용법과 실험방법을 자기 일처럼 성심성의껏 도와준 대현, 상현 후배, 논문의 행정적 처리와 제출과정을 도맡아 해결해 준 민혁 후배에게도 함께 고마움을 전합니다.

아울러 논문을 준비하는 동안 물심양면으로 후원하고 든든한 버팀목이 되어준 성희와 학문적 결실의 기쁨을 함께 하고 싶고 그동안 관심과 애정에 소홀했던 두 아들 영찬, 영빈에게도 사랑한다는 말을 전합니다.

짧은 시간이나마 배움의 가치를 깨닫게 되었던 소중한 경험을 되새겨 평생 배

우고 익혀야 한다는 마음가짐을 가지고 하루하루를 日日又日新하는 자세로 최선을 다하겠습니다.

감사합니다.