



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2020년12월31일
(11) 등록번호 10-2197643
(24) 등록일자 2020년12월24일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/02 (2006.01) F03D 7/04 (2006.01)
H02J 3/38 (2006.01) H02P 9/48 (2006.01)
(52) CPC특허분류
F03D 7/028 (2013.01)
F03D 7/04 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2019-0152475
(22) 출원일자 2019년11월25일
심사청구일자 2019년11월25일
(56) 선행기술조사문헌
JP2004052649 A
JP2016100981 A
JP2016127755 A
WO2012140757 A1

(73) 특허권자
연세대학교 산학협력단
서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)
(72) 발명자
강용철
전라북도 전주시 덕진구 호성로 132
진흥더블파크1단지아파트 107동 1206호
박정욱
서울특별시 강남구 압구정로29길 71, 20동 701호
(압구정동, 현대아파트)
유재익
서울특별시 강동구 고덕로 130, 121동 404호(암사동, 프라이어팰리스)
(74) 대리인
오위환, 나성곤, 정기택

전체 청구항 수 : 총 18 항

심사관 : 박종오

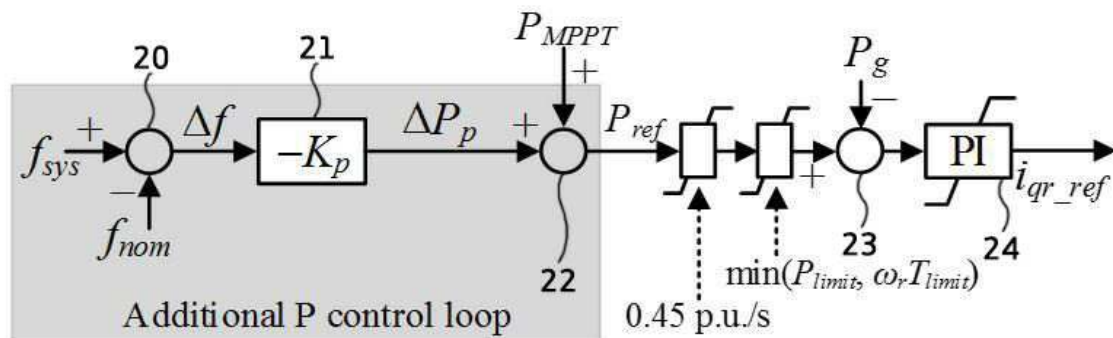
(54) 발명의 명칭 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법

(57) 요약

본 발명은 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어(frequency regulation)에 기여할 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법에 관한 것으로, 시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수

(뒷면에 계속)

대표도 - 도2



(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부; 주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 제어 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기; MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPT}) 및 제어값(ΔP_p)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부; 유효 전력 기준값 출력부의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정된 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부; 제어신호 출력부의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI);를 포함하는 것이다.

(52) CPC특허분류

H02J 3/386 (2013.01)

H02P 9/48 (2013.01)

F05B 2270/1041 (2013.01)

F05B 2270/335 (2013.01)

F05B 2270/502 (2013.01)

F05B 2270/701 (2013.01)

Y02E 10/76 (2020.08)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1415163443
부처명	산업통상자원부
과제관리(전문)기관명	한국에너지기술평가원
연구사업명	스마트그리드핵심기술개발(R&D)
연구과제명	배전 혼잡선로 해소를 위한 태양광/ESS 일체형 시스템 및 EMS 개발
기 여 율	1/2
과제수행기관명	연세대학교 산학협력단
연구기간	2019.01.01 ~ 2019.12.31

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711077096
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)(R&D)
연구과제명	전력계통 신뢰성 향상을 위한 신재생에너지원 통합 최적운영 및 해석 연구
기 여 율	1/2
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2018.10.01 ~ 2019.07.31

명세서

청구범위

청구항 1

시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부;

주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 제어 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기;

MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPPT}) 및 제어값(ΔP_p)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부;

유효 전력 기준값 출력부의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정된 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부;

제어신호 출력부의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI);를 포함하고, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 과주파수 구간에서는 최대 전력점 추종 제어로부터 나오는 출력보다 낮은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 남은 전력은 풍력발전기의 회전 에너지로 흡수되고,

반대로 저주파수 구간에서는 최대출력제어 출력보다 높은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 회전자의 운동 에너지가 방출되도록 하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 3

제 1 항에 있어서, 유효 전력 기준값(P_{ref})은 $P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P_p$ 으로 계산되고, $P_{MPPT} = k_g \omega_r^3$ 이고 $\Delta P_p = -K_p \Delta f$ 으로 구하고,

풍력발전기의 주파수 조정 성능은 Δf 루프의 제어 이득에 따라 결정되고,

여기서, k_g 는 풍력발전기의 MPPT 비례 상수이고, ω_r 은 회전자 회전 속도인 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 4

제 3 항에 있어서, 제어 이득(gain, K_p)을 정할 때, 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율에 기반하여 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 5

제 4 항에 있어서, 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 향상시키기 위해 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율을 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 선형적으로 감소하도록 설정하고,

저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 개선하기 위해서 출력 편차

(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 출력 편차와 최대 출력점 추종 제어값에 기반하여 각각 K_{p_ofs} 와 K_{p_ufs} 로 표기된 과주파수 구간과 저주파수 구간에 대해 별도의 제어 이득을 채용하고,

과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 높이기 위해 $\Delta P/P_{MPPT}$ 는,

$$\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r) = -\frac{b}{5} \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right) + a, \quad \text{for } \Delta f \geq 0$$

으로 설정하고,

저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 높이기 위해 $\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r)$ 는

$$\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r) = b \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right), \quad \text{for } \Delta f < 0$$

으로 구하고,

여기서 a 와 b 는 상수로서 사용자의 설계 목적에 따라 변경하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 7

제 6 항에 있어서, 과주파수 구간에서 P제어기의 제어 이득 K_{p_ofs} 는,

$$K_{p_ofs}(\omega_r) = \frac{1}{0.1/f_{nom}} \times k_g \omega_r^3 \times \left[-\frac{b}{5} \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right) + a \right], \quad \text{for } \Delta f \geq 0$$

으로 구하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 8

제 6 항에 있어서, 저주파수 구간에서 P제어기의 제어 이득 K_{p_ufs} 는,

$$K_{p_ufs}(\omega_r) = \frac{1}{0.1/f_{nom}} \times k_g \omega_r^3 \times \left[b \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right) \right], \quad \text{for } \Delta f < 0$$

으로 구하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 9

제 6 항에 있어서, P 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서,

모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나,

주파수 구간에 따라서,

과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고,

저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전

기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 10

시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부;

주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기;

