



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2022-0028756
(43) 공개일자 2022년03월08일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/02 (2006.01) F03D 7/04 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F03D 7/0284 (2013.01)
F03D 7/048 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-0110193
(22) 출원일자 2020년08월31일
심사청구일자 2020년08월31일

(71) 출원인
인천대학교 산학협력단
인천광역시 연수구 아카데미로 119 (송도동)
(72) 발명자
김학만
서울특별시 서대문구 성산로7길 45(연희동)
이운규
인천광역시 연수구 송도미래로 30, 송도 BRC 스마
트밸리 지식산업센터 C동 905호(송도동)
부이반하이
인천광역시 연수구 아카데미로 119, 인천대학교
9호관 107호(송도동)
(74) 대리인
특허법인충정

전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템

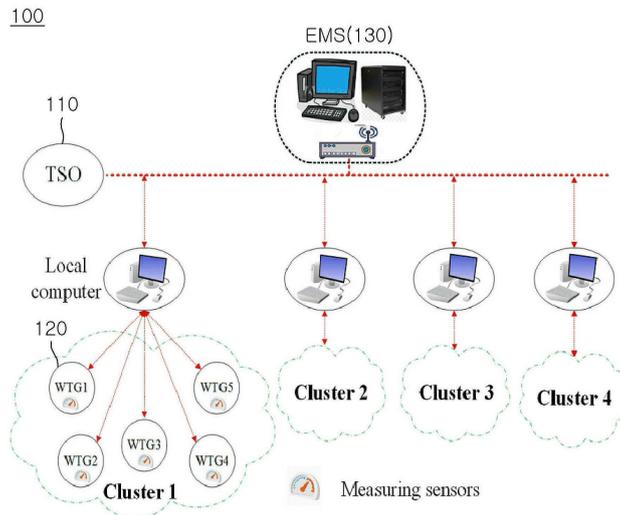
(57) 요약

풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템은 계통접속규정을 만족하기 위하여 복수의 풍력 터빈 발전기 간 전력 편차를 감소시키기 위한 운용 알고리즘을 적용하여 계통 운영자의 요구에 따른 출력 변동 시 풍력 발전기의 불필요한 전력 변동을 저감시켜 풍력 발전기 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 효과가 있다.

본 발명은 발전기 운영 전략을 사용하면, 풍력 터빈 발전기의 설정점 변경이 최소화되고, 풍력 터빈 발전기의 출력 전력이 더 부드러워지고 불필요한 변동이 방지할 수 있는 효과가 있다.

본 발명은 풍력 발전기 시스템 내에 이벤트 상황이 발생하더라도 이벤트 종류에 따른 설정점(set point)을 결정하여 최적의 전력 운영을 달성할 수 있는 효과가 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

F05B 2270/337 (2013.01)

Y02E 10/76 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	2018007200
과제번호	R18XA03
부처명	한국전력공사 전력연구원
과제관리(전문)기관명	한국전력공사 전력연구원 기초연구센터
연구사업명	전력산업 기초연구 에너지 거점대학 클러스터
연구과제명	10MW급 초전도풍력발전기 기반 부유식 해상풍력발전 플랫폼용 기초기술개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	인천대학교 산학협력단
연구기간	2018.03.01 ~ 2021.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부와, 상기 총 출력 전력과 상기 필요 전력량보다 작으면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기를 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 운전을 수행하고, 상기 총 출력 전력이 상기 필요 전력량보다 크면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한하는 최대 출력 제한 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

청구항 2

전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부와, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력을 일정 출력 비율로 감소 운전하여 상기 계통접속규정을 만족하는 일정 출력 감소 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

청구항 3

전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부;

상기 각각의 풍력 터빈 발전기에서 발생하는 이벤트 상황을 수신하여 이벤트 종류를 판단하는 이벤트 처리부;

상기 이벤트 종류에 따라 상기 총 출력 전력과 상기 필요 전력량보다 작으면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기를 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 운전을 수행하고, 상기 총 출력 전력이 상기 필요 전력량보다 크면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한하는 최대 출력 제한 운전부; 및

상기 이벤트 종류에 따라 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력을 일정 출력 비율로 감소 운전하여 상기 계통접속규정을 만족하는 일정 출력 감소 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 전력 편차를 최소화하는 알고리즘은 하기의 수학식 1과 수학식 2에 의해 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 설정점(set-point)을 결정하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

[수학식 1]

$$\text{Min} \left\{ \sum_{t=1}^T p_{\Delta,t} \cdot \Delta P_t + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N p_{n,t} \cdot |P_{n,t} - P_{n,t-1}| \right\}$$

여기서, $P_{\Delta,t}$ 는 t 구간에서 전력 불균형에 대한 패널티(W/MW), $P_{2,t}$ 는 t구간에서 불균형 전력량(MW),

P_n^{\min} 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 전력 편차에 대한 패널티(W/MW), $P_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈

발전기 n 의 설정점(set-point)(MW), $P_{n,t-1}$ 는 $t-1$ 구간에서 풍력 터빈 발전기 n 의 설정점(set-point)(MW)임.

[수학식 2]

$$\Delta P_t = \max \left\{ 0, D'_t + P_{wf,t}^{loss} - \sum_{n=1}^N P_{n,t} \cdot s_{n,t} \right\} \quad \forall t \in T$$

여기서, D'_t 는 t 구간에서 HVDC 손실을 고려하여 요구되는 전력량(MW), $P_{wf,t}^{loss}$ 는 t 구간에서 풍력 발전기 시스템의 전력 손실(MW), $s_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n 의 상태임.

청구항 5

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 전송 시스템 운영자는 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 하기의 수학식 3과 수학식 4에 의해 계산하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

[수학식 3]

$$D'_t = \begin{cases} \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) & \text{if } \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) < \frac{P_t^{\lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc})} \\ \frac{P_t^{\lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc})} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall t \in T$$

여기서, P_t^{\lim} 는 t 구간에서 제한 출력(MW), L^{hvdc} 는 HVDC 선로 손실(%), η 는 HVDC 컨버터 효율(%), $P_{n,t}^{avail}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n 의 가용 발전량(MW)임.

[수학식 4]

$$D_t^{pcc} = D'_t \cdot \eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc}) \quad \forall t \in T$$

여기서, D_t^{pcc} 는 t 구간에서 계통접속점(PCC)에서 요구되는 전력량(MW)임.

청구항 6

제3항에 있어서,

상기 에너지 관리 시스템은 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 설정점(set-point)을 결정하기 위한 목적 함수를 하기의 수학식 5에 의해 표현하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

[수학식 5]

$$\text{Min} \left\{ \sum_h^T P_{\Delta,t} \cdot \Delta P_t + \sum_h^T \sum_{n=1}^{Ne} p_n \cdot |P_{n,t} - P_{n,t-1}| \right\}$$

여기서, h 는 이벤트 시간, N_h 는 구간 t 에서 운전하지 않은 풍력 터빈 발전기의 수, $N_e = N - N_h$ 는 구간 t 에서 운전 중인 풍력 터빈 발전기의 수임.

청구항 7

제3항에 있어서,

상기 에너지 관리 시스템은 이벤트 유형에 따라 필요한 전력을 하기의 수학적 식 6에 의해 표현하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

[수학적 식 6]

$$D_t = \begin{cases} \left\{ \text{Max} \left\{ \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}), \frac{P_t^{lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvd})} \right\} \right. & \text{if } \textit{limited power mode} \\ \left. (1 - p_t^{reser}) \cdot \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) \right. & \text{if } \textit{reserve power mode} \end{cases} \quad \forall t \in T$$

여기서, p_t^{reser} 는 구간 t 에서 풍력 발전기 시스템의 예비력(%)을 나타냄.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 이벤트 종류에 따라 상기 각각의 풍력 터빈 발전기에서 요구되는 출력 전력인 설정점(set-point)을 상기 수학적 식 5에 의해 상기 이벤트 종류를 고려하여 다시 재조정하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

청구항 9

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 각각의 풍력 터빈 발전기는 통신을 이용하여 상기 에너지 관리 시스템으로부터 전송받은 상기 각각의 풍력 터빈 발전기에서 요구되는 출력 전력인 설정점(set-point)을 기반으로 로컬 영역에서 출력 제어를 수행하는 것을 특징으로 하는 풍력 발전기 시스템.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 풍력 발전기 시스템에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는 계통접속규정을 만족하기 위하여 복수의 풍력 터빈 발전기 간 전력 편차를 감소시키기 위한 운용 알고리즘을 적용하여 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 전력 시스템은 환경 문제가 증가하고 화석 연료가 고갈됨에 따라 재생 가능 에너지 원의 침투가 증가했다. 특히, 세계 풍력 에너지 위원회는 2030년까지 전세계적으로 생성된 모든 에너지의 19%가 풍력 터빈 발전기(WTG)에서 생성될 수 있으며, 2050년에는 그 비율이 25 내지 30% 정도가 될 것이라고 계산했다. 더 많은 풍력 에너지가 이용됨에 따라 전력 시스템의 풍력 터빈 발전기의 수도 크게 증가했다. 각 풍력 터빈 발전기의 개별 작동은 전력 시스템 관리를 어렵게 만들 수 있다.

[0003] 따라서, 많은 풍력 터빈 발전기가 상호 연결되어 풍력 발전소 시스템을 형성한다. 따라서, 모든 풍력 터빈 발전기는 풍력 발전소 시스템의 공통 요구 사항을 충족하기 위해 중앙 집중식 컨트롤러에 따라 작동된다.

[0004] 일반적으로 소형 풍력 발전기 시스템은 전력 시스템에 최대 전력을 제공하기 위해 MPPT(Maximum Power Point Tracking)로 작동된다. 그러나 풍력 발전기 시스템은 크기가 급격히 증가함에 따라 풍력 발전기 시스템의 최대

출력 전력이 매우 커지는 경향이 있다. 따라서, MPPT로 대형 풍력 발전기 시스템을 운영하면, 전력 시스템, 특히 소형 또는 독립형 시스템의 안정성에 영향을 미칠 수 있다.

- [0005] 일반적으로 풍력발전단지는 풍황 상태에 따라 간헐적인 출력 특성을 가진다. 또한, 해상풍력발전단지의 경우 육상풍력발전에 비하여 풍속 변동량이 높다.
- [0006] 따라서, 계통과 연계되어 운영되는 풍력발전단지는 출력 변동을 일정량 이하로 줄어야 하며, 계통 운영자의 요구에 따라 풍력발전단지의 출력을 제어할 수 있는 능력이 요구된다.
- [0007] 국내에서는 풍력발전단지가 계통에 연계될 때 전압 및 유효전력, 무효전력에 대한 계통 접속 기준에 따라 운전되어야 한다.
- [0008] 풍력 발전소 시스템에서 풍력 터빈 발전기의 설정값은 풍력 발전소 운영자가 결정한다.
- [0009] 풍력 터빈 발전기는 연속된 두 간격으로 설정값이 변경되면, 풍력 발전소 시스템의 전력 변동, 즉 전력 편차가 발생한다.
- [0010] 많은 양의 전력 편차는 풍력 발전소 시스템의 작동에 부정적인 영향을 미칠 수 있다.
- [0011] 종래의 풍력 발전소 시스템은 발전전력 최대화 및 운전비용 최소화에 집중되어 있으며, 발전전력과 수요전력의 균형을 유지하기 위한 풍력 발전기의 전력 편차를 고려하지 않고 있다.
- [0012] 풍력 발전소 시스템이 계통접속규정에 따라 동작될 경우, 풍력 발전기는 최대출력전력이 제한될 수 있으므로 출력전력을 조정하여 수요전력과 균형을 이루어야 한다. 하지만 풍력 터빈 발전기의 출력 지점 변경은 도 1에 도시된 바와 같이, 풍력 발전기 간 전력 편차가 발생한다.

[0013] 시간 t 에서 두 개의 풍력 발전기는 각각 $P_{1,t}$ 및 $P_{2,t}$ 의 set point를 가지며, 시간 $t+1$ 에서 각각 $P_{1,t+1}$ 및 $P_{2,t+1}$ 의 set point를 가질 경우, 운영 구간 간 전력 편차가 ΔP_1 , ΔP_2 와 같다.

[0014] 이때, 풍력 터빈 발전기는 계통 운영자의 최대 출력 제어 요구량이 급변할 경우, 전력 편차가 증가하여 풍력 터빈 발전기에 악영향을 미친다.

선행기술문헌

특허문헌

[0015] (특허문헌 0001) 한국 등록특허번호 제10-13339952호

발명의 내용

해결하려는 과제

[0016] 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여, 본 발명은 계통접속규정을 만족하기 위하여 복수의 풍력 터빈 발전기 간 전력 편차를 감소시키기 위한 운용 알고리즘을 적용하여 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0017] 본 발명은 계통접속기준을 만족하기 위한 풍력 발전기 시스템의 발전기들의 전력 편차 최소화를 기반으로 하는 최적 설정점(set-point) 결정 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0018] 상기 목적을 달성하기 위한 본 발명의 특징에 따른 풍력 발전기 시스템은,

[0019] 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부와, 상기 총 출력 전력과 상기 필요 전력량보다 작으면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기를 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 운전을 수행하고, 상기 총 출력 전력이 상기 필요 전력량보다 크면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의

출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한하는 최대 출력 제한 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 한다.

- [0021] 본 발명의 특징에 따른 풍력 발전기 시스템은,
- [0022] 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부와, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력을 일정 출력 비율로 감소 운전하여 상기 계통접속규정을 만족하는 일정 출력 감소 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0024] 본 발명의 특징에 따른 풍력 발전기 시스템은,
- [0025] 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)로부터 계통접속규정과 시스템에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력을 수신하는 전력 수신부;
- [0026] 상기 각각의 풍력 터빈 발전기에서 발생하는 이벤트 상황을 수신하여 이벤트 종류를 판단하는 이벤트 처리부;
- [0027] 상기 이벤트 종류에 따라 상기 총 출력 전력과 상기 필요 전력량보다 작으면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기를 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 운전을 수행하고, 상기 총 출력 전력이 상기 필요 전력량보다 크면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한하는 최대 출력 제한 운전부; 및
- [0028] 상기 이벤트 종류에 따라 구간별로 전력 편차를 최소화하는 알고리즘을 적용하면, 상기 각각의 풍력 터빈 발전기의 출력을 일정 출력 비율로 감소 운전하여 상기 계통접속규정을 만족하는 일정 출력 감소 운전부로 이루어진 에너지 관리 시스템(Energy Management System)을 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0029] 기술한 구성에 의하여, 본 발명은 계통 운영자의 요구에 따른 출력 변동 시 풍력 발전기의 불필요한 전력 변동을 저감시켜 풍력 발전기 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 효과가 있다.
- [0030] 본 발명은 발전기 운영 전략을 사용하면, 풍력 터빈 발전기의 설정점 변경이 최소화되고, 풍력 터빈 발전기의 출력 전력이 더 부드러워지고 불필요한 변동이 방지할 수 있는 효과가 있다.
- [0031] 본 발명은 풍력 발전기 시스템 내에 이벤트 상황이 발생하더라도 이벤트 종류에 따른 설정점(set point)을 결정하여 최적의 전력 운영을 달성할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0032] 도 1은 종래 기술에 따른 풍력 발전기 시스템의 운영 문제를 나타낸 도면이다.
- 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 그리드 코드 제약을 나타낸 도면이다.
- 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템의 구성을 나타낸 도면이다.
- 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 EMS의 내부 구성을 간략하게 나타낸 블록도이다.
- 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 전력 램프 비율의 제한을 나타낸 도면이다.
- 도 6은 본 발명의 실시예에 따른 전력 요구 조건을 나타낸 도면이다.
- 도 7은 본 발명의 실시예에 따른 이벤트에 따라 스케줄링 프로세스의 개념을 나타낸 도면이다.
- 도 8은 본 발명의 풍력 터빈 발전기들의 전력 편차를 최소화하는 운영 알고리즘을 적용하지 않고, 설정점을 결정하는 개념을 나타낸 도면이다.