주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_i)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_i)을 출력하는 적분 제어기 및 적분 제어값 출력부;

MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPPT}) 및 제어값(ΔP_p) 및 제어값(ΔP_i)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부;

유효 전력 기준값 출력부(54)의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정된 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부;

제어신호 출력부의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI)를 포함하고,

최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여 풍력발전기의 기준값을 결정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 11

제 10 항에 있어서, 유효 전력 기준값(P_{ref})은 $P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P_p + \Delta P_i$ 으로 구하고,

여기서, $P_{MPPT} = k_g \omega_r^3$, $\Delta P_p = -K_p \Delta f$, $\Delta P_i = -K_i \int \Delta f dt$ 이고, k_g 는 풍력발전기의 MPPT 비례 상수이고, ω_r 은 회전자 회전 속도이고,

풍력발전기의 주파수 조정 성능은 Δf 루프의 제어 이득에 따라 결정되고,

제어기에 들어가는 제어 이득은 P 제어기에 들어가는 제어 이득의 값에 일정 상수를 곱해서 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 12

제 10 항에 있어서, PI 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서,

모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나,

주파수 구간에 따라서,

과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고,

저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 13

제 1 항 또는 제 10항에 있어서, 출력 평활화 제어 시스템이 적용되는 대상은,

이중역자 유도 발전기 기반 풍력발전기(Type C) 또는 풀 컨버터(full converter) 기반 풍력발전기(Type D),

또는 계통 주파수에 따라 저장된 에너지를 이용하여 출력을 증가 또는 감소시킬 수 있는 모든 컨버터 기반 발전원 또는 에너지 저장장치 또는 전기자동차 또는 수요 반응을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템.

청구항 14

최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 단계;

P 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용하는 단계;

과주파수 구간에서의 게인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하는 단계;

저주파수 구간에서의 게인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서, P 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서,

모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나,

주파수 구간에 따라서,

과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고,

저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법.

청구항 16

최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 단계;

PI 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용하는 단계;

과주파수 구간에서의 게인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이 상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하는 단계;

저주파수 구간에서의 게인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법.

청구항 17

제 16 항에 있어서, PI 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서,

모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도

에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에 서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나,

주파수 구간에 따라서,

과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고,

저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에 서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전 기의 출력 평활화 제어 방법.

청구항 18

제 14 항 또는 제 16 항에 있어서, 출력 평활화 제어 방법이 적용되는 대상은,

이중역자 유도 발전기 기반 풍력발전기(Type C) 또는 풀 컨버터(full converter) 기반 풍력발전기(Type D),

또는 계통 주파수에 따라 저장된 에너지를 이용하여 출력을 증가 또는 감소시킬 수 있는 모든 컨버터 기반 발전 원 또는 에너지 저장장치 또는 전기자동차 또는 수요 반응을 포함하는 것을 특징으로 하는 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 풍력 발전 제어에 관한 것으로, 구체적으로 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기 의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어 (frequency regulation)에 기여할 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 풍력 발전이란 자연의 바람으로 블레이드를 돌리고, 이것을 기어기구 등을 이용하여 속도를 높여 발 전기를 돌리는 풍력 발전 설비의 경우 기상 조건에 따라 출력이 상시로 변동하는 특성을 가지게 된다.

[0003] 이러한 출력 상시 변동은 전력 계통의 운영 및 전력 품질에 나쁜 영향을 미치게 되는데, 특히 섬 계통이나 상대 적으로 규모가 작은 약소계통의 경우 과도한 출력변동으로 인하여 계통의 주파수 동요, 전압 변동, 및 플리커 발생 등의 문제가 자주 발생하게 되며 이는 곧 풍력 발전 설비로부터 공급되는 전력의 품질 저하 요인이 됨과 동시에 풍력 발전 설비 인근의 지역 계통에도 좋지 않은 영향을 미치게 되는 문제점이 발생한다.

[0004] 평상시에 부하가 지속적으로 변동하는 경우에 주파수가 변동하게 되는데, 이러한 주파수 변동은 전력계통 운영 자가 주파수를 일정한 범위 내로 조정하기 위하여 자동발전제어(automatic generation control, AGC)를 통해 동 기발전기에 출력 조정에 대한 신호를 보내 주고, 동기발전기가 출력을 조정함으로써 주파수가 일정한 범위 내로 제어된다.

[0005] 풍력발전기가 전력계통에 연계되어 운전되는 경우, 풍속이 지속적으로 변동함에 따라 풍력발전기의 출력이 변동 되고, 이에 따라 전력 계통의 주파수가 변동한다.

[0006] 특히, 풍력발전기의 수용률이 높을 때, 풍속이 지속적으로 변동시 최대 전력점 추종(maximum power point tracking, MPPT) 제어를 수행하는 경우 주파수를 좁은 범위로 유지시키는 데에 어려움이 발생한다.

[0007] 더욱이, 한국에서는 36mHz로 되어 있는 동기발전기 조속기(governor)의 불감대(deadband)를 초과할 경우 상정사 고에 대비하여 보유한 1차 예비력(primary reserve)을 방출하게 되므로, 주파수의 안정성까지 위협할 수 있다.

[0008] 이를 피하기 위해서는 1차 예비력이나 주파수 제어 예비력이 더 필요하며, 이로 인해 전력 계통의 운영 비용이 증가하게 되므로 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력 변동을 경감하는 방안이 필요하다.