- 도 9는 본 발명의 실시예에 따른 제한 전력 모드에서 풍력 발전기 시스템의 출력 전력을 나타낸 도면이다.
- 도 10은 본 발명의 실시예에 따른 풍력 발전기 시스템의 전력 편차를 나타낸 도면이다.
- 도 11은 본 발명의 풍력 터빈 발전기들의 설정점에서의 변화를 나타낸 도면이다.
- 도 12는 예비 전력 모드에서 풍력 발전기 시스템에서의 출력 전력의 일례를 나타낸 도면이다.
- 도 13은 본 발명의 운용 알고리즘을 적용하거나 적용하지 않은 경우, 예비 전력 모드에서 풍력 발전기 시스템에서의 출력 전력의 일례를 나타낸 도면이다.
- 도 14는 본 발명의 운용 알고리즘을 적용하거나 적용하지 않은 경우, 풍력 터빈 발전기들의 설정점에서의 변화를 나타낸 도면이다.
- 도 15는 t3에서 이벤트가 발생한 경우, 풍력 발전기 시스템의 출력 전력의 일례를 나타낸 도면이다.
- 도 16은 t5에서 이벤트가 발생한 경우, 풍력 발전기 시스템의 출력 전력의 일례를 나타낸 도면이다.
- 도 17은 본 발명의 실시예에 따른 일반 상태에서 풍력 발전기 시스템의 운영 알고리즘을 나타낸 순서도이다.
- 도 18은 본 발명의 실시예에 따른 이벤트 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 운영 알고리즘을 나타낸 순서도이다.
- 도 19는 본 발명의 실시예에 따른 유효전력제어 운전 기준을 나타낸 도면이다.
- 도 20은 본 발명의 실시예에 따른 최대출력 제한 운전 결과를 나타낸 도면이다.
- 도 21은 본 발명의 실시예에 따른 최대출력 제한 운전에서 전력 편차 알고리즘의 유무에 따른 총 전력 편차를 비교한 결과이다.
- 도 22는 본 발명의 실시예에 따른 전력 편차 알고리즘의 적용 유무에 따른 총 전력 편차의 비교를 나타낸 도면이다.
- 도 23은 본 발명의 실시예에 따른 일정 출력 감소 운전을 나타낸 도면이다.
- 도 24 및 도 25는 본 발명의 실시예에 따른 전력 편차 알고리즘의 적용 유무에 따른 결과를 나타낸 도면이다.
- 도 26은 본 발명의 실시예에 따른 풍력 터빈 발전기의 고장으로 인한 운전 정지 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템(풍력발전단지)의 운전 결과를 나타낸 도면이다.
- 도 27은 본 발명의 실시예에 따른 계통접속규정의 변화 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 운전 결과를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0033] 명세서 전체에서, 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있는 것을 의미한다.
- [0034] 기존의 풍력 발전기 시스템의 set-point 최적화 기법에 대한 선행 연구에서는 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 고려하지 않으며, 시스템 구성 또는 계통접속기준의 시나리오별 테스트도 고려하지 않았다.
- [0035] 본 발명은 운영 시간동안 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하기 위한 풍력 발전기 시스템의 발전기 운영 전략을 제안한다. 이러한 발전기 운영 전략을 사용하면, 풍력 터빈 발전기의 설정점 변경이 최소화되고, 풍력 터빈 발전기의 출력 전력이 더 부드러워지고 불필요한 변동이 방지된다. 설정점은 풍력 터빈 발전기에서 요구되는 최적의 출력 전력을 나타낸다.
- [0036] 풍력 발전기 시스템의 작동을 위해서는 몇 가지 그리드 코드 제약도 고려된다. 이는 풍력 발전기 시스템이 전송 시스템 운영자의 요구 사항에 따라 작동하도록 보장한다.
- [0037] 또한, 풍력 발전기 시스템은 모든 이벤트를 모니터링하기 위한 추가 전략도 제안한다. 따라서, 본 발명의 발전기 운영 전략은 풍력 발전기 시스템에서 이벤트를 처리할 수도 있다.
- [0038] 본 발명은 계통접속기준을 만족하기 위한 풍력 발전기 시스템의 발전기들의 전력 편차 최소화를 기반으로 하는 최적 설정점(set-point) 결정 방법을 제안한다.

- [0039] 본 발명은 계통 운영자의 요구에 따른 출력 변동 시 풍력 발전기의 불필요한 전력 변동을 저감시켜 풍력 발전기 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 최적 설정점(set-point) 결정 방법을 제안한다.
- [0040] 전력 시스템의 안정성을 보장하기 위해서는 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator, TSO)는 풍력 발전기 시스템의 운영에 대한 다양한 요구 사항, 즉 그리드 코드 제약을 부과한다. 여기서, 그리드 코드는 계통망 규약으로 시장 규정의 효율적인 운영을 위해 송전사업자와 배전사업자를 규제하기 위해 준비되는 규정이다.
- [0041] TSO에서 그리드 코드 제약을 충족하기 위해서 풍력 발전기 시스템의 운영을 위한 에너지 관리 시스템(Energy Management System, EMS)이 필요하다.
- [0042] EMS는 전력회사의 운전원이 사용하는 컴퓨터 제어 시스템으로 전력 시스템의 다양한 요소의 상태를 실시간으로 감시하고 발전 및 송전설비를 제어하는 시스템이며, 발전소의 원방감시제어, 발전제어, 경제급전 제어기능 등과 345kV 변전소의 원방감시 제어 기능을 갖추고 있다.
- [0043] EMS의 목적은 각 풍력 터빈 발전기에 대한 최적의 설정점(set point)을 제공하고, 모든 그리드 코드 제약을 충족하는 것이다.
- [0044] 각 풍력 터빈 발전기에는 블레이드 피치 각도를 조정하기 위한 로컬 컨트롤러가 있다. 이를 통해서 풍력 터빈 발전기는 EMS의 설정점을 충족하도록 출력 전력을 제어할 수 있다. 풍력 발전기 시스템의 출력 전력은 모든 풍력 터빈 발전기의 출력 전력의 합이며 TSO에서 필요한 전력과 균형을 이루어야 한다.
- [0045] 풍력 발전기 시스템은 풍력 터빈 발전기의 서비스 중단, 그리드 코드 제약 등 다양한 이벤트가 발생할 수 있다.
- [0046] 따라서, 풍력 발전기 시스템의 운영을 위해서는 다양한 이벤트에 대한 고려가 필요하다.
- [0047] 이벤트 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 운영 방법은 풍력 발전기 시스템 내 풍력 터빈 발전기의 고장 및 계통 운영자(TSO)의 출력 요구 변동 등 예외적인 상황에서의 운영을 위한 알고리즘을 의미한다.
- [0048] 풍력 발전기 시스템에서 다양한 이벤트가 발생하는 경우, 이벤트 정보를 EMS로 전송된다.
- [0049] EMS는 이벤트 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 전력 편차 알고리즘을 수행한다.
- [0050] EMS는 수신한 이벤트 정보를 분류하여 각각의 풍력 터빈 발전기의 운전 여부 및 설정점(set-point)을 결정한다.
- [0051] EMS는 풍력 발전기 시스템 내에 이벤트 상황이 발생하더라도 이벤트 종류에 따른 설정점(set point)을 결정하여 최적의 전력 운영을 달성한다.
- [0053] 도 2는 본 발명의 실시예에 따른 그리드 코드 제약을 나타낸 도면이고, 도 3은 본 발명의 실시예에 따른 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템의 구성을 나타낸 도면이고, 도 4는 본 발명의 실시예에 따른 EMS의 내부 구성을 간략하게 나타낸 블록도이고, 도 5는 본 발명의 실시예에 따른 전력 램프 비율의 제한을 나타낸 도면이다.
- [0054] 도 2의 (a)는 제한 전력 모드, 도 2의 (b)는 예비 전력 모드, 도 2의 (c)는 전력 램프 비율(Power Ramp Rate)의 제한이다.
- [0055] 본 발명의 실시예에 따른 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 최소화하는 풍력 발전기 시스템(Wind Farm System)(100)은 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator, TSO)(110), 복수의 풍력 터빈 발전기(Wind Turbine Generator, WTG)(120)로 이루어진 클러스터 및 에너지 관리 시스템(Energy Management System, EMS)(130)을 포함한다.
- [0056] EMS(130)는 전력 수신부(131), 이벤트 처리부(132), 최대 출력 제한 운전부(133), 일정 출력 감소 운전부(134) 및 제어부(135)를 포함한다.
- [0057] 전력 수신부(131)는 전송 시스템 운영자(Transmission System Operator)(110)로부터 계통접속규정과 시스템(100)에서 요구하는 필요 전력량을 포함한 전력 정보를 수신하고, 각각의 풍력 터빈 발전기(120)에서 계산된 총 출력 전력을 수신한다.
- [0058] 이벤트 처리부(132)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)에서 발생하는 이벤트 상황을 수신하여 이벤트 종류를 판단한다.

[0059] 최대 출력 제한 운전부(133)는 총 출력 전력과 필요 전력량보다 작으면, 각각의 풍력 터빈 발전기(120)를 MPPT(Maximum Power Point Tracking) 운전을 수행하고, 총 출력 전력이 필요 전력량보다 크면, 각각의 풍력 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 전력 편차 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한한다.

[0060] 일정 출력 감소 운전부(134)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 전력 편차 알고리즘을 적용하면, 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 출력을 일정 출력 비율로 감소 운전하여 계통접속 규정을 만족한다.

[0061] 제어부(135)는 풍력 터빈 발전기들(120)의 전력 편차를 최소화하는 최적 설정점의 결정을 위한 수리적 모델링을 혼합정수계획법(Mixed Integer Linear Programming, MILP)을 기반으로 하기의 수학식 1과 같은 목적 함수를 모델링한다.

[0062] 수학식 1은 풍력 발전기 시스템(100)에서 요구하는 필요 전력량과 풍력 터빈 발전기(120)의 총 출력 전력 간의 전력 불일치를 최소화하고, 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 전력 편차를 최소화한다.

수학식 1

[0063]
$$Min \left\{ \sum_{t=1}^T p_{\Delta,t} \cdot \Delta P_t + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N p_{n,t} \cdot |P_{n,t} - P_{n,t-1}| \right\}$$

[0064] 여기서, $p_{\Delta,t}$ 는 t 구간에서 전력 불균형에 대한 패널티(₩/MW), ΔP_t 는 t 구간에서 불균형 전력량(MW), $p_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 전력 편차에 대한 패널티(₩/MW), $P_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 설정점(set-point)(MW), $P_{n,t-1}$ 는 t-1 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 설정점(set-point)(MW)을 나타낸다.

[0065] 제어부(135)는 풍력 발전기 시스템(100)의 전력 손실량과 각 풍력 터빈 발전기(120)의 상태를 고려하여 풍력 발전기 시스템(100)의 총 출력 전력과 TSO(110)에서 필요한 필요 전력량 간의 전력 불일치량을 하기의 수학식 2에 의해 계산된다.

수학식 2

[0066]
$$\Delta P_t = \max \left\{ 0, D'_t + P_{wf,t}^{loss} - \sum_{n=1}^N P_{n,t} \cdot s_{n,t} \right\} \quad \forall t \in T$$

[0067] 여기서, D'_t 는 t 구간에서 고전압 직류 송전(High Voltage Direct Current, HVDC) 손실을 고려하여 요구되는 전력량(MW), $P_{wf,t}^{loss}$ 는 t 구간에서 풍력 발전기 시스템의 전력 손실(MW), $s_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 상태를 나타낸다.

[0068] 제어부(135)는 t 구간에서 풍력 발전기 시스템(100)의 전력 손실(MW)을 하기의 수학식 3 및 수학식 4에 의해 계산된다.

수학식 3

$$P_{wf,t}^{loss} = \sum_{\substack{n,m=1 \\ m \neq n}}^N P_{m-n,t}^{loss} \quad \forall t \in T$$

[0069]

[0070] t는 시간 인터벌, n,m은 풍력 터빈 발전기의 식별자, T는 시간 인터벌의 세트, N은 풍력 터빈 발전기의 세트를 나타낸다.

수학식 4

$$P_{m-n,t}^{loss} = P_{m-n,t} \cdot L_{m-n}^{loss} \quad \forall m, n \in N, t \in T$$

[0071]

[0072] 여기서, $P_{m-n,t}^{loss}$ 는 t 구간에서 풍력 발전기 시스템의 m node에서 n mode로 전송되는 전력 손실(MW),

$P_{m-n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 발전기 시스템의 m node에서 n mode로 전송되는 전력량(MW), L_{m-n}^{loss} 는 풍력 발전기 시스템의 m node에서 n mode로 전송되는 전력 손실(%)이다.

[0073] 제어부(135)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 상태($s_{n,t}$)를 하기의 수학식 5에 의해 결정된다.

수학식 5

$$s_{n,t} = \begin{cases} 1 & \text{if } WTGn \text{ is } \in \text{service} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0074]

[0075] 전술한 수학식 1의 목적 함수는 비선형 상태이기 때문에 최적화를 위하여 하기의 수학식 6과 같이 선형 함수로 변환한다.

수학식 6

$$Min \left\{ \sum_{t=1}^T p_{\Delta,t} \cdot \Delta P_t + \sum_{t=1}^T \sum_{n=1}^N p_{n,t} \cdot PD_{n,t} \right\}$$

[0076]

[0077] 여기서, $PD_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 선형화를 위한 전력 편차 변수이다.

[0078] 이때 선형화 과정을 통하여 전력 편차 변수를 사용하면, 하기의 수학식 7과 수학식 8과 같이, 두 가지 제약 조건이 더 생긴다. 두 가지 제약은 절대값을 포함하는 방정식을 선형화한 것이다.

[0079] 전력 편차 변수의 제약 조건은 다음의 수학식 7과 수학식 8과 같다.

수학식 7

[0080]
$$PD_{n,t} \geq P_{n,t} - P_{n,t-1} \quad \forall n \in N, t \in T$$

수학식 8

[0081]
$$PD_{n,t} \geq -(P_{n,t} - P_{n,t-1}) \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0082] 제어부(135)는 각 풍력 터빈 발전기(120)의 운전 범위가 다음의 수학식 9와 같다.

수학식 9

[0083]
$$s_{n,t} \cdot P_n^{\min} \leq P_{n,t} \leq s_{n,t} \cdot \min\{P_n^{rate}, P_{n,t}^{avail}\} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0084] 여기서, P_n^{\min} 는 풍력 터빈 발전기 n의 최소 운전점(MW), $s_{n,t}$ 는 풍력 터빈 발전기 n의 정격 발전량(MW), $P_{n,t}^{avail}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 가용 발전량(MW)을 나타낸다.