- [0009] 풍력발전기의 출력을 평활화하기 위해서 슈퍼캐패시터, 플라이휠 또는 배터리와 같은 에너지 저장장치를 사용할 수 있다. 하지만 이 경우에는 추가적인 시설이 필요한 만큼 해당 시설들을 설치하고 유지하는데 많은 비용이 든다.
- [0010] 이러한 단점을 해결하기 위해 종래 기술에서 제안된 제어 방식은 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가한 방식이 있다.
- [0011] 또한, P 제어 루프의 제어 이득으로 고정 값을 사용하거나 회전자 회전 속도에 따른 가변 제어 이득(variable control gain)을 이용한 주파수 제어 방식을 사용한다.
- [0012] 이와 같은 방법들은 풍력발전기의 회전체 질량을 효과적으로 사용하지 못하기 때문에 주파수를 좀 더 좁은 밴드 안 쪽으로 제어할 수 없다는 단점이 있다.
- [0013] 종래 기술의 가변 제어 이득을 사용하는 제어 방법은 도 1a와 도 1b에서와 같이, 회전자 회전 속도가 일정 값 이하일 경우에는 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPTT})에 대한 비율이 회전자 회전 속도에 비례하게 되어 있고 일정 값 이상일 경우에는 일정한 값으로 설정한다.
- [0014] 이와 같은 종래 기술의 제어 방식에서도 최소 회전자 회전 속도(0.7 p.u.)에서는 제어 이득이 0으로 설정되어 있기 때문에 풍력발전기의 과도한 에너지 방출을 방지할 수 있다.
- [0015] 하지만, 저주파수 구간뿐만 아니라 과주파수 구간에서도 같은 제어 이득을 사용하기 때문에 주파수 제어 성능에는 많은 제한이 따른다.
- [0016] 그 이유는 과주파수 구간에서 풍력발전기는 에너지를 흡수하여 주파수 편차를 줄여야 하는데, 낮은 회전자 회전 속도에서의 제어 이득이 적으므로, 풍력발전기가 회전 질량으로 에너지를 흡수할 가능성이 높음에도 불구하고, 에너지를 흡수하는 데 기여도가 낮기 때문이다.
- [0017] 따라서, 종래 기술은 저주파수 구간뿐만 아니라 과주파수 구간에서도 동일한 제어 이득을 사용함으로써 과주파수 구간의 주파수 편차를 줄이는 능력이 저하된다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0018] (특허문헌 0001) 대한민국 공개특허 제10-2016-0106335호
(특허문헌 0002) 대한민국 공개특허 제10-2011-0117320호
(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 제10-2016-0107877호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0019] 본 발명은 종래 기술의 풍력발전기의 출력 평활화 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 효과적으로 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어(frequency regulation)에 기여할 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0020] 본 발명은 주파수 기준값과 비교한 주파수 편차를 이용하여 저주파수 구간과 과주파수 구간에 따른 별도의 제어 이득을 결정하여 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 향상시키고, 저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 개선할 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0021] 본 발명은 별도의 에너지 저장장치를 사용하지 않아 출력 평활화를 위해 추가적으로 드는 비용을 줄일 수 있고, 주파수 제어를 위해 동기발전기들이 추가적으로 가져야 하는 1차 예비력 또는 주파수 제어 예비력을 줄여 전력 계통의 운영 비용을 줄일 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

- [0022] 본 발명은 슈퍼캐패시터, 플라이휠 또는 배터리와 같은 에너지 저장장치를 사용하지 않고 최대 전력점 추종 제어 루프와 연계하여 동작하는 주파수 편차(Δf)를 기반으로 하는 PI 제어 루프를 채택하는 풍력발전기의 출력 평활화 제어에 의해 풍력발전기의 출력 변동을 원활하게 제어할 수 있도록 한 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0023] 본 발명은 풍력발전기가 가지고 있는 무거운 회전체를 에너지 저장장치로 활용하여 풍력발전기의 출력을 평활화 하고, 주파수 변동을 완화할 수 있어 풍력발전기의 수용률이 높아질 수록 정상시의 주파수 제어에 더욱 유리한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0024] 본 발명의 다른 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0025] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부; 주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 제어 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기; MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPT}) 및 제어값(ΔP_p)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부; 유효 전력 기준값 출력부(22)의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정한 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부; 제어신호 출력부의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI);를 포함하고, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 것을 특징으로 한다.
- [0026] 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부; 주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 제어 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기; 주파수 편차 출력부의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_i)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_i)을 출력하는 적분 제어기 및 적분 제어값 출력부; MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPT}) 및 제어값(ΔP_p) 및 제어값(ΔP_i)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부; 유효 전력 기준값 출력부(54)의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정한 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부; 제어신호 출력부의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI)를 포함하고, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여 풍력발전기의 기준값을 결정하는 것을 특징으로 한다.
- [0027] 또 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법은 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 단계; P 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용하는 단계; 과주파수 구간에서의 계인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이 상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하는 단계; 저주파수 구간에서의 계인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0028] 또 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법은 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정하는 단계; PI 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용하는 단계; 과주파수 구간에서의 계인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이 상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하는 단계; 저주파수 구간에서의 계인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0029] 이상에서 설명한 바와 같은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법은 다음과 같은 효과가 있다.
- [0030] 첫째, 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어(frequency regulation)에 효율적으로 기여할 수 있도록 한다.
- [0031] 둘째, 주파수 기준값과 비교한 주파수 편차를 이용하여 저주파수 구간과 과주파수 구간에 따른 별도의 제어이득을 결정하여 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 향상시키고, 저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 개선할 수 있도록 한다.
- [0032] 셋째, 별도의 에너지 저장장치를 사용하지 않아 출력 평활화를 위해 추가적으로 드는 비용을 줄일 수 있고, 주파수 제어를 위해 동기발전기들이 추가적으로 가져야 하는 1차 예비력 또는 주파수 제어 예비력을 줄여 전력 계통의 운영 비용을 줄일 수 있다.
- [0033] 넷째, 슈퍼캐패시터, 플라이휠 또는 배터리와 같은 에너지 저장장치를 사용하지 않고 최대 전력점 추종 제어 루프와 연계하여 동작하는 주파수 편차(f)를 기반으로 하는 PI 제어 루프를 채택하는 풍력발전기의 출력 평활화 제어에 의해 풍력발전기의 출력 변동을 원활하게 제어할 수 있다.
- [0034] 다섯째, 풍력발전기가 가지고 있는 무거운 회전체를 에너지 저장장치로 활용하여 풍력발전기의 출력을 평활화하고, 주파수 변동을 완화할 수 있어 풍력발전기의 수용률이 높아질 수록 정상시의 주파수 제어에 더욱 유리한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법을 제공한다.

도면의 간단한 설명

- [0035] 도 1a와 도 1b는 종래 기술의 제어 이득 결정 곡선 그래프
- 도 2는 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 구성도
- 도 3a와 도 3b는 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법을 나타낸 플로우 차트
- 도 4a와 도 4b는 저주파수 구간과 과주파수 구간에서의 P/P_{MPT} 와 P 제어기 제어 이득 곡선 그래프
- 도 5는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 구성도
- 도 6은 풍력 발전 단지가 연계된 IEEE 14-모선 시스템 구성도
- 도 7은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 시뮬레이션에서 사용한 풍속 데이터
- 도 8은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 시뮬레이션 결과(풍력발전기의 출력, 회전자 속도, 계통 주파수) 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0036] 이하, 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법의 바람직한 실시 예에 관하여 상세히 설명하면 다음과 같다.
- [0037] 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법의 특징 및 이점들은 이하에서의 각 실시 예에 대한 상세한 설명을 통해 명백해질 것이다.
- [0038] 도 2는 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 구성도이다.
- [0039] 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법은 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어(frequency regulation)에 효율적으로 기여할 수 있도록 한 것이다.
- [0040] 이를 위하여 본 발명은 주파수 기준값과 비교한 주파수 편차를 이용하여 저주파수 구간과 과주파수 구간에 따른

별도의 제어이득을 결정하는 구성을 포함하고, 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 향상시키고, 저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 개선할 수 있도록 한다.