[0085] 각 시간 간격에서 각 풍력 터빈 발전기(120)의 최대 출력 전력은 풍력 터빈 발전기(120), 풍속, 풍향 등의 매개 변수에 따라 달라진다.

[0086] 풍속과 풍향은 풍력 발전기 시스템(100)의 풍력 터빈 발전기(120)의 레이아웃에 크게 의존한다. 풍력 터빈 발전기(120)의 위치 배열은 후류 손실(Wake Loss)에 영향을 미쳐 에너지 생산을 감소시킨다.

[0087] 따라서, 각 풍력 터빈 발전기(120)에 장착된 측정 장비를 이용하여 풍력 터빈 발전기(120)의 위치를 최적으로 결정하고, 풍속과 풍향을 결정한다고 가정한다.

[0088] 각각의 풍력 터빈 발전기(120)는 출력 전력을 다음의 수학식 10에 의해 계산된다.

수학식 10

[0089]
$$P_{n,t}^{avail} = \frac{1}{2} \cdot C_{p_{opt}}(\beta_n, \gamma_n) \rho \pi R^2 v_{n,t}^3 \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0090] 여기서, $C_{p_{opt}}(\beta_n, \gamma_n)$ 는 풍력 터빈 발전기 n의 피치각과 틸속도 비와 관련된 최대 풍력 에너지 사용계수 (Maximum Wind Energy Utilization Coefficient), ρ 는 Air Density(kg/m³), R 는 회전자 반지름(m), $v_{n,t}$ 는 t 구간에서 풍력 터빈 발전기 n의 풍속(m/s)을 나타낸다.

[0091] 제어부(135)는 풍력 발전기 시스템(100)의 전력 균형을 다음의 수학식 11에 의해 계산된다.

수학식 11

$$\sum_{n=1}^N (P_{n,t} \cdot s_{n,t}) = \begin{cases} D'_t + P_{wf,t}^{loss} & \text{if } \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) \geq D'_t + P_{wf,t}^{loss} \\ D'_t & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall t \in T$$

[0092]

D'_t 는 t 구간에서 HVDC 지점 이전에서 요구되는 전력량을 나타낸다.

[0093]

각 시간별 계통 운영자(TSO)(110)는 필요 전력량을 다음의 수학식 12와 수학식 13에 의해 계산된다.

[0094]

최대 출력 제한 운전부(133)는 풍력 발전기 시스템(100)의 총 출력 전력이 시스템에서 요구하는 필요 전력량보다 작을 경우, 각각의 풍력 터빈 발전기(120)를 최대 출력 운전(Maximum Power Point Tracking, MPPT)을 수행하며, 총 출력 전력이 필요 전력량보다 크면, 각각의 풍력 발전기의 출력은 구간별로 전력 편차를 최소화하는 전력 편차 알고리즘을 적용하여 최대 출력 제한 지점에서 운전하도록 제한한다.

[0095]

수학식 12

$$D'_t = \begin{cases} \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) & \text{if } \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) < \frac{P_t^{lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc})} \\ \frac{P_t^{lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc})} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall t \in T$$

[0096]

여기서, P_t^{lim} 는 t 구간에서 제한 출력(MW), L^{hvdc} 는 HVDC 선로 손실(%), η 는 HVDC 컨버터 효율(%)을 나타낸다.

[0097]

수학식 13

$$D_t^{pcc} = D'_t \cdot \eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc}) \quad \forall t \in T$$

[0098]

여기서, D_t^{pcc} 는 t 구간에서 계통접속점(PCC)에서 요구되는 전력량(MW)을 나타낸다.

[0099]

풍력 발전기 시스템(100)의 작동에서 풍력 터빈 발전기(120)의 출력 전력에 대한 전력 램프 속도 제한에 대한 제약도 매우 중요하다. 램프업(Ramp Up)과 램프다운(Ramp Down)에 대한 제약 조건이 수학식 14 내지 수학식 16에 나타나 있다.

[0100]

계통접속규정에서 풍력 터빈 발전기(120)의 출력 변동은 일정한 비율로 제한된다.

[0101]

따라서, 이러한 계통접속규정을 만족하기 위하여 출력 증가율 및 감소율에 대한 제약은 하기의 수학식 14 내지 수학식 16과 같다.

[0102]

제어부(135)는 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 증감율을 다음의 수학식 14와 같으며, 다음 운영 구간의 출력 전력이 최대 출력 전력과 동일한 값을 가지면, 현재 운영 구간의 설정점(set-point) 값보다 작은 값을 가지기 때문에 다음의 수학식 15와 같이 다음 운영 구간의 출력 전력이 최대 출력 전력보다 작아야 한다.

[0103]

따라서, 제어부(135)는 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 증감율을 하기의 수학식 14와 수학식 15를 이용하여 수

[0104]

학식 16과 같이 도출할 수 있다.

수학식 14

[0105]
$$P_{n,t} - P_n^{RD} \leq P_{n,t+1} \leq P_{n,t} + P_n^{RU} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0106] 여기서, P_n^{RD} 는 풍력 터빈 발전기 n의 최대 ramp-down(MW), P_n^{RU} 는 풍력 터빈 발전기 n의 최대 ramp-up(MW)을 나타낸다.

수학식 15

[0107]
$$P_n^{\min} \leq P_{n,t+1} \leq P_{n,t+1}^{avail} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0108] 여기서, $P_{n,t+1}$ 는 t+1 구간에 풍력 터빈 발전기 n의 설정점(set-point)(MW), $P_{n,t+1}^{avail}$ 는 t+1 구간에 풍력 터빈 발전기 n의 가용 발전량(MW)을 나타낸다.

수학식 16

[0109]
$$\begin{aligned} \max\{P_{n,t} - P_n^{RD}, P_n^{\min}\} &\leq P_{n,t+1} \\ &\leq \min\{P_{n,t} + P_n^{RU}, P_n^{rate}, P_{n,t+1}^{avail}\} \quad \forall n \in N, t \in T \end{aligned}$$

[0110] 도 5의 (a)는 전력 램프 비율의 제한을 나타낸 것으로 최대 램프업, 램프 다운을 위한 최대 전력으로 제한되는 두 개의 연속 간격으로 각 풍력 터빈 발전기(120)의 설정점을 설명한다. 이러한 제약 조건은 전술한 수학식 14로 표현할 수 있다.

[0111] 시간 간격 t+1에서 풍력 터빈 발전기(120)의 최대 출력 전력이 생성될 경우, 시간 t에서 풍력 터빈 발전기(120)의 설정점보다 작다.

[0112] t+1에서 풍력 터빈 발전기(120)의 설정점은 도 5의 (b)와 수학식 15에 도시되어 있다.

[0113] 풍력 터빈 발전기(120)의 램프 업과 램프 다운의 제약(Constraint)은 두 개의 제약 조건인 수학식 14와 수학식 15 및 풍력 터빈 발전기(120)의 정격 전력을 결합하여 수학식 16으로 표현된다.

[0114] 풍력 발전기 시스템(100)의 운용 시 EMS(130)는 항상 시스템 정보를 시간별로 업데이트하고, 풍력 발전기 시스템(100)에 이벤트가 발생할 때마다 이벤트에 대한 정보(위치, 이벤트 유형)를 파악하여 실시간으로 업데이트한다.

[0115] 이벤트 유형에 따라 모든 활성화된 풍력 터빈 발전기(120)의 설정점은 도 7과 하기의 수학식 17에 표시된 것과 같이 해당 이벤트를 고려하여 다시 재조정된다.

[0116] 전력 불일치 및 전력 손실은 각각 수학식 2, 수학식 3 및 수학식 4에 의해 유사하게 계산된다.

수학식 17

$$Min \left\{ \sum_h^T P_{\Delta,t} \cdot \Delta P_t + \sum_h^T \sum_{n=1}^{N_e} P_n \cdot |P_{n,t} - P_{n,t-1}| \right\}$$

[0117]

[0118] 여기서, h 는 이벤트 시간, N_h 는 구간 t 에서 운전하지 않은 풍력 터빈 발전기의 수, $N_e = N - N_h$ 는 구간 t 에서 운전 중인 풍력 터빈 발전기의 수를 나타낸다.

[0119] 제어부(135)는 이벤트 유형에 따라 필요한 전력을 다음의 수학식 18에 의해 표현된다.

[0120] 제어부(135)는 목적 함수인 수학식 17도 일반 작동 모드와 같이, 수학식 5, 수학식 7 내지 11, 수학식 14 내지 16에 의해 제한된다.

수학식 18

$$D_t' = \begin{cases} \left\{ \text{Max} \left\{ \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}), \frac{P_t^{lim}}{\eta^2 \cdot (1 - L^{hvdc})} \right\} \right. & \text{if limited power mode} \\ \left. (1 - p_t^{reser}) \cdot \sum_{n=1}^N (P_{n,t}^{avail}) \right. & \text{if reserve power mode} \end{cases} \quad \forall t \in T$$

[0121]

[0122] 여기서, p_t^{reser} 는 구간 t 에서 풍력 발전기 시스템의 예비력(%)을 나타낸다.

[0124] 본 발명은 풍력 발전기 시스템(100)에서 전력 편차 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 풍력 터빈 발전기 20기 (4개 클러스터 × 풍력 터빈 발전기 5기) 200MW 급의 풍력 발전기 시스템(100)을 구성하였다.

[0125] 20기의 풍력 터빈 발전기(120)는 클러스터 끝 지점에서 한 곳으로 연결되며, MMC 기반의 고전압 직류(HVDC) 시스템을 이용하여 계통과 연계되어 운전된다.

[0126] 모든 풍력 터빈 발전기(120)는 동일한 유형으로 간주되고, 풍력 발전기 시스템(100)의 세부 매개 변수는 다음과 같다.

[0127] 풍력 터빈 발전기(120)의 정격 전력은 10MW이고, 작동을 위한 최소 전력은 정격 전력의 10%이다.

[0128] 두 연속 간격의 램프 업 및 램프 다운을 위한 최대 전력은 정격 전력의 20%이다. HVDC 시스템에서 각 컨버터의 전력 손실은 3%이고, 라인 손실은 1%이다.

[0129] 인접한 두 개의 풍력 터빈 발전기 사이의 연결선 손실은 1%이다.

[0130] 각 그리드 코드 제약에 대한 세부 정보는 다음과 같다.

[0131] 제한 전력 모드에서 제한 전력은 PCC 지점에서 75MW로 설정된다. HVDC 시스템의 전력 손실로 인해 수집된 지점의 제한된 전력은 80.5MW이다.

[0132] 예비 전력 모드에서 풍력 발전기 시스템(100)의 예비 용량은 5%이다.

[0133] 다음 10개 시간 간격 동안 각 풍력 터빈 발전기의 최대 출력 전력은 표 1과 같이 수학식 10을 이용하여 계산한다.

표 1

t	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7	WTG8	WTG9	WTG10	WTG11	WTG12	WTG13	WTG14	WTG15	WTG16	WTG17	WTG18	WTG19	WTG20
t1	4	3.5	3.5	4	4	3.5	4	4	3.5	3.5	3.5	4	4	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3	3
t2	5.5	5.3	5.3	5.5	5	5.5	5.5	5.5	5	5.5	5.5	5	5.5	5.5	5.3	5.5	5.5	5	5	5
t3	4.7	4.7	4.5	6	4.6	4.7	6	4.7	4.7	4.5	6	4.6	4.6	6	6.7	4.7	4.7	4.6	6	4.5
t4	3.4	2.7	2.6	4	3.5	4	4	4	4	2.7	4	4	4	4	4.7	4	4	3.5	4	3
t5	2.7	4	3.3	3.3	2.7	6	2.7	4.7	3.3	4	4.7	4.7	3.3	4.7	4.7	3.3	4.7	3.5	3.5	4.7
t6	4.7	4.7	5.3	4.7	4.7	6	4.7	5.3	4	4.7	4.7	5.3	4.7	5.3	5.3	5.3	6	5.3	4.7	4
t7	3.3	4	4	4	4	4.7	3.3	4.7	5.3	3.3	4	4	3.3	4	4	4	4	3.3	4	3.3
t8	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	5.3	4	4	4	6	4	5.3	5.3	5.3	5.2
t9	6.7	4.7	6	4.7	6	5.3	4.7	4.7	5.3	4.7	4.7	4	4.7	4.7	6.7	4.7	4.7	6.7	4.7	7
t10	6.7	4	6	4	8	4	4	4	4	6.7	4	4	4	4	6.7	6.7	4	4.7	4	8

[0134]

[0135] EMS는 TSO(110)로부터 필요한 요구 전력을 충족하기 위해 [Pmin, Pmax] 내에서 풍력 터빈 발전기의 최적 설정점을 결정한다.

[0136] 풍력 발전기 시스템(100)의 최대 출력 전력과 필요한 전력은 각각 제한된 전력 및 예비 전력 모드에 대한 도 6의 (a), (b)에 나와 있다.

[0137] EMS는 최적화를 수행하여 5분마다 풍력 터빈 발전기의 설정점을 결정한다.

[0138] 시간 윈도우(Time Window)에는 10개의 간격이 포함되고, 각 간격은 30초로 설정된다. MILP 기반 수학적 모델은 Visual Studio C++로 코딩되고, MILP 솔버(Solver) CPLEX 12.6을 사용하여 해결된다.

[0140] 본 발명의 풍력 터빈 발전기들(120)의 전력 편차를 최소화하는 전력 편차 알고리즘을 사용하거나 전력 편차 알고리즘을 사용하지 않은 시뮬레이션 결과를 서로 다른 운영 모드에서 비교한다.

[0141] 본 발명의 운영 알고리즘을 적용하지 않는 경우, 풍력 터빈 발전기(120)의 설정점은 도 8, 수학적 식 19 및 수학적 식 20에 표시된 것처럼 전력을 균등하게 나누어 결정된다. 도 8은 본 발명의 풍력 터빈 발전기들(120)의 전력 편차를 최소화하는 운영 알고리즘을 적용하지 않고, 설정점을 결정하는 것으로, 제한 전력 모드(a)와, 예비 전력 모드(b)를 예시하고 있다.

수학적 식 19

$$P_{n,t} = \begin{cases} P_{n,t}^{avail} & \text{if } \sum_{n=1}^N P_{n,t}^{avail} \leq \frac{P_t^{limit}}{\eta^2 \cdot (1-L^{hvd})} \\ P_{n,t}^{avail} - \frac{DP_t}{N_{WTGs}} & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0142]

수학적 식 20

$$P_{n,t} = P_{n,t}^{avail} - P_{n,t}^{preser} \quad \forall n \in N, t \in T$$

[0143]

[0144] P_t^{limit} 는 t 구간에서 계통접속점(PCC)에서 풍력 발전기 시스템의 제한 출력 전력을 나타낸다.