- [0041] 저주파수 구간의 제어 이득을 결정하는 데 있어서 제안한 수학적뿐만 아니라, 도 4b와 같이 과도한 회전 에너지 방출을 방지하기 위하여 최저 회전자 속도일 경우 제어 이득을 0으로 설정하고 풍력발전기 출력 평활화 성능을 향상시키기 위해 회전자 속도가 증가할수록 제어 이득의 값이 증가하도록 하는 모든 제어 이득 결정 방안을 포함한다.
- [0042] 슈퍼캐패시터, 플라이휠 또는 배터리와 같은 에너지 저장장치를 이용하면 풍력발전기의 출력 변동을 원활하게 제어할 수 있지만 해당 시설들을 설치하고 유지하는데 많은 비용이 든다.
- [0043] 본 발명은 이 비용의 발생을 방지하거나 줄이기 위해 최대 전력점 추종 제어 루프와 연계하여 동작하는 주파수 편차(Δf)를 기반으로 하는 P 제어 루프를 채택하는 풍력발전기의 출력 평활화 제어를 위한 것이다.
- [0044] 본 발명의 일 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 도 2에서와 같이, 주파수 기준값과 비교한 주파수 편차를 이용하여 저주파수 구간과 과주파수 구간에 따른 별도의 제어이득을 결정한다.
- [0045] 과주파수 구간에서는 최대 전력점 추종 제어로부터 나오는 출력보다 낮은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 남은 전력은 풍력발전기의 회전 에너지로 흡수되고, 반대로 저주파수 구간에서는 최대출력제어 출력보다 높은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 회전자의 운동 에너지가 방출되도록 한다.
- [0046] 이를 위하여, P 제어기는 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정한다.
- [0047] 본 발명의 일 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부(20)와, 주파수 편차 출력부(20)의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기(21)와, MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPPT}) 및 제어값(ΔP_p)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부(22)와, 유효 전력 기준값 출력부(22)의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정된 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부(23)와, 제어신호 출력부(23)의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI)(24)를 포함한다.
- [0048] 도 2에서 각 블록의 입력 및 출력 파라미터를 다음과 같이 정의한다.
- [0049] f_{sys} , f_{nom} : 시스템 주파수 및 기준 주파수
- [0050] K_p : 비례 제어기의 Gain
- [0051] P_{MPPT} : MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준 값
- [0052] P_{ref} , P_g : 유효 전력 기준 값 및 터미널에서 측정된 유효 전력
- [0053] ΔP_p : 출력 평활화를 위한 비례 제어기의 출력
- [0054] i_{qr_ref} : 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값
- [0055] 이와 같은 구성을 갖는 본 발명의 일 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 출력 평활화 제어 과정을 설명하면 다음과 같다.
- [0056] 도 3a와 도 3b는 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법을 나타낸 플로우 차트이다.
- [0057] 도 3a는 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하는 출력 평활화 제어 방법을 나타낸 것이다.

- [0058] 먼저, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 P 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정한다.(S301)
- [0059] 이어, P 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용한다.(S302)
- [0060] 그리고 과주파수 구간에서의 계인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이 상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정한다.(S303)
- [0061] 이어, 저주파수 구간에서의 계인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정한다.(S304)
- [0062] 그리고 도 3b는 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하는 출력 평활화 제어 방법을 나타낸 것이다.
- [0063] 먼저, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정한다.(S311)
- [0064] 이어, PI 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용한다.(S312)
- [0065] 그리고 과주파수 구간에서의 계인을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이 상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정한다.(S313)
- [0066] 이어, 저주파수 구간에서의 계인을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정한다.(S314)
- [0067] 이와 같은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 방법을 더 구체적으로 설명하면 다음과 같다.

수학식 1

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P_p$$

[0068]

수학식 2

$$P_{MPPT} = k_g \omega_r^3$$

[0069]

[0070] 여기서, k_g 는 풍력발전기의 MPPT 비례 상수이다.

수학식 3

$$\Delta P_p = -K_p \Delta f$$

[0071]

[0072] 도 2 및 수학식에서와 같이, ΔP_p 는 Δf 에 제어 이득(K_p)을 곱하여 구한다.

[0073] 따라서, 풍력발전기의 주파수 조정 성능은 Δf 루프의 제어 이득에 따라 결정된다.

[0074] P 제어기에 사용되는 제어 이득(gain)을 정할 때, 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율에 기반하여 과주파수 구간과 저주파수 구간에서 각각 별도의 제어 이득을 사용한다.

[0075] 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 향상시키기 위해 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율을 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 선형적으로 감소하도록 설정한다.

[0076] 한편, 저주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 개선하기 위해서 출력 편차(ΔP)의 최대 전력점 추종 제어 값(P_{MPPT})에 대한 비율을 회전자 회전 속도에 따라 0부터 증가하도록 설정한다.

[0077] 이와 같은 방법을 사용하면, 풍력발전기의 회전체 질량을 에너지 저장장치처럼 이용하여 출력 평활화 능력을 현저하게 향상시킬 수 있다.

[0078] P 제어기의 제어 이득(K_p)을 결정하는 데 있어서 출력 편차와 최대 출력점 추종 제어값에 기반하여 각각 K_{p_ofs} 와 K_{p_ufs} 로 표기된 과주파수 구간과 저주파수 구간에 대해 별도의 제어 이득을 채용한다. 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 높이기 위해 $\Delta P/P_{MPPT}$ 는 다음과 같이 설정한다.

수학식 4

$$\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r) = -\frac{b}{5} \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right) + a, \quad \text{for } \Delta f \geq 0$$

[0079] 여기서 a 와 b 는 상수로써 사용자의 설계 목적에 따라 변경될 수 있다.

[0081] 그리고 ω_{\min} 은 풍력발전기의 최소 회전자 속도이고, ω_{\max} 는 풍력발전기의 최대 회전자 속도이다.

[0082] 과주파수 구간에서는 회전자가 최소 속도일 때 $\Delta P/P_{MPPT}$ 값을 가장 크게 설정하여 풍력발전기의 에너지 흡수 능력을 극대화시키고 회전자의 속도가 빨라질수록 $\Delta P/P_{MPPT}$ 를 비례적으로 줄인다.

[0083] 회전자의 속도가 최대값보다 커지게 되면 피치각 제어기가 동작하여 바람에너지를 잃어버리는 상황이 발생할 수 있기 때문에 회전자의 속도가 빠르면 $\Delta P/P_{MPPT}$ 값을 점점 줄이는 것이다.