- [0145] 제한 전력 작동 모드에서 최대 출력 전력이 제한 전력보다 작으면 모든 풍력 터빈 발전기가 MPPT 모드로 설정된다. 최대 출력 전력이 제한 전력보다 크면 풍력 발전기 시스템(100)에 필요한 전력이 제한 전력으로 설정된다.
- [0146] 미사용 전력 (DP_t)의 양은 수학적 식 19에 표시된 것처럼 총 활성화된 풍력 터빈 발전기의 수에 대해 균등하게 나눈다.
- [0147] 예비 전력 작동 모드에서, 각 풍력 터빈 발전기(120)는 단순히 풍력 발전기 시스템(100)에 대해 TSO(110)에서 필요한 예비 용량의 양, 즉 $R_t(\%)$ 와 동일한 예비 용량을 설정한다.
- [0148] 따라서, 풍력 발전기 시스템(100)의 총 예비 용량은 수학적 식 20과 같이, $R_t(\%)$ 와 같다. 다음에는 본 발명의 풍력 터빈 발전기들(120)의 전력 편차를 최소화하는 운영 알고리즘의 효과를 보여주기 위해서 전력 편차 알고리즘을 적용하는 방법과 전력 편차 알고리즘을 적용하지 않는 방법 간의 비교와 함께 자세한 결과를 제시한다.
- [0150] (1) 제한 전력 모드에서 풍력 발전기 시스템 작동
- [0151] 제한 전력 작동 모드에서 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 도 9에 나와 있다. 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 제한된 전력에 의존한다는 것을 알 수 있다. 풍력 발전기 시스템(100)의 총 출력 전력이 제한된 전력보다 작으면 모든 풍력 발전기 시스템(100)이 최대 전력 포인트로 설정된다.
- [0152] 풍력 발전기 시스템(100)의 손실로 인해 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 모든 풍력 발전기 시스템(100)의 총 출력 전력에 비해 약간 감소한다.
- [0153] 풍력 발전기 시스템(100)의 총 출력 전력이 제한된 전력보다 큰 경우, 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 풍력 발전기 시스템(100)의 제한된 전력과 전력 손실의 합으로 설정된다. 풍력 발전기 시스템(100)의 총 전력 편차는 본 발명의 운영 알고리즘이 적용되는 경우와 적용되지 않는 경우의 두 가지 경우에 대해 도 10에 나와 있다.
- [0154] 본 발명의 전력 편차 알고리즘을 사용하면 전력 편차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다. 운전 시간 동안 풍력 발전기 시스템(100)의 총 전력 편차는 123MW(본 발명의 전력 편차 알고리즘 적용되지 않음)에서 58MW(본 발명의 전력 편차 알고리즘 적용함)로 줄일 수 있다. 본 발명의 효과를 보여주기 위해서 일부 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 각각 WTG 2, WTG 12 및 WTG 13에 대한 도 11의 (a) 내지 (c)에 나와 있다.
- [0155] 본 발명의 운영 알고리즘을 사용하면 전력 편차 알고리즘을 사용하지 않을 때 보다 풍력 터빈 발전기(120)의 출력이 훨씬 부드럽다는 것을 쉽게 알 수 있다.
- [0156] 본 발명의 운영 알고리즘을 적용한 경우, 제한 전력 모드에서 모든 풍력 터빈 발전기(120)에서의 설정점을 다음의 표 2와 같다.

표 2

t	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7	WTG8	WTG9	WTG10	WTG11	WTG12	WTG13	WTG14	WTG15	WTG16	WTG17	WTG18	WTG19	WTG20
t1	4	3.5	3.5	4	4	3.5	4	4	3.5	3.5	3.5	4	4	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3	3
t2	4	3.5	3.5	4	4.6	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	5.3	4.5	4	3.5	4.6	4.5
t3	4	3.5	3.5	4	4.6	4	4	4	4	4.5	4	4	4	4	5.3	4.5	4	3.5	4.6	4.5
t4	3.4	2.7	2.6	4	3.5	4	4	4	4	2.7	4	4	4	4	4.7	4	4	3.5	4	3
t5	2.7	4	3.3	3.3	2.7	6	2.7	4.7	3.3	4	4.7	4.7	3.3	4.7	4.7	3.3	4.7	3.5	3.5	4.7
t6	2.7	4	4	4	4	6	3.3	4.7	4	4	4.7	4.7	3.3	4.7	4.7	3.4	4.7	3.5	4	4
t7	3.3	4	4	4	4	4.7	3.3	4.7	5.3	3.3	4	4	3.3	4	4	4	4	3.3	4	3.3
t8	3.3	4	4	4	5.3	4	3.3	4	4.2	4.7	4	4	3.3	4	6	4	4	3.3	4	5.2
t9	3.3	4	4	4	5.3	4	3.3	4	4	4.7	4	4	3.3	4	6	4	4	3.3	4	5.4
t10	3.3	4	4	4	5.3	4	3.3	4	4	4.7	4	4	3.3	4	6	4	4	3.3	4	5.4

- [0157]
- [0158] 본 발명의 운영 알고리즘을 적용하지 않은 경우, 제한 전력 모드에서 모든 풍력 터빈 발전기(120)에서의 설정점을 다음의 표 3과 같다.

표 3

t	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7	WTG8	WTG9	WTG10	WTG11	WTG12	WTG13	WTG14	WTG15	WTG16	WTG17	WTG18	WTG19	WTG20
t1	4	3.5	3.5	4	4	3.5	4	4	3.5	3.5	3.5	4	4	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3	3
t2	4.2	4	4	4.2	3.7	4.2	4.2	4.2	3.7	4.2	4.2	3.7	4.2	4.2	5.1	4.2	4.2	3.7	3.7	5
t3	3.6	3.6	3.4	4.9	3.5	3.6	4.9	3.6	3.6	3.8	4.9	3.5	3.5	4.9	6.7	3.6	3.6	3.5	4.9	4.5
t4	3.4	2.7	2.6	4	3.5	4	4	4	4	2.7	4	4	4	4	4.7	4	4	3.5	4	3
t5	2.7	4	3.3	3.3	2.7	6	2.7	4.7	3.3	4	4.7	4.7	3.3	4.7	4.7	3.3	4.7	3.5	3.5	4.7
t6	3.7	3.7	4.3	3.7	3.7	5	3.7	4.3	3.3	3.9	3.7	4.3	3.7	4.3	5.3	4.3	5	4.3	3.7	4
t7	3.3	4	4	4	4	4.7	3.3	4.7	5.3	3.3	4	4	3.3	4	4	4	4	3.3	4	3.3
t8	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.6	4.2	2.9	2.9	2.9	6	2.9	4.2	4.2	4.2	5.2
t9	5.4	3.4	4.7	3.4	4.9	4	3.4	3.4	4	4.1	3.4	2.7	3.4	3.4	5.6	3.6	3.4	5.4	3.4	7
t10	5.6	2.9	4.9	2.9	6.9	2.9	2.9	2.9	2.9	6.1	2.9	2.9	2.9	2.9	6.7	5.6	2.9	3.6	2.9	8

[0159]

[0160] 이로써 본 발명의 제안된 방법을 사용하는 모든 풍력 터빈 발전기(120)는 연속된 두 구간에서 전력 편차를 크게 줄일 수 있음을 알 수 있다.

[0162] (2) 예비 전원 모드에서 풍력 발전기 시스템 작동

[0163] 예비 전력 작동 모드에서 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 도 12에 나와 있다. 각 시간 간격에서 예비 용량은 항상 5%로 유지된다.

[0164] 본 발명의 운영 알고리즘이 없으면, 각 풍력 터빈 발전기가 최대 출력 전력의 5%를 예약하도록 설정되어 모든 풍력 터빈 발전기가 각 시간 간격에서 설정점을 변경할 수 있다.

[0165] 본 발명의 운영 알고리즘을 사용하면 연속된 두 간격 동안 풍력 터빈 발전기의 전력 편차가 최소화되고, 풍력 발전기 시스템(100)의 예비 전력은 여전히 최대 출력 전력의 5%로 유지된다.

[0166] 본 발명의 운영 알고리즘을 사용하거나 사용하지 않은 풍력 발전기 시스템(100)의 전력 편차량을 비교한다.

[0167] 전체 전력 편차량은 작동 시간 동안 도 13과 같이 크게 감소한다. 예비 전력을 5%로 사용한 사례 연구에서는 총 전력 편차가 181MW(본 발명의 운영 알고리즘이 적용되지 않음)에서 148MW(본 발명의 운영 알고리즘을 적용함)로 감소했다.

[0168] 전력 편차의 총량은 풍력 발전기 시스템(100)의 전력 예비 용량 요구 사항에 따라 다르다. 파워 리저브 용량에 대한 요구 사항이 증가하면, 본 발명의 운영 알고리즘을 사용하는 것이 풍력 발전기 시스템(100)의 파워 편차를 줄이는데 더 유리하다.

[0169] 본 발명의 전력 편차 알고리즘을 적용하거나 적용하지 않는 일부 WTG(7, 10, 14)의 출력 전력은 도 14의 (a) 내지 (c)에 나와 있다. 전력 편차 알고리즘을 사용하면 풍력 터빈 발전기의 전력 편차를 크게 줄일 수 있다는 결론을 내릴 수 있다. 모든 풍력 터빈 발전기의 설정점은 적용 알고리즘을 적용한 경우와 적용하지 않은 경우를 각각 표 4와 표 5에 나와 있다.

표 4

t	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7	WTG8	WTG9	WTG10	WTG11	WTG12	WTG13	WTG14	WTG15	WTG16	WTG17	WTG18	WTG19	WTG20
t1	4	3.5	3.5	3.9	4	3.5	3.5	3.2	2.7	2.5	3.5	4	4	3.5	3.5	4.5	3.5	3.5	3	2.5
t2	4.7	5.3	4.1	5.5	5	4.9	5.5	5	4.7	4.5	5.5	5	5.5	5.5	5.3	5.5	5.1	5	5	4.5
t3	4.7	4.7	4.1	5.5	4.4	4.7	5.5	4.7	4.7	4.5	5.5	4.6	4.6	5.5	5.3	4.7	4.7	4.6	5	4.5
t4	3.1	2.7	2.6	4	2.7	4	4	4	3.3	2.7	4	4	3.3	4	4.7	3.3	4	3.5	3.5	3
t5	2.7	4	3.3	3.3	2.7	4	2.7	4	3.3	4	4.4	4.5	3.3	4.7	4.7	3.3	4.7	3.5	3.5	4
t6	4.5	4.2	5.3	4.7	4.6	6	3.3	5.3	4	4.7	4.7	4.5	4.7	4.7	5.3	5.3	4.7	5.3	4.7	4
t7	3.3	4	4	4	4	4.7	3.3	4.7	3.5	3.3	4	4	3.3	4	4	4	3.3	3.3	2.7	3.2
t8	5.3	5	5.3	5.3	5.3	5.3	4.7	4.7	4.2	4.7	4	4	4	4	6	4	5.3	5.3	4.7	5.2
t9	6.7	4.7	6	4.7	6	5.3	4.7	4.7	4.2	4.7	4	4	4	4	6	4.7	4.7	5.3	4.7	7
t10	6.7	4	6	4	6.9	4	4	4	4	4.7	4	4	4	4	6.7	4.7	4	4.7	4	8

[0170]

표 5

t	WTG1	WTG2	WTG3	WTG4	WTG5	WTG6	WTG7	WTG8	WTG9	WTG10	WTG11	WTG12	WTG13	WTG14	WTG15	WTG16	WTG17	WTG18	WTG19	WTG20
t1	3.8	3.3	3.3	3.8	3.8	3.3	3.8	3.8	3.3	3.3	3.3	3.8	3.8	3.3	3.3	4.3	3.3	3.3	2.9	2.9
t2	5.2	5	5	5.2	4.8	5.2	5.2	5.2	4.8	5.2	5.2	4.8	5.2	5.2	5	5.2	5.2	4.8	4.8	4.8
t3	4.5	4.5	4.3	5.7	4.4	4.5	5.7	4.5	4.5	4.3	5.7	4.4	4.4	5.7	6.4	4.5	4.5	4.4	5.7	4.3
t4	3.2	2.6	2.5	3.8	3.3	3.8	3.8	3.8	3.8	2.6	3.8	3.8	3.8	3.8	4.5	3.8	3.8	3.3	3.8	2.9
t5	2.6	3.8	3.1	3.1	2.6	5.7	2.6	4.5	3.1	3.8	4.5	4.5	3.1	4.5	4.5	3.1	4.5	3.3	3.3	4.5
t6	4.5	4.5	5	4.5	4.5	5.7	4.5	5	3.8	4.5	4.5	5	4.5	5	5	5	5.7	5	4.5	3.8
t7	3.1	3.8	3.8	3.8	3.8	4.5	3.1	4.5	5	3.1	3.8	3.8	3.1	3.8	3.8	3.8	3.8	3.1	3.8	3.1
t8	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3.8	3.8	3.8	5.7	3.8	5	5	5	4.9
t9	6.4	4.5	5.7	4.5	5.7	5	4.5	4.5	5	4.5	4.5	3.8	4.5	4.5	6.4	4.5	4.5	6.4	4.5	6.7
t10	6.4	3.8	5.7	3.8	7.6	3.8	3.8	3.8	3.8	6.4	3.8	3.8	3.8	3.8	6.4	6.4	3.8	4.5	3.8	7.6

[0171]

[0172]

(3) 이벤트를 고려한 풍력 발전기 시스템의 작동

[0173]

풍력 발전기 시스템 운영에서 다양한 이벤트가 발생할 수 있으며, 본 발명에서는 2 개의 인기 이벤트의 효과를 분석했다.

[0174]

첫 번째 이벤트는 일부 풍력 터빈 발전기의 서비스 중단으로 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력이 변경된다.

[0175]

해당 시간 간격의 작동 모드에 따라 EMS는 모든 풍력 터빈 발전기에 대한 새 설정점을 다시 예약하고 알린다.

[0176]

두 번째 이벤트는 풍력 발전기 시스템(100)의 작동 모드 변경이다. 풍력 발전기 시스템(100)에 필요한 전력이 변경되고, EMS는 모든 풍력 터빈 발전기에 대한 새로운 설정점을 다시 예약하고 찾는다.

[0177]

WTG 4 및 WTG 5는 t3에서 서비스가 중단되고, 풍력 발전기 시스템(100)은 제한된 전력 모드에서 작동한다고 가정한다. WTG 4 및 WTG 5의 출력 전력이 0으로 감소한다. 따라서, 풍력 발전기 시스템(100)의 최대 출력 전력이 감소한다.

[0178]

EMS(130)는 WTG 4 및 WTG 5 없이 일정을 변경하고, 풍력 발전기 시스템(100)의 최대 출력 전력이 제한된 전력보다 적을 때마다 풍력 발전기 시스템(100)이 MPPT 모드로 변경된다.

[0179]

이는 모든 풍력 터빈 발전기(WTG)의 설정 값이 최대 전력점으로 설정되었음을 의미한다. EMS(130)는 시간 간격 t3에서 t10까지 모든 풍력 터빈 발전기(120)에 대한 일정을 다시 스케줄링 한다.

[0180]

풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 도 15에 나와 있다. 마찬가지로 풍력 발전기 시스템(100)이 작동 모드를 변경하면, EMS(130)는 이벤트 시간에서 시간 윈도우 끝까지 모든 풍력 터빈 발전기(120)에 대한 일정을 다시

잡는다. t6에서 풍력 발전기 시스템(100)이 제한된 전력 모드에서 예비 전력 모드로 전환한다고 가정한다.

- [0181] 일정 변경 후 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 전력은 도 16에 나와 있다. 마지막으로 본 발명의 운영 알고리즘을 사용하면, 풍력 발전기 시스템(100)이 여러 이벤트를 고려하여 최적으로 작동 할 수 있다.
- [0183] 도 17은 본 발명의 실시예에 따른 일반 상태에서 풍력 발전기 시스템의 운영 알고리즘을 나타낸 순서도이다.
- [0184] EMS(130)는 풍력 터빈 발전기(120)의 전력 편차를 줄이면서 계통접속규정을 만족시키는 최적의 설정점(set-point)를 결정한다.
- [0185] EMS(130)는 TSO(110)로부터 매 시간마다 발전하여야 하는 전력 정보를 전송받는다(S100). 여기서, 전력 정보는 시스템(100)에서 요구하는 필요 전력량, 계통접속규정, 풍향, 풍속, 전력 계통 입력데이터, 각각의 풍력 터빈 발전기와 관련된 입력 데이터 등을 포함한다.
- [0186] 각각의 풍력 터빈 발전기(120)는 풍황 정보(풍속, 풍향)를 기반으로 현재 발전 가능한 출력 전력을 계산하여 TCP/IP, LAN 통신을 이용하여 EMS(130)로 전송한다(S110).
- [0187] EMS(130)는 풍력 터빈 발전기(120)의 운영 범위, 그리드 코드(유효 전력 제어)와 같은 관련 제약 조건을 기초로 CPLEX를 이용한 MILP 기반의 최적화 운영 모델을 수행한다(S120).
- [0188] EMS(130)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 총 출력 전력과 시스템(100)에서 요구하는 필요 전력량 간의 전력 편차를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘을 수행하여 모든 풍력 터빈 발전기(120)의 최적의 설정점(set-point)를 결정한다(S130).
- [0189] 각각의 풍력 터빈 발전기(120)는 TCP/IP, LAN 통신을 이용하여 EMS(130)로부터 전송받은 설정점(set-point)을 기반으로 로컬 영역에서 출력 제어(피치각 제어)를 수행한다.
- [0191] 도 18은 본 발명의 실시예에 따른 이벤트 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 운영 알고리즘을 나타낸 순서도이다.
- [0192] 본 발명은 스케줄에 따른 풍력 발전기 시스템(100)의 운영할 수 있다.
- [0193] 이벤트 처리부(132)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)에서 발생하는 이벤트 상황을 수신하여 이벤트 종류를 판단한다(S200).
- [0194] 이벤트 처리부(132)는 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 이벤트 발생 또는 운영 모드의 이벤트 발생을 판단한다(S210, S220).
- [0195] 이벤트 처리부(132)는 이벤트 발생이 아닌 경우, 스케줄에 따른 풍력 발전기 시스템의 운영 모드를 유지한다(S230).
- [0196] 제어부(135)는 이벤트 종류가 각각의 풍력 터빈 발전기(120)의 이벤트 발생인 경우, 풍력 터빈 발전기(120)의 이벤트 상태를 분석하고, 현재 정상 운영 중인 풍력 발전기 시스템(100)의 시스템 정보를 시간별로 업데이트한다(S240).
- [0197] 제어부(135)는 현재 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 가능한 발전량 업데이트한다(S250).
- [0198] 제어부(135)는 이벤트 종류가 운영 모드 이벤트 발생인 경우, 운영 모드에 따른 TSO(110)에서 요구하는 필요 전력량을 업데이트한다(S260).
- [0199] 제어부(135)는 풍력 발전기 시스템(100)의 재스케줄링하여 풍력 터빈 발전기(120)의 총 출력 전력과 시스템(100)에서 요구하는 필요 전력량 간의 전력 편차를 최소화하기 위한 최적화 알고리즘을 수행하여 모든 풍력 터빈 발전기(120)의 최적의 설정점(set-point)를 결정한다(S270).
- [0201] 도 19는 본 발명의 실시예에 따른 유효전력제어 운전 기준을 나타낸 도면이고, 도 20은 본 발명의 실시예에 따른 최대출력 제한 운전 결과를 나타낸 도면이고, 도 21은 본 발명의 실시예에 따른 최대출력 제한 운전에서 전력 편차 알고리즘의 유무에 따른 총 전력 편차를 비교한 결과이고, 도 22는 본 발명의 실시예에 따른 전력 편차

알고리즘의 적용 유무에 따른 총 전력 편차의 비교를 나타낸 도면이고, 도 23은 본 발명의 실시예에 따른 일정 출력 감소 운전을 나타낸 도면이고, 도 24 및 도 25는 본 발명의 실시예에 따른 전력 편차 알고리즘의 적용 유무에 따른 결과를 나타낸 도면이고, 도 26은 본 발명의 실시예에 따른 풍력 터빈 발전기의 고장으로 인한 운전 정지 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템(풍력발전단지)의 운전 결과를 나타낸 도면이고, 도 27은 본 발명의 실시예에 따른 계통접속규정의 변화 상황을 고려한 풍력 발전기 시스템의 운전 결과를 나타낸 도면이다.

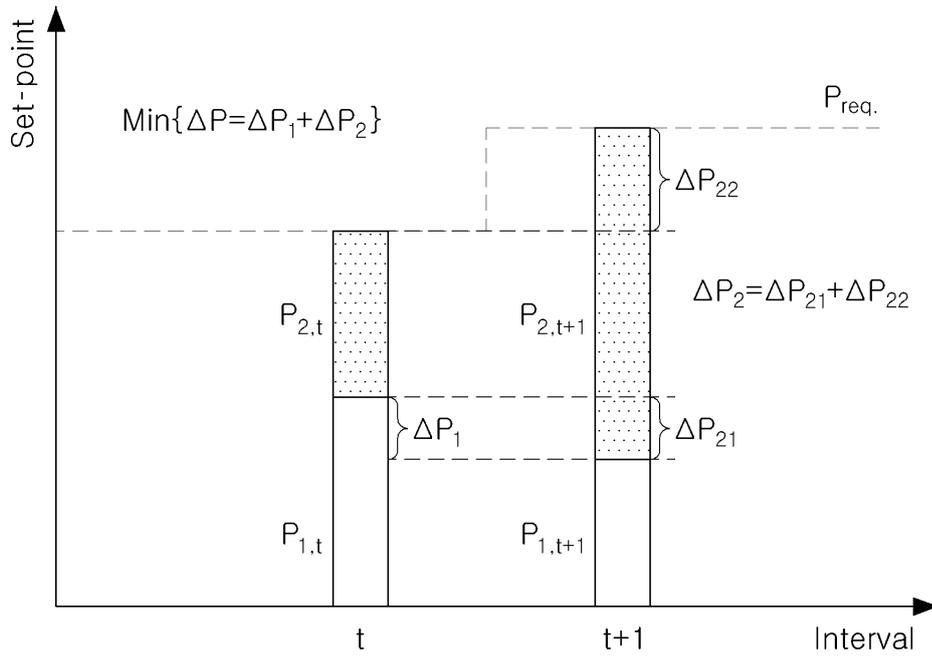
- [0202] EMS(130)는 각각의 풍력 터빈 발전기에서 계산된 총 출력 전력이 최대 출력 제한보다 작은 경우, 모든 풍력 터빈 발전기를 MPPT 운전을 수행하고, 총 출력 전력이 최대 출력 제한보다 큰 경우, 풍력 터빈 발전기를 최대 출력 제한만큼 출력을 가질 수 있도록 제어된다(도 19의 (가)).
- [0203] EMS(130)는 TSO(110)의 요구에 따라 일정량 이상의 예비력을 확보하도록 제어된다(도 19의 (나)).
- [0204] 풍력 발전기 시스템(100)의 발전 가능한 출력 및 최대 출력 제한을 통한 운전 결과는 도 20에 도시된 바와 같다.
- [0205] 도 20은 최대 출력 제한인 80MW에서 풍력 발전기 시스템(100)의 출력이 제한되어 정상적으로 운영되는 것을 확인할 수 있다.
- [0206] 전력 편차 알고리즘의 적용이 없는 경우, 도 21과 같이 풍력 터빈 발전기(120)의 출력이 구간별로 증감하여 전력 편차가 발생한다.
- [0207] 하지만 전력 편차에 대한 전력 편차 알고리즘이 적용될 경우, 도 21과 같이 풍력 터빈 발전기(120)의 구간별 출력 변동이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.
- [0208] 도 22는 최대 출력 제한 운전에서 전력 편차 알고리즘의 적용 유무에 따른 총 전력 편차의 비교한 결과이다.
- [0209] 풍력 발전기 시스템(100)의 발전 가능한 출력 및 일정 출력 감소를 통한 운전 결과를 도 23에 도시되어 있다. 이때, 일정 출력 감소 15%에 해당하는 만큼 풍력 발전기 시스템(100)의 출력이 감소되어 정상적으로 운영되는 것을 확인할 수 있다.
- [0210] 또한, 전력 편차에 대한 전력 편차 알고리즘을 적용하지 않는 경우, 도 24와 같이, 풍력 터빈 발전기(120)의 출력이 구간별로 증감하여 전력 편차가 발생한다.
- [0211] 하지만 일정 출력 감소 운전에서 전력 편차에 대한 전력 편차 알고리즘을 적용될 경우, 도 24와 같이, 풍력 터빈 발전기(120)의 구간별 출력 변동이 크게 줄어드는 것을 확인할 수 있다.
- [0212] 일정 출력 감소 운전에서 전력 편차 알고리즘의 적용 유무에 따른 총 전력 편차의 비교는 도 25와 같다.
- [0213] 도 26과 같이, 풍력 발전기 시스템(100)은 풍력 터빈 발전기(120)의 고장으로 인한 운전 정지와 계통접속규정의 제어 형태를 고려한 테스트를 수행하였다.
- [0214] 풍력 터빈 발전기(120)가 t3에 고장으로 인한 운전 정지 상황이 발생하여 전체 발전 가능한 출력이 감소하는 상황이 발생한다.
- [0215] EMS(130)는 풍력 터빈 발전기(120)의 출력 전력이 0으로 감소하고, 최적화를 재수행하여 계통접속규정을 만족하기 위한 풍력 발전기 시스템(100)의 출력 제어를 정상적으로 수행하는 것을 확인할 수 있다.
- [0216] 계통접속규정을 만족하기 위한 풍력 발전기 시스템(100)의 제어가 t1부터 t3까지 최대출력 제한 운전, t4부터 t10까지는 일정 출력 감소 운전으로 변화하는 상황이 발생한다. 이때, 풍력 발전기 시스템(100)은 t3까지 최대 출력 제한기준 80MW까지만 발전을 수행하지만, t4에 일정 출력 감소 운전으로 변화함에 따라 정격 출력의 15%의 예비 전력을 보유하고, 계통접속규정을 항상 만족하며, 제어하는 것을 확인할 수 있다.
- [0217] 이상에서 본 발명의 실시예는 장치 및/또는 방법을 통해서만 구현이 되는 것은 아니며, 본 발명의 실시예의 구성에 대응하는 기능을 실현하기 위한 프로그램, 그 프로그램이 기록된 기록 매체 등을 통해 구현될 수도 있으며, 이러한 구현은 앞서 설명한 실시예의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야의 전문가라면 쉽게 구현할 수 있는 것이다.
- [0218] 이상에서 본 발명의 실시예에 대하여 상세하게 설명하였지만 본 발명의 권리범위는 이에 한정되는 것은 아니고 다음의 청구범위에서 정의하고 있는 본 발명의 기본 개념을 이용한 당업자의 여러 변형 및 개량 형태 또한 본 발명의 권리범위에 속하는 것이다.

부호의 설명

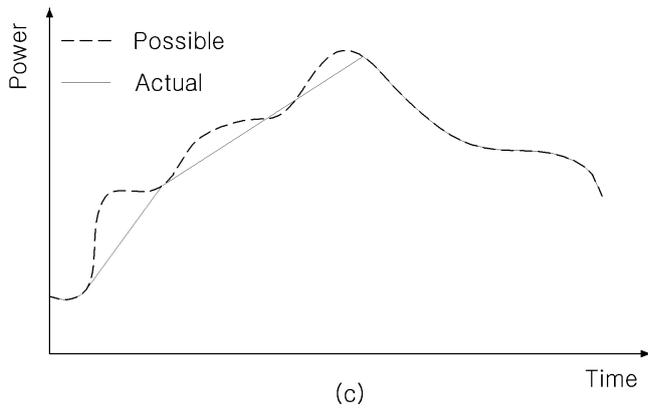
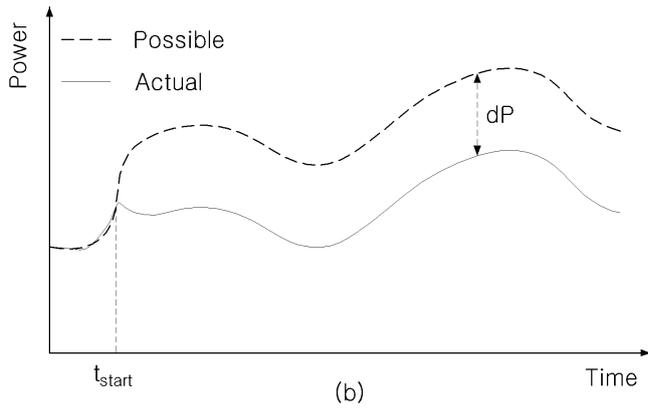
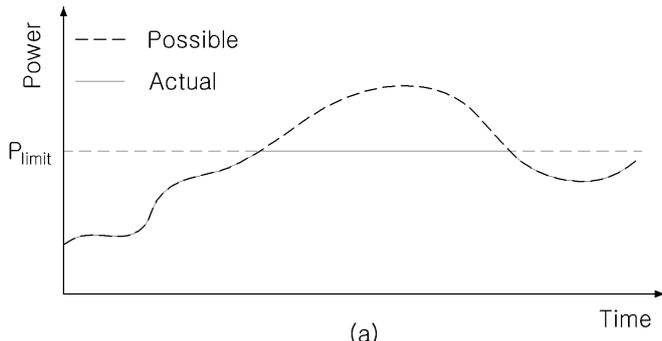
- | | | |
|--------|-------------------|-------------------|
| [0219] | 100: 풍력 발전기 시스템 | 110: TSO |
| | 120: 풍력 터빈 발전기 | 130: EMS |
| | 131: 전력 수신부 | 132: 이벤트 처리부 |
| | 133: 최대 출력 제한 운전부 | 134: 일정 출력 감소 운전부 |
| | 135: 제어부 | |