[0084] 이렇게 과주파수 구간에서 에너지를 많이 흡수할수록, 저주파수 구간에서 방출할 수 있는 에너지의 양이 많아진다는 뜻이므로 저주파수 구간에서의 주파수 조정 능력에 도움이 된다.

[0085] K_{p_ofs} 는 아래 식과 같이 $\Delta P/P_{MPPT}$ 에 수학식 2의 P_{MPPT} 를 곱한 다음 0.1Hz를 나누면 얻을 수 있다.

수학식 5

$$K_{p_ofs}(\omega_r) = \frac{1}{0.1/f_{nom}} \times k_g \omega_r^3 \times \left[-\frac{b}{5} \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right) + a \right], \quad \text{for } \Delta f \geq 0$$

[0087] 여기서, K_{p_ofs} 는 과주파수 구간에서 P제어기의 제어 이득이다.

[0088] 수학식 4의 $\Delta P/P_{MPPT}$ 는 기존 방식보다 회전 질량에 더 많은 에너지를 흡수할 수 있으므로 저주파수 구간에서 기존 방식보다 더 큰 $\Delta P/P_{MPPT}$ 를 설정하여, 출력 평활화 능력을 향상시킬 수 있다.

[0089] 한편, 과주파수 구간에서는 풍력발전기의 안정적인 동작을 보장하면서 에너지 방출 능력을 높이기 위해 $\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r)$ 는 다음과 같이 설정한다.

수학식 6

$$\Delta P/P_{MPPT}(\omega_r) = b \left(\frac{\omega_r - \omega_{\min}}{\omega_{\max} - \omega_{\min}} \right), \quad \text{for } \Delta f < 0$$

[0090]

[0091] 저주파수 구간에서는 회전자 각도 θ 가 최소 속도일 때 $\Delta P/P_{MPPT}$ 값을 0으로 설정하여야 풍력발전기의 안정성을 보장할 수 있고, 회전자의 속도가 커질수록 $\Delta P/P_{MPPT}$ 값을 비례적으로 증가시키면, 회전자의 속도가 높을수록 더 많은 에너지를 방출할 수 있다는 것이므로 출력 평활화에 더욱 기여하기 때문이다.

[0092] K_{p_ufs} 는 아래 식과 같이 $\Delta P/P_{MPPT}$ 에 수학적 2의 P_{MPPT} 를 곱한 다음 0.1Hz를 나누면 얻을 수 있다.

수학적 7

$$K_{p_ufs}(\omega_r) = \frac{1}{0.1/f_{nom}} \times k_g \omega_r^3 \times [b(\frac{\omega_r - \omega_{min}}{\omega_{max} - \omega_{min}})], \text{ for } \Delta f < 0$$

[0094] 여기서, K_{p_ufs} 는 저주파수 구간에서 P제어기의 제어 이득이다.

[0095] 도 4a와 도 4b는 저주파수 구간과 과주파수 구간에서의 P/P_{MPPT} 와 P 제어기 제어 이득 곡선 그래프이다.

[0096] 본 발명의 다른 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 구성을 설명하면 다음과 같다.

[0097] 도 5는 본 발명의 다른 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 구성도이다.

[0098] 본 발명의 다른 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여 풍력발전기의 기준값을 결정하는 것이다.

[0099] 도 5 및 수학적 8 ~ 11에서와 같이, 최대 전력점 추종 제어 루프에 주파수 편차에 기반한 PI 제어 루프를 추가하여, 풍력발전기의 출력의 기준값을 결정한다.

[0100] 이는 P 제어기만 사용하는 방식보다 정상상태 편차(steady-state error)를 줄여 주어 출력 변동을 더 좁은 범위로 유지할 수 있다.

[0101] 본 발명의 다른 실시 예에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템은 도 5에서와 같이, 시스템 주파수(f_{sys}) 및 기준 주파수(f_{nom})를 입력으로 주파수 편차(Δf)를 출력하는 주파수 편차 출력부(50)와, 주파수 편차 출력부(50)의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_p)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_p)을 출력하는 비례 제어기(51)와, 주파수 편차 출력부(50)의 주파수 편차(Δf)를 입력으로 이득(K_i)을 갖고 출력 평활화를 위한 제어값(ΔP_i)을 출력하는 적분 제어기(52) 및 적분 제어값 출력부(53)와, MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준값(P_{MPPT}) 및 제어값(ΔP_p) 및 제어값(ΔP_i)을 입력으로 유효 전력 기준값(P_{ref})을 출력하는 유효 전력 기준값 출력부(54)와, 유효 전력 기준값 출력부(54)의 유효 전력 기준값(P_{ref}) 및 터미널에서 측정한 유효 전력(P_g)을 입력으로 출력 평활화 제어를 위한 신호를 출력하는 제어신호 출력부(55)와, 제어신호 출력부(55)의 제어신호를 입력으로 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값(i_{qr_ref})을 출력하는 회전자측 제어신호 출력부(PI)(56)를 포함한다.

[0102] 도 5에서 각 블록의 입력 및 출력 파라미터를 다음과 같이 정의한다.

[0103] f_{sys} , f_{nom} : 시스템 주파수 및 기준 주파수

[0104] K_p , K_i : 비례 및 적분 제어기의 Gains

[0105] P_{MPPT} : MPPT 제어를 위한 유효 전력 기준 값

[0106] P_{ref} , P_g : 유효 전력 기준 값 및 터미널에서 측정한 유효 전력

[0107] ΔP_p , ΔP_i : 출력 평활화를 위한 비례 및 적분 제어기의 출력

[0108] i_{qr_ref} : 회전자측 제어기의 q축 전류 기준 값

수학식 8

$$P_{ref} = P_{MPPT} + \Delta P_p + \Delta P_i$$

수학식 9

$$P_{MPPT} = k_g \omega_r^3$$

수학식 10

$$\Delta P_p = -K_p \Delta f$$

수학식 11

$$\Delta P_i = -K_i \int \Delta f dt$$

[0113] 이상에서와 같이 ΔP_p 와 ΔP_i 는 Δf 에 각각의 제어 이득(K_p , K_i)을 곱하여 구한다.

[0114] 따라서 풍력발전기의 주파수 조정 성능은 Δf 루프의 제어 이득에 따라 결정된다. K_{p_ofs} 와 K_{p_ufs} 값은 P 제어기에 들어가는 제어 이득이며 I 제어기에 들어가는 제어 이득은 각각의 값에 일정 상수를 곱해서 설정한다.