도면

도면1

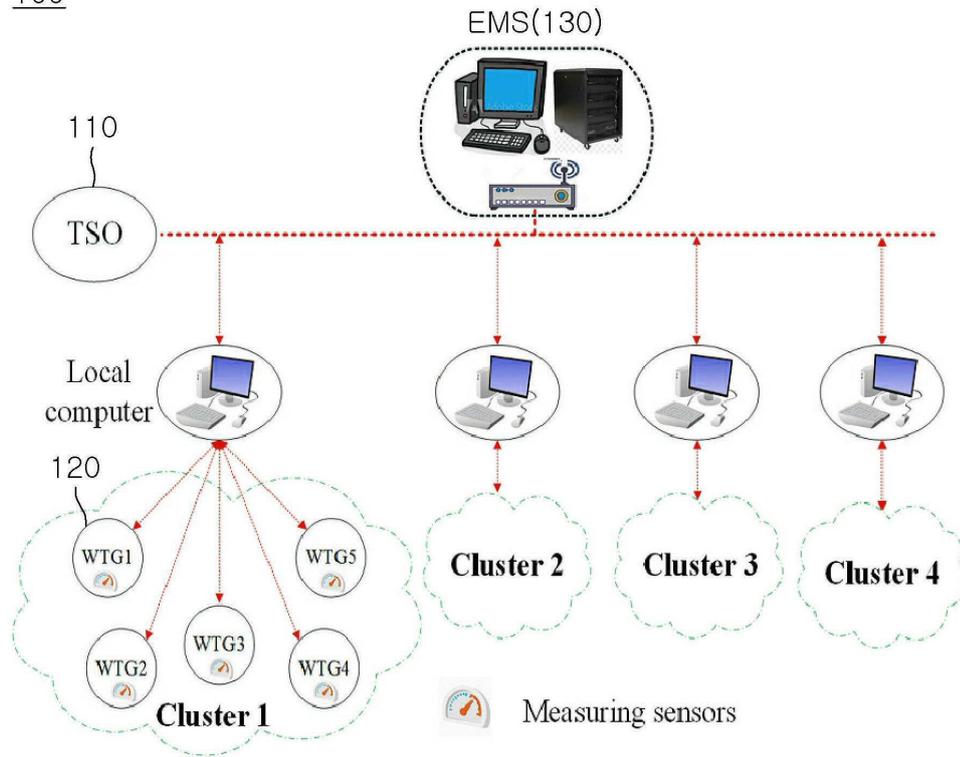


도면2

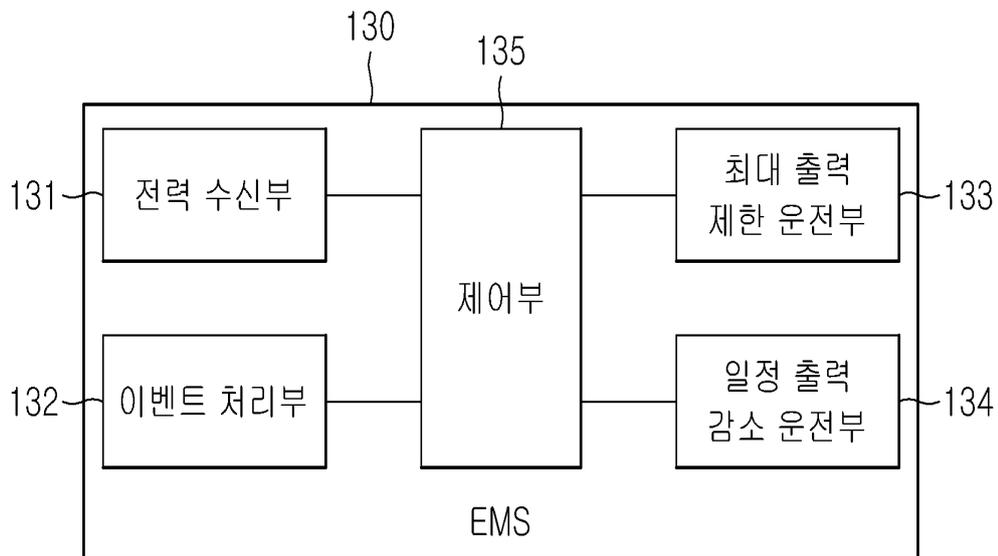


도면3

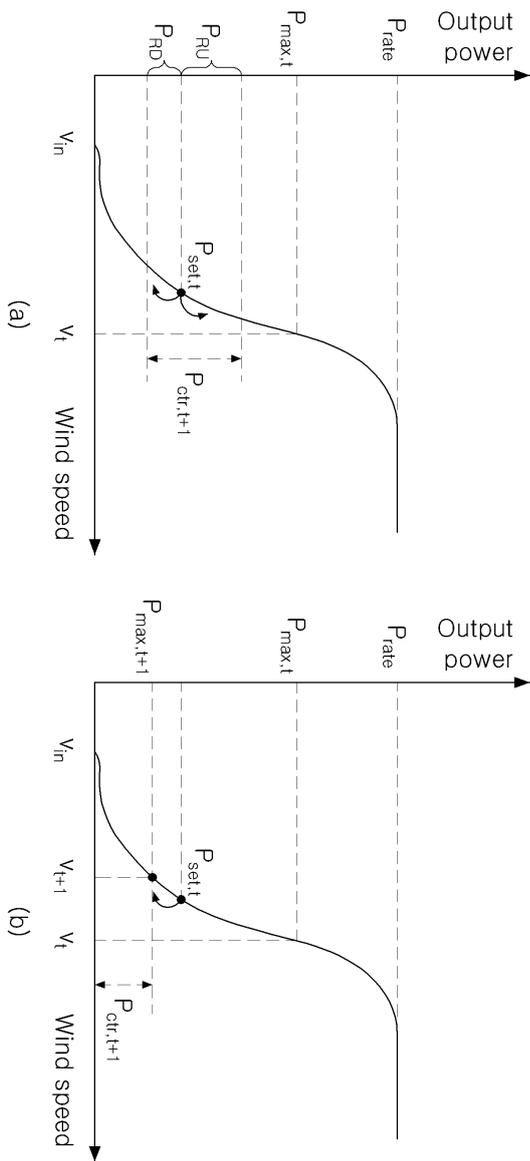
100



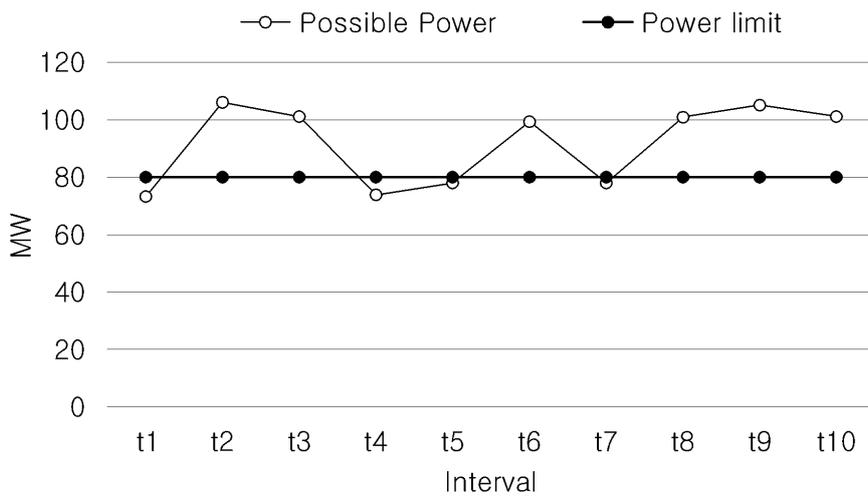
도면4



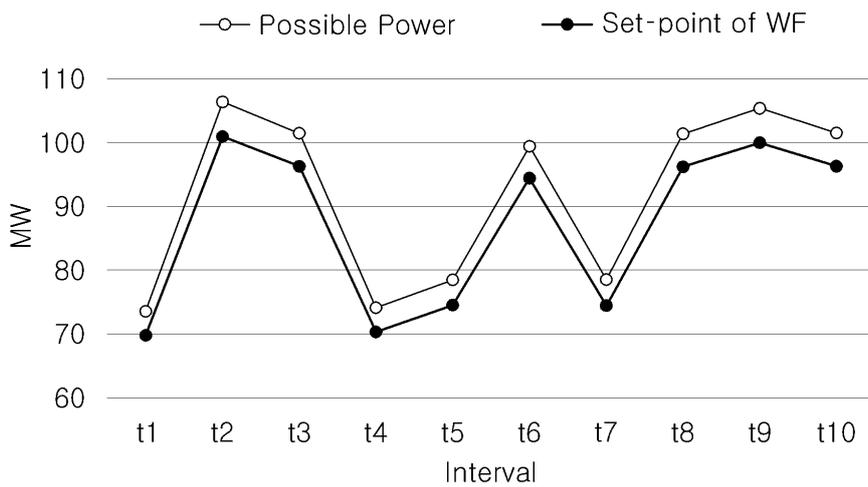
도면5



도면6

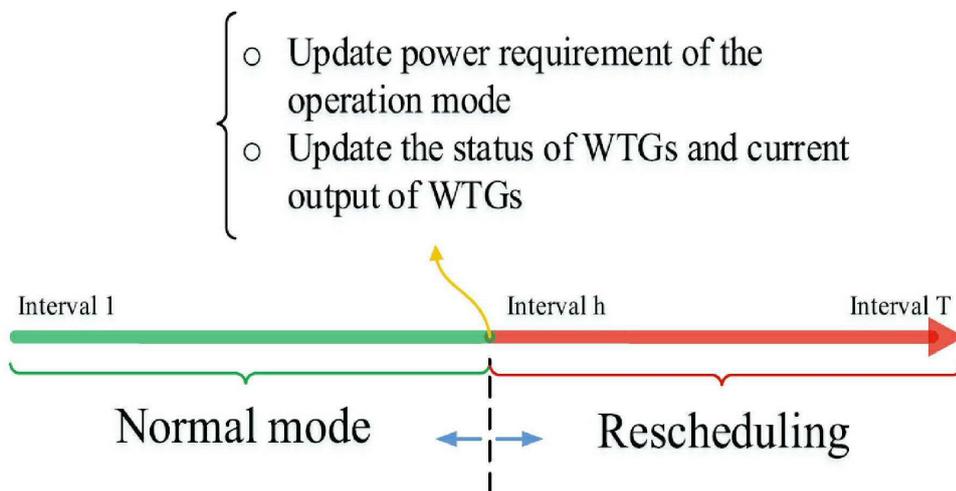


(a)

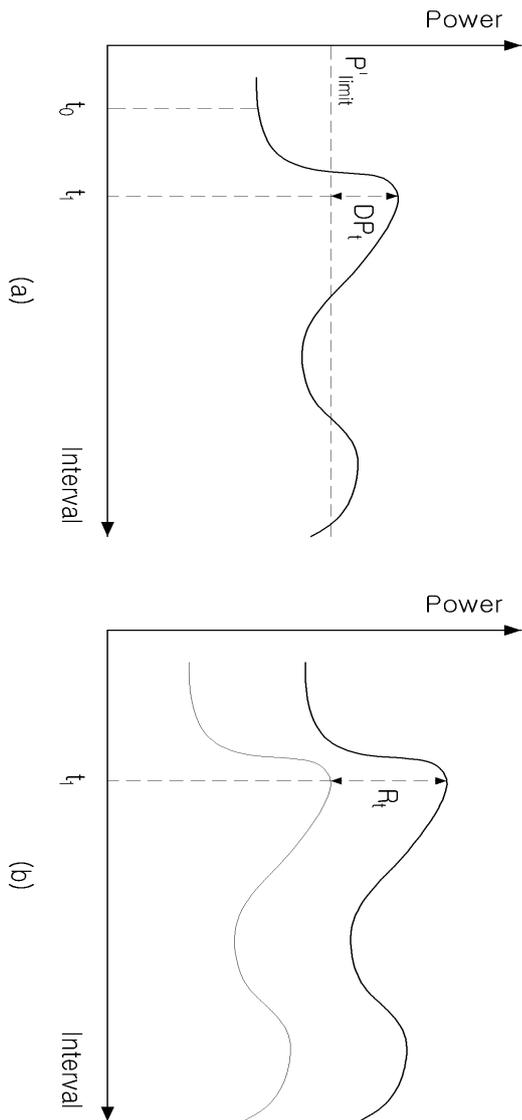


(b)

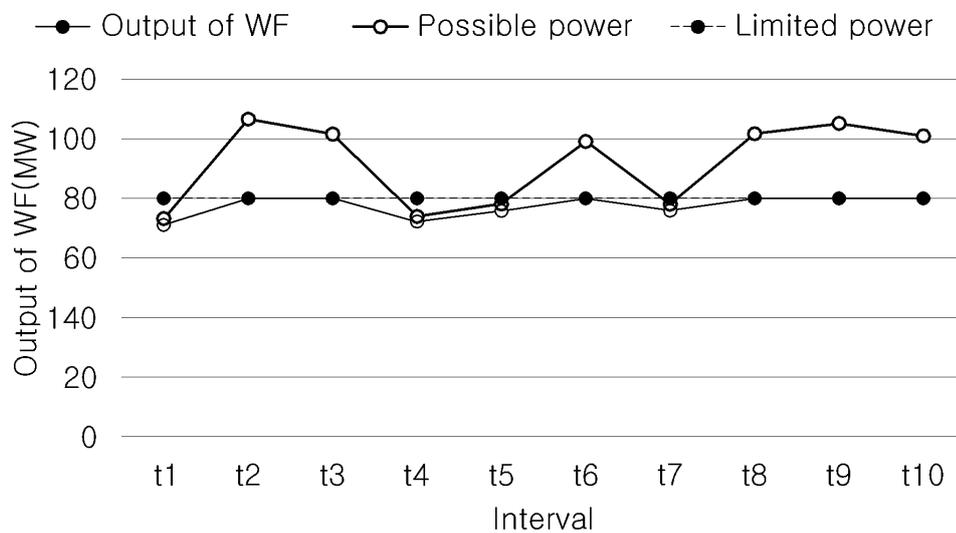
도면7



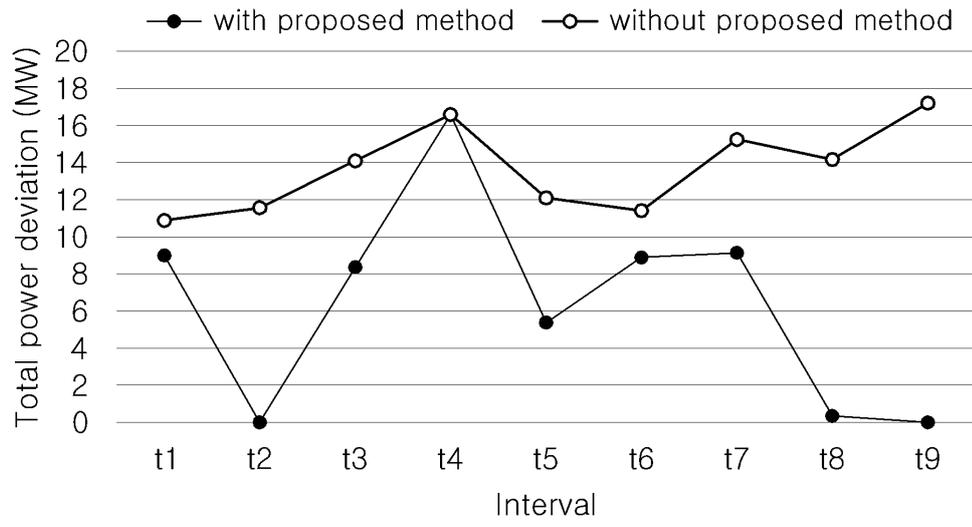
도면8



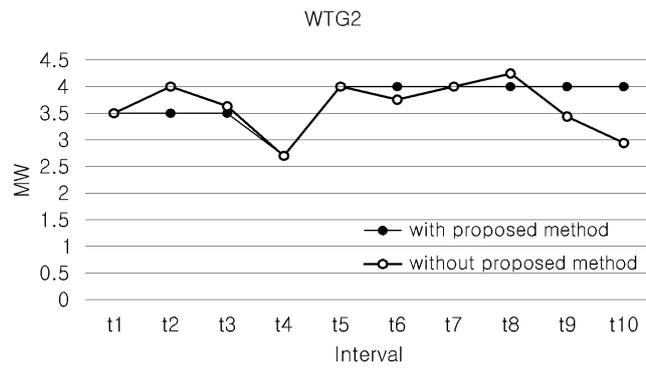
도면9



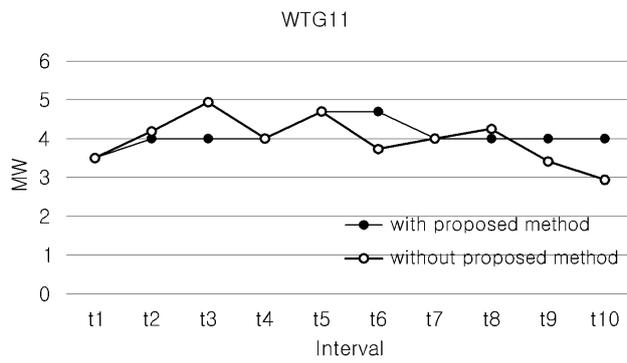
도면10



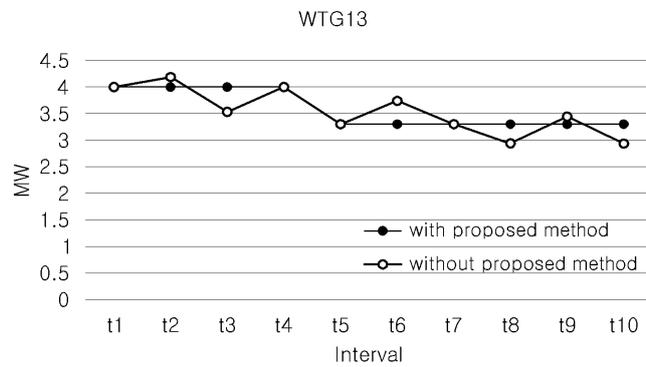
도면11



(a)

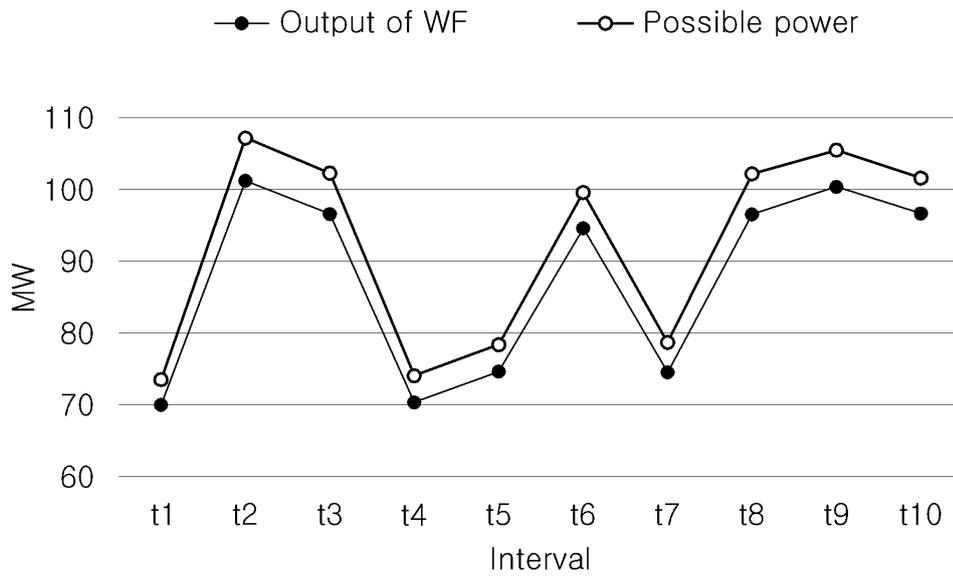


(b)

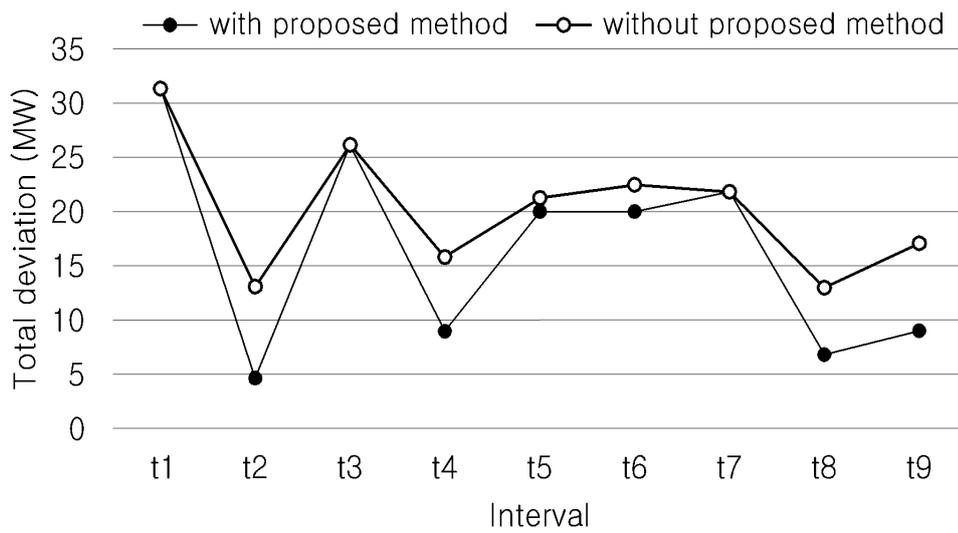


(c)

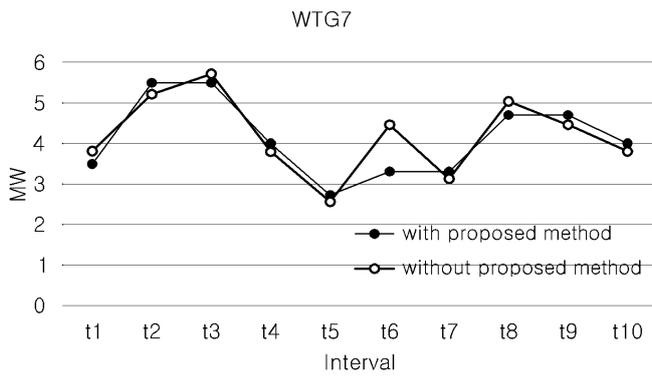
도면12



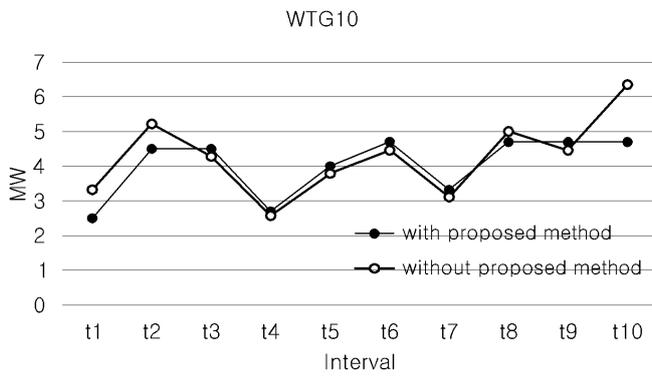
도면13



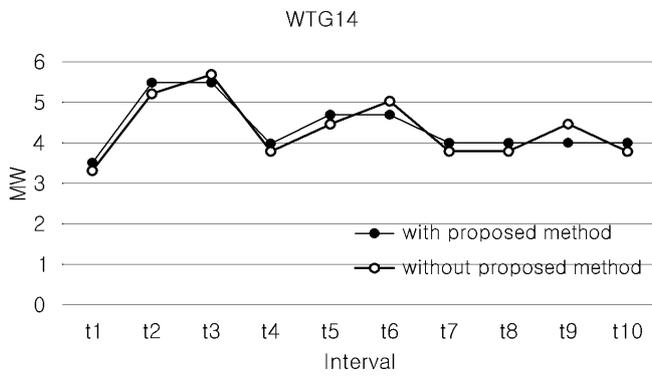
도면14



(a)

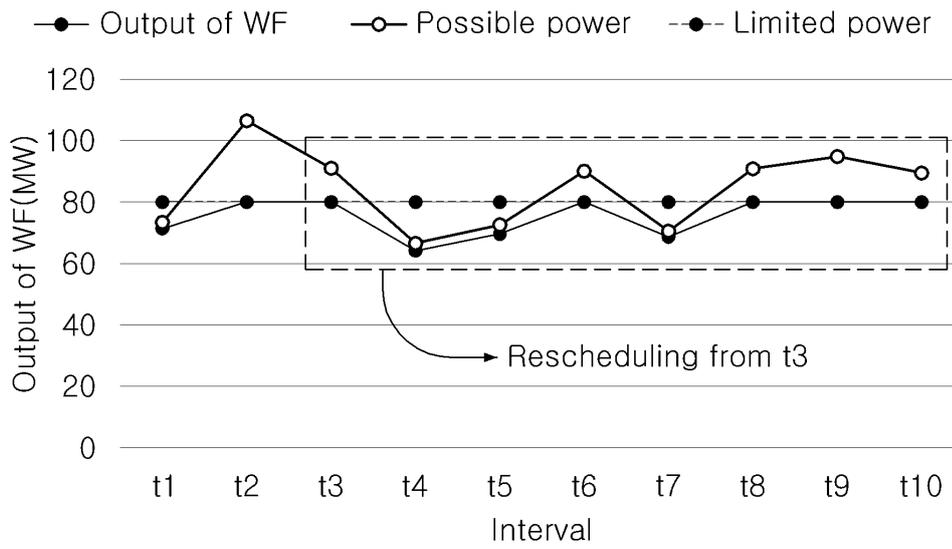


(b)

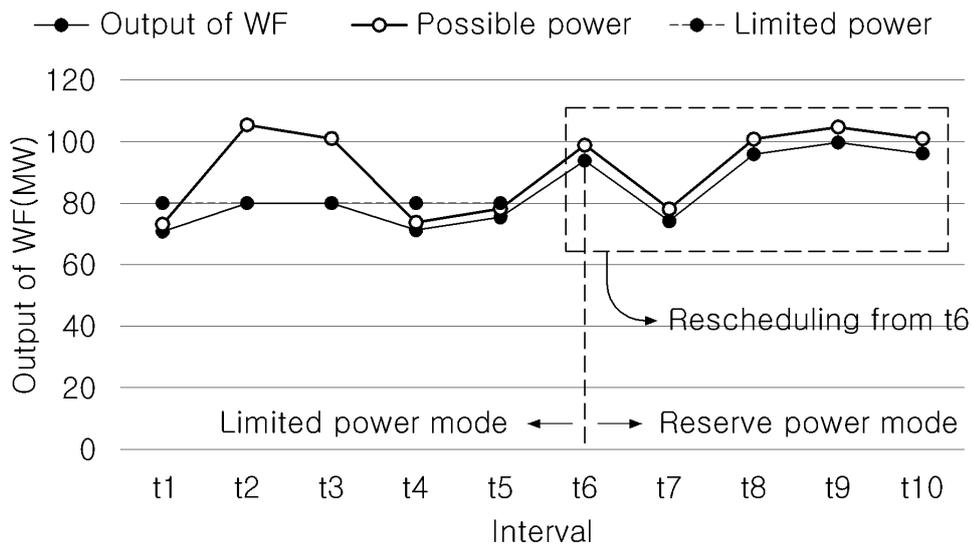


(c)