[0115] I 제어기의 제어 이득은 사용자의 설계 목적에 따라 수정될 수 있지만, 일반적으로는 K_{p_ofs} 와 K_{p_ufs} 보다 값이 작아지는 것에는 상관이 없으며 10 이상의 상수를 곱해주면 제어 이득의 값이 너무 커져 주파수 편차에 매우 민감하게 반응하기 때문에 제어에 문제가 발생할 수 있다.

[0116] 이상에서 설명한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법은 다음과 같이 적용하는 것이 가능하다.

[0117] 도 2의 P 제어기 및 도 5의 PI 제어기에 사용하는 주파수 편차(Δf)에 이용되는 제어 이득을 사용하는 데 있어서 다음과 같이 적용할 수 있다.

[0118] P 제어기에 적용된 경우에는 (1)모든 주파수 구간에서 수학식 7의 제어 이득만 사용, (2)주파수 구간에 따라서 수학식 5와 수학식 7의 과주파수 구간과 저주파수 구간으로 나눈 제어 이득을 모두 사용한다.

[0119] 또한, P 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서, 모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나, 주파수 구간에 따라서, 과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고, 저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것도 가능하다.

[0120] 그리고 PI 제어기에 적용된 경우에는 (3)모든 주파수 구간에서 수학식 7의 제어 이득만 사용, (4)주파수 구간에 따라서 수학식 5와 수학식 7의 과주파수 구간과 저주파수 구간으로 나눈 제어 이득을 모두 사용한다.

- [0121] 또한, PI 제어기에 적용된 경우에서의 제어 이득을 사용하는데 있어서, 모든 주파수 구간에서 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하거나, 주파수 구간에 따라서, 과주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 속도(ω_r)에서는 0이상 값을 갖고, 풍력발전기의 회전자 회전 속도(ω_r)에 비례하여 증가하도록 설정하고, 저주파수 구간에서의 제어 이득을 최저 회전자 회전 속도(ω_r)에서는 0의 값을 가지고 그 이외의 회전자 속도에서는 회전자 속도에 따라 0 보다 큰 값으로 증가하도록 설정하거나, 0 보다 큰 값으로 증가하다가 일정시점에서는 회전자 속도에 관계없이 일정한 이득을 갖도록 설정하는 것도 가능하다.
- [0122] 이상에서 설명한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법의 시뮬레이션 결과를 설명하면 다음과 같다.
- [0123] 도 6은 풍력 발전 단지가 연계된 IEEE 14-모선 시스템 구성도이고, 도 7은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 시뮬레이션에서 사용한 풍속 데이터이다.
- [0124] 도 6은 본 발명의 실시 예를 시뮬레이션하기 위한 풍력발전단지가 연계된 계통을 나타낸 모식도이다. 시뮬레이션은 본 발명에 따른 PI 제어기를 사용하였으며 주파수 구간에 따라서 수학적 5와 수학적 7의 저주파수 구간과 과주파수 구간으로 나눈 제어 이득을 모두 사용하였다.
- [0125] 위 계통은 IEEE 14-bus 모선을 수정하여 만들었으며 9번 모선에 60MW의 이중여자유도발전기(doubly-fed induction generator) 기반 풍력발전단지가 연계되어 있다. 동기발전기는 5대, 부하는 11개가 연계되어 있다. 풍속 변동에 의한 제어의 결과를 확인하기 위해 사용한 풍속 데이터는 도 7에서와 같다.
- [0126] 이와 같은 풍속 변동이 있을 경우 각각의 제어 방안에 대한 결과는 도 8에서와 같다.
- [0127] 도 8은 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템의 시뮬레이션 결과(풍력발전기의 출력, 회전자 속도, 계통 주파수) 그래프이다.
- [0128] 이와 같은 시뮬레이션 결과에서 확인할 수 있듯이 종래 기술과 비교하여 풍력발전기의 출력 변동이 상당히 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 과주파수 구간에서는 더 많은 에너지를 흡수하고 저주파수 구간에서는 더 많은 에너지를 방출하기 때문에 본 발명의 회전자 속도 구간은 종래 기술보다 더 넓은 폭이 됨을 알 수 있고, 이는 풍력발전기의 회전자를 효과적으로 사용할 수 있음을 의미한다.
- [0129] 본 발명은 연속적이고 급격한 풍속 변동에도 불구하고 풍력발전기의 출력을 매우 평활하게 만들 수 있기 때문에 계통 주파수도 기준 값인 60Hz에 더욱 근접한 값으로 유지할 수 있다.
- [0130] 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법은 이중여자 유도 발전기 기반 풍력발전기(Type C) 뿐만 아니라 풀 컨버터(full converter) 기반 풍력발전기(Type D)에도 적용 가능하다.
- [0131] 또한, 풍력발전기를 비롯하여 계통 주파수에 따라 저장된 에너지를 이용하여 출력을 증가 또는 감소시킬 수 있는 모든 컨버터 기반 발전원, 에너지 저장장치, 전기자동차 및 수요 반응 등에도 적용 가능하다.
- [0132] 그리고 부하 변동으로 인한 주파수 변동으로 인해 제어가 필요한 경우에도 제안한 재생에너지 발전기 제어를 적용 가능하다.
- [0133] 이상에서 설명한 본 발명에 따른 주파수 제어를 위한 풍력발전기의 출력 평활화 제어 시스템 및 방법은 전력 계통에 풍력발전기가 연계되었을 경우, 풍력발전기의 회전 질량을 활용하여 풍속 변동에 의한 풍력발전기의 출력을 평활화하여 전력 계통의 주파수 제어(frequency regulation)에 기여할 수 있도록 한 것이다.
- [0134] 본 발명에서는 과주파수 구간에서는 최대 전력점 추종 제어로부터 나오는 출력보다 낮은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 남는 전력은 풍력발전기의 회전 에너지로 흡수된다. 반대로 저주파수 구간에서는 최대출력제어 출력보다 높은 값의 출력을 내고, 이로 인하여 회전자의 운동 에너지가 방출되도록 하여 에너지 저장장치와 같은 역할을 할 수 있다. 별도의 에너지 저장장치를 사용하지 않으므로 출력 평활화를 위해 추가적으로 드는 비용을 줄일 수 있고, 또는 주파수 제어를 위해 동기발전기들이 추가적으로 가져야 하는 1차 예비력 또는 주파수 제어 예비력을 줄여줄 수 있어 전력 계통의 운영 비용 감소를 기대할 수 있다.
- [0135] 이상에서의 설명에서와 같이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 본 발명이 구

현되어 있음을 이해할 수 있을 것이다.