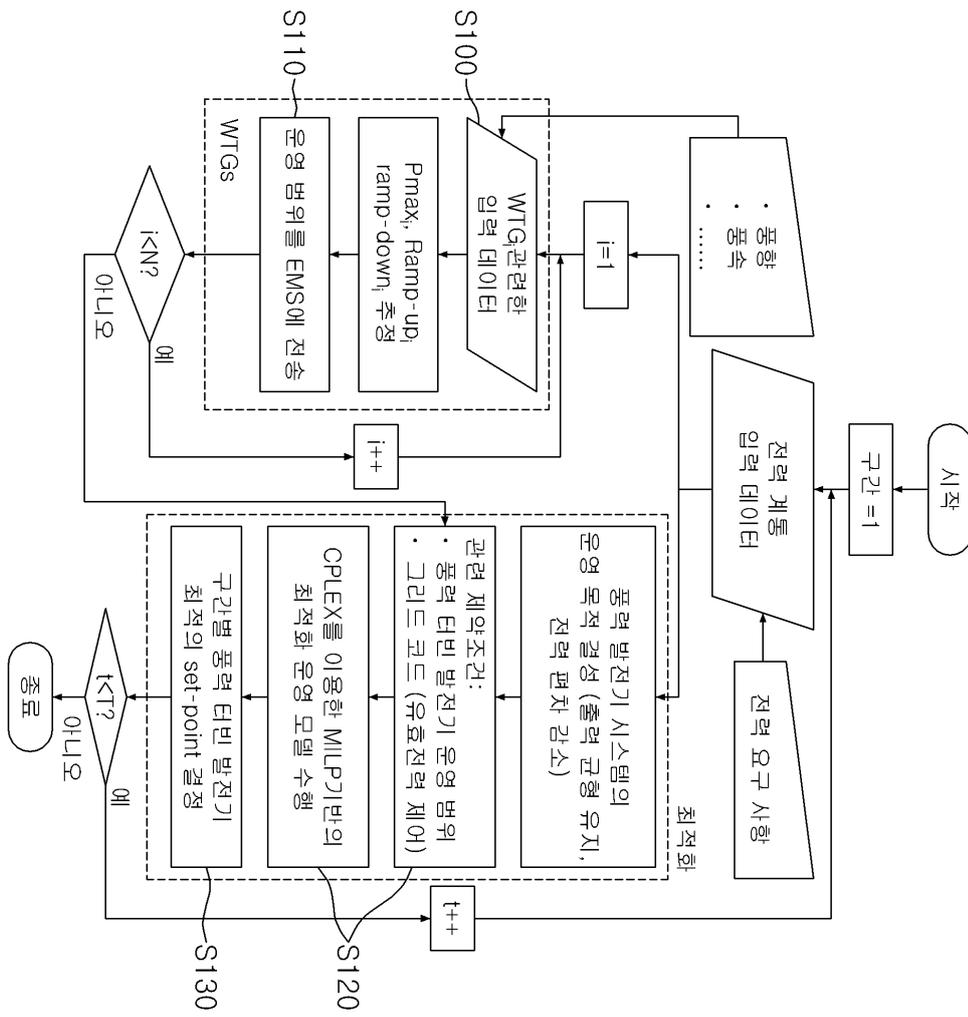
도면15



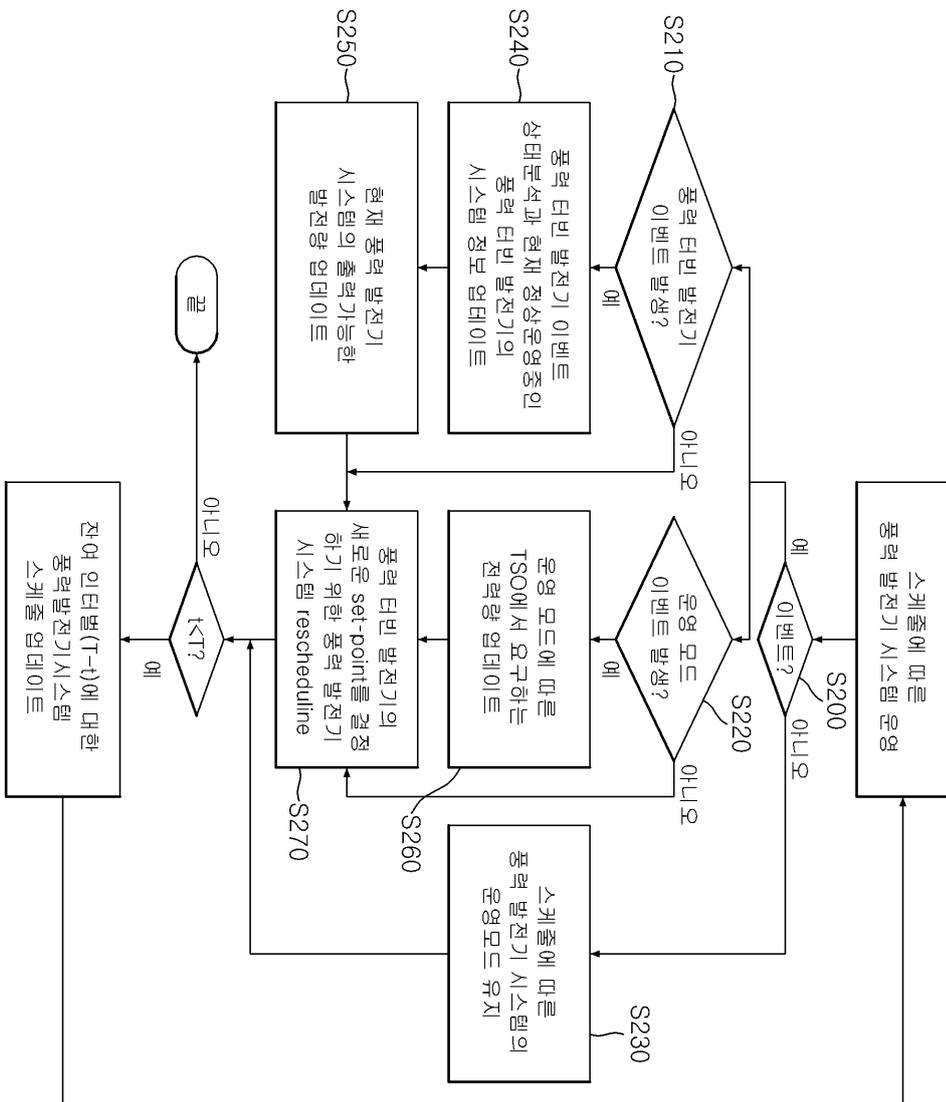
도면16



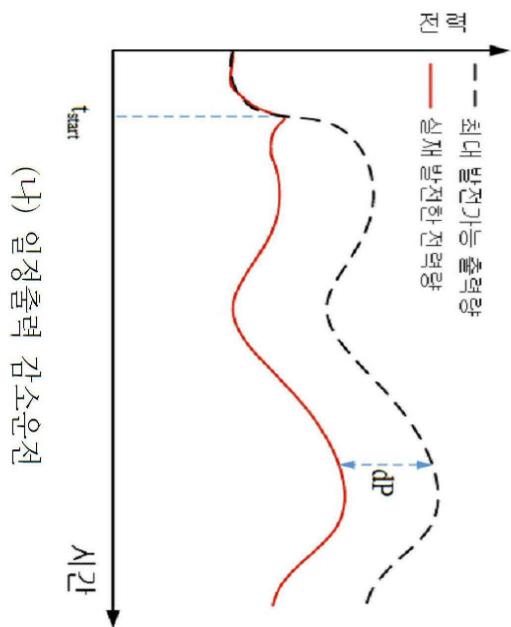
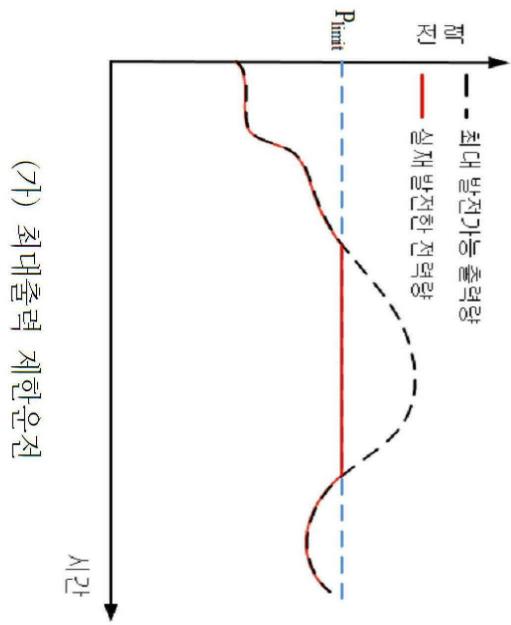
도면17



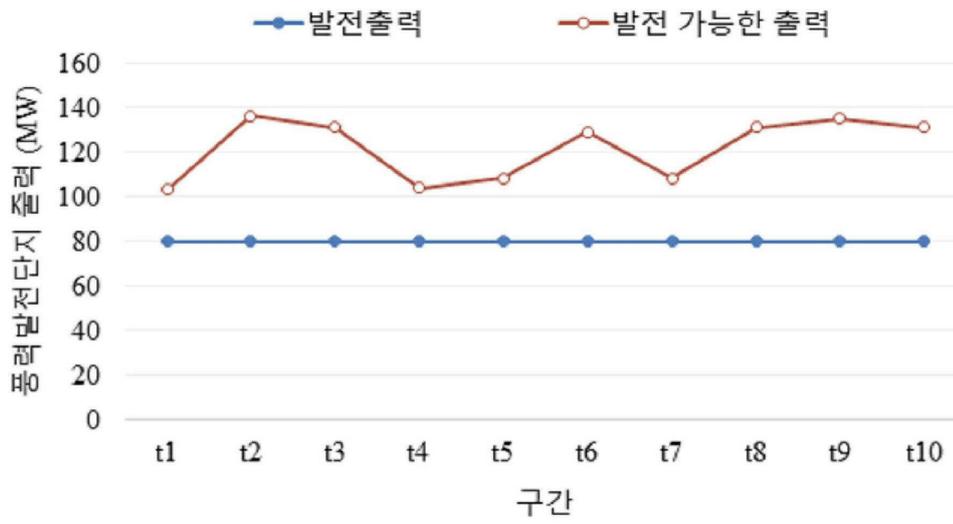
도면18



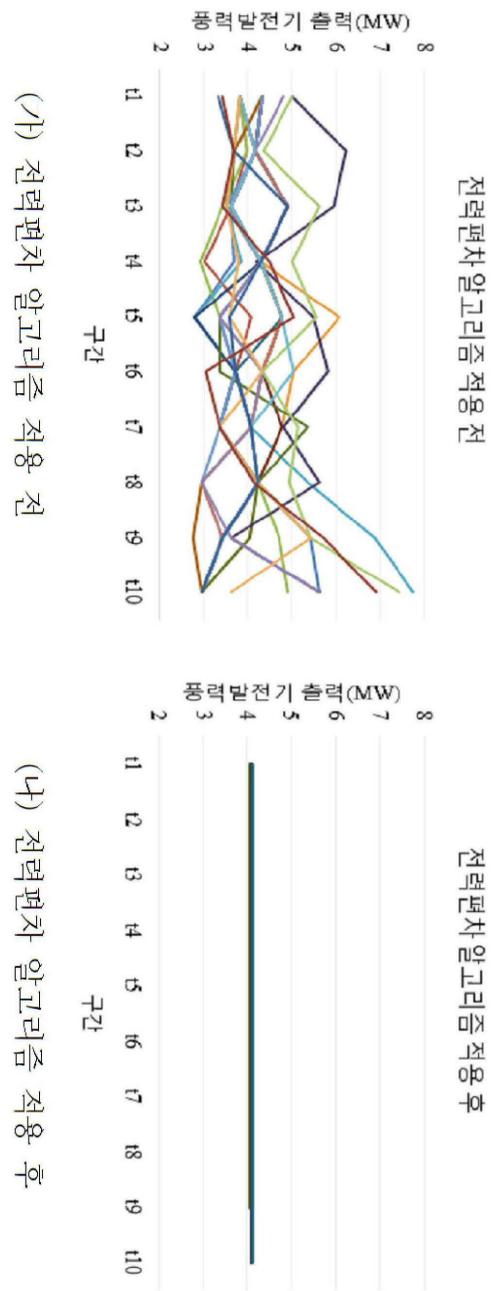
도면19



도면20



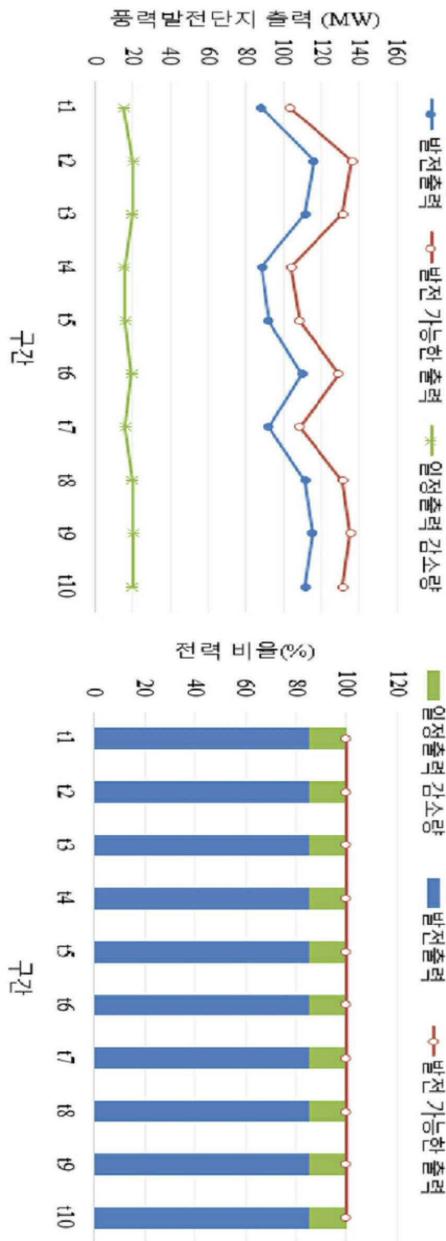
도면21



도면22

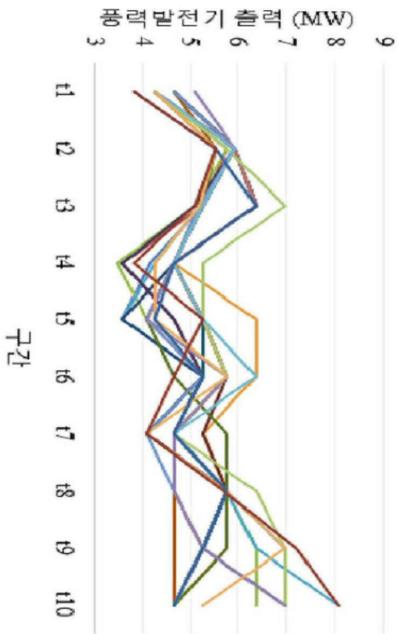


도면23



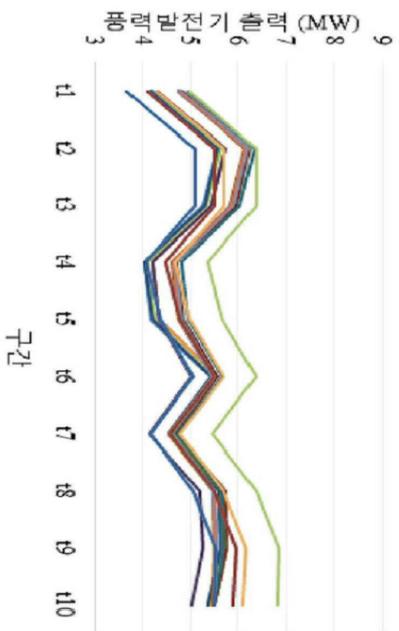
도면24

전력편차알고리즘 적용 전



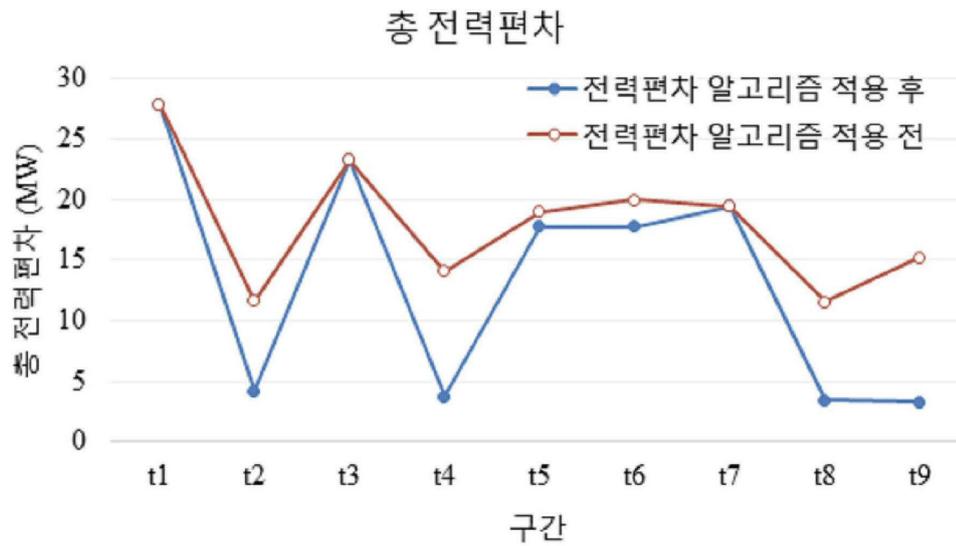
(가) 전력편차 알고리즘 적용 전

전력편차알고리즘 적용 후

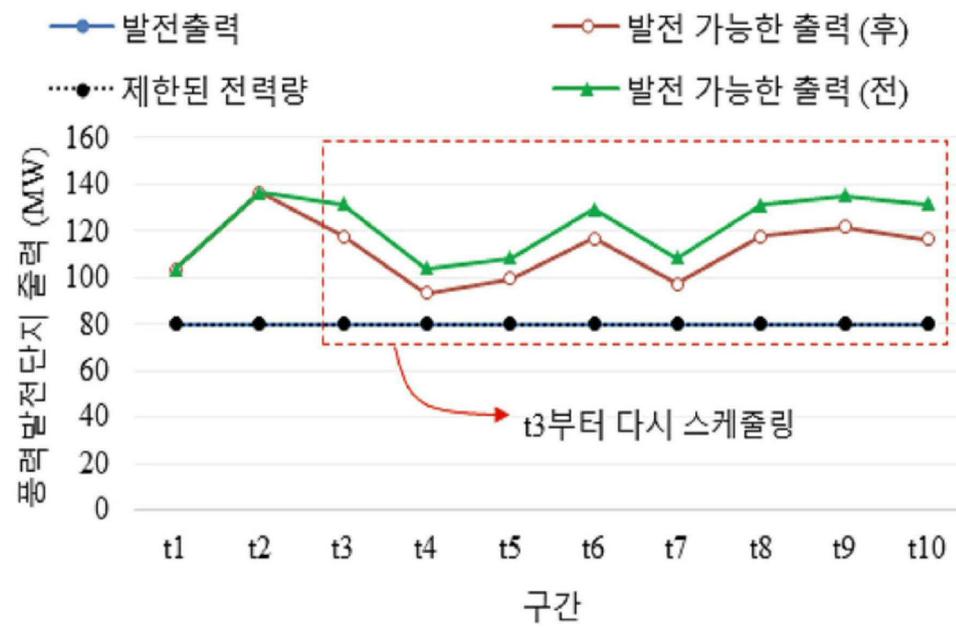


(나) 전력편차 알고리즘 적용 후

도면25



도면26



도면27