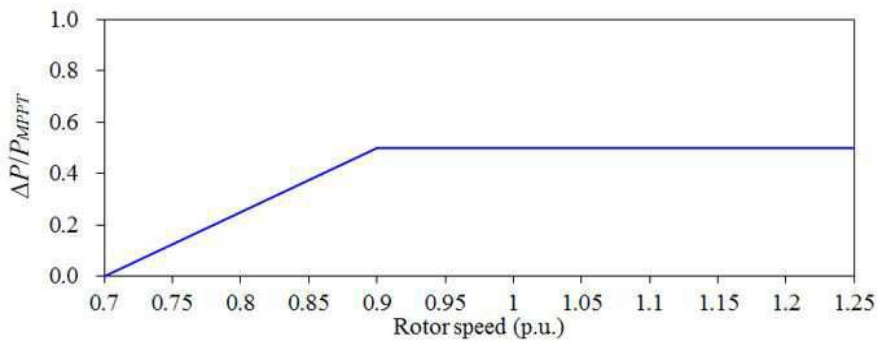
[0136] 그러므로 명시된 실시 예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 하고, 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구 범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

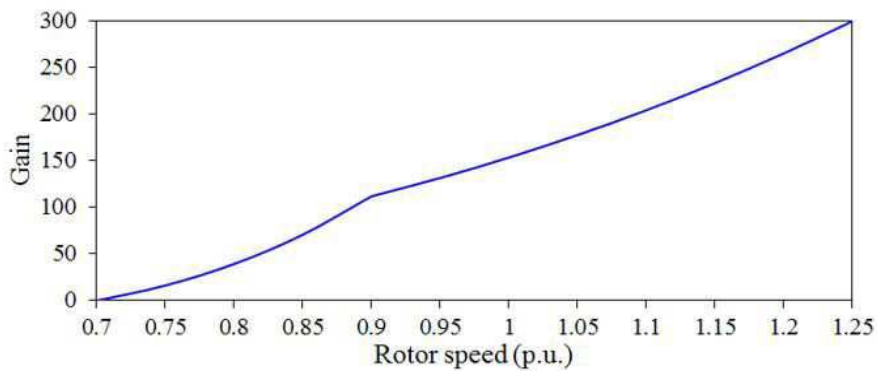
- [0137]
- 20. 주파수 편차 출력부
 - 21. 비례 제어기
 - 22. 유효 전력 기준값 출력부
 - 23. 제어신호 출력부
 - 24. 회전자속 제어신호 출력부

도면

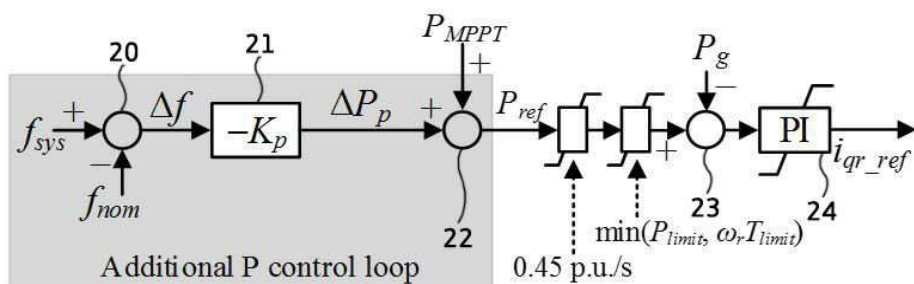
도면1a



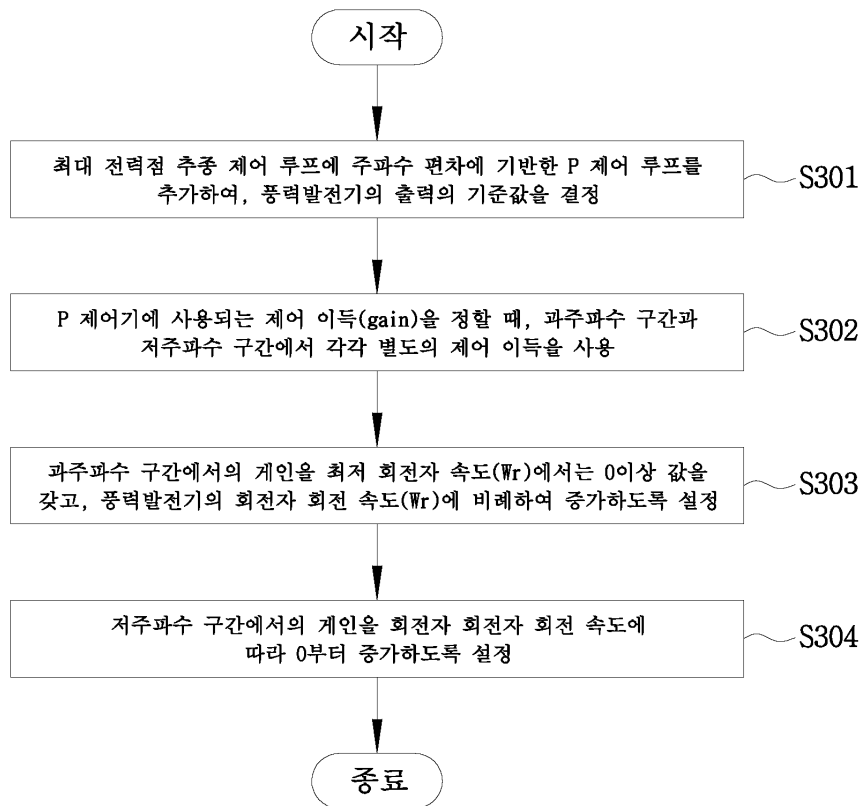
도면1b



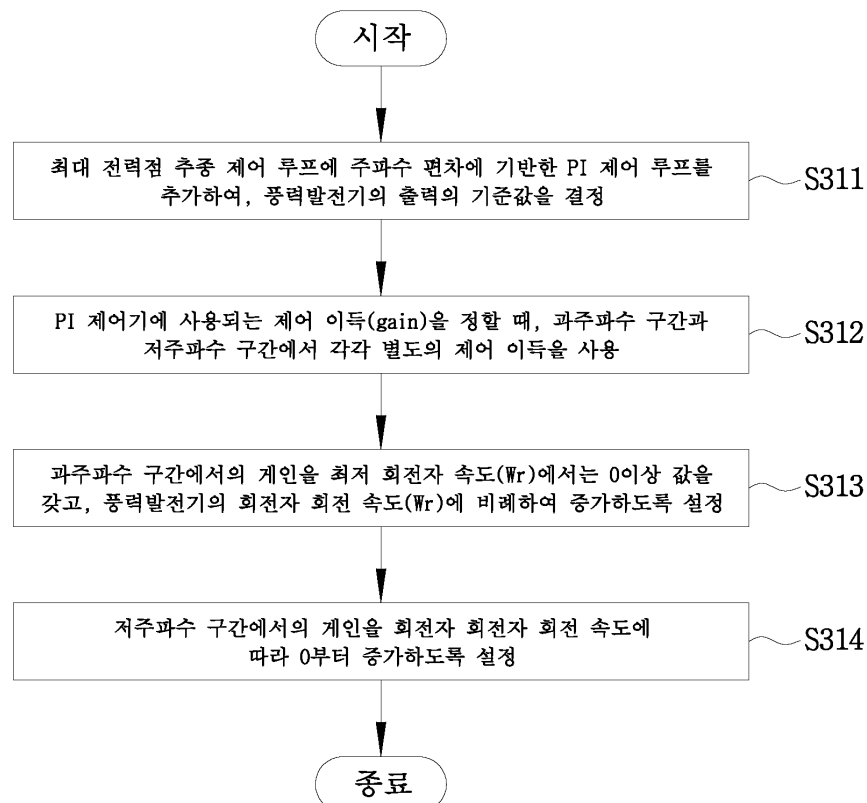
도면2



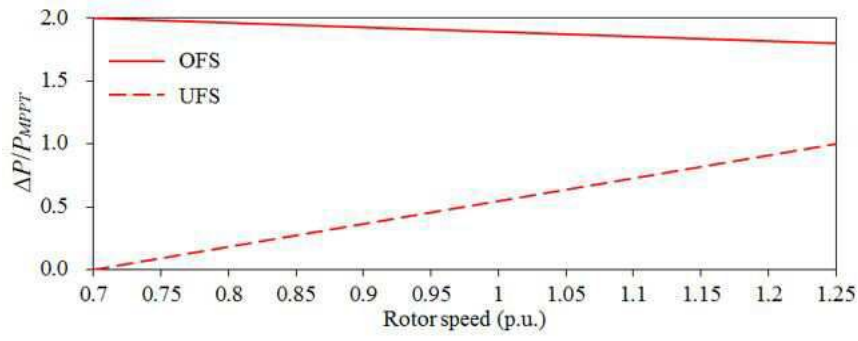
도면3a



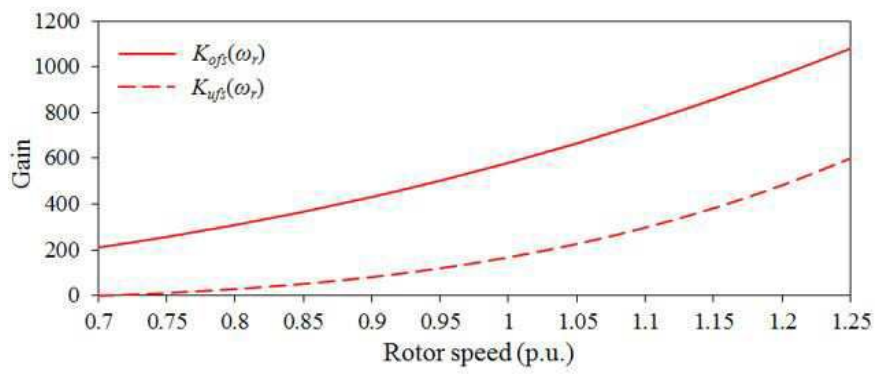
도면3b



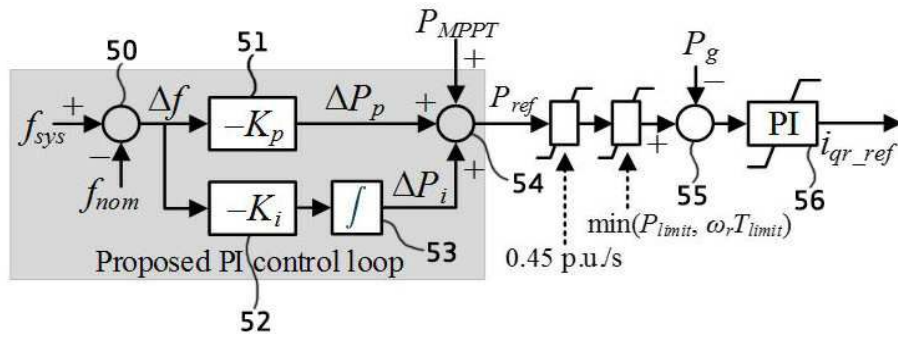
도면4a



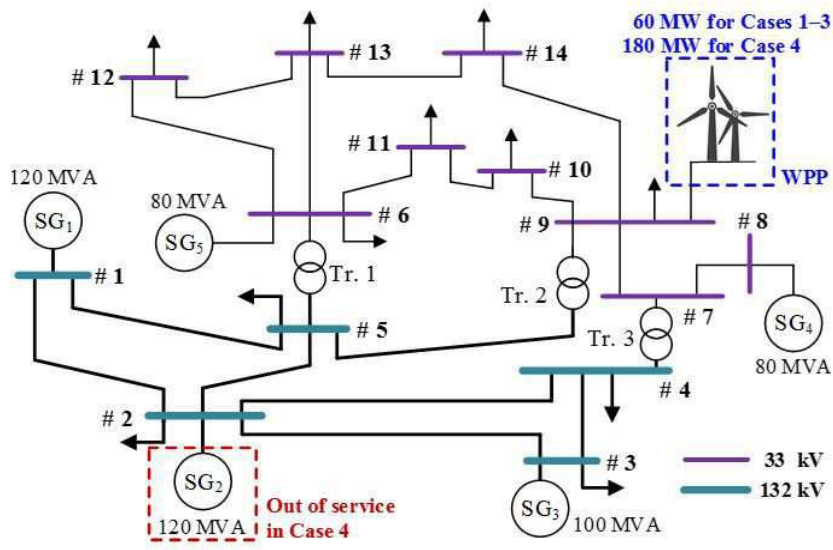
도면4b



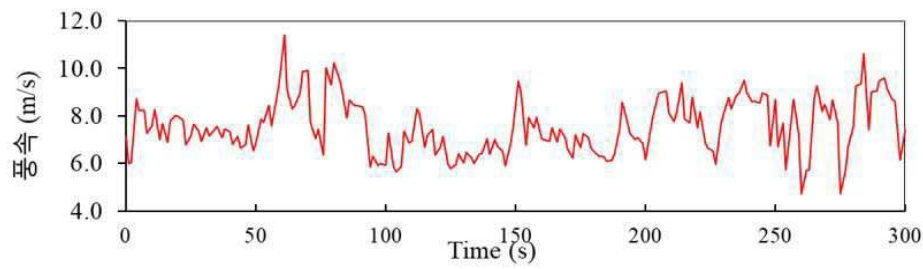
도면5



도면6



도면7



도면8

