



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년03월14일
 (11) 등록번호 10-1716074
 (24) 등록일자 2017년03월07일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
 F03D 7/02 (2006.01) F03D 9/00 (2016.01)
 H02P 9/04 (2006.01)
 (52) CPC특허분류
 F03D 7/028 (2013.01)
 F03D 7/0224 (2013.01)
 (21) 출원번호 10-2016-0013944
 (22) 출원일자 2016년02월04일
 심사청구일자 2016년02월04일
 (56) 선행기술조사문헌
 KR1020110028256 A*
 KR1020120018284 A*
 *는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
 한밭대학교 산학협력단
 XX
 (72) 발명자
 임채욱
 XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
 (74) 대리인
 특허법인 아이퍼스

전체 청구항 수 : 총 6 항

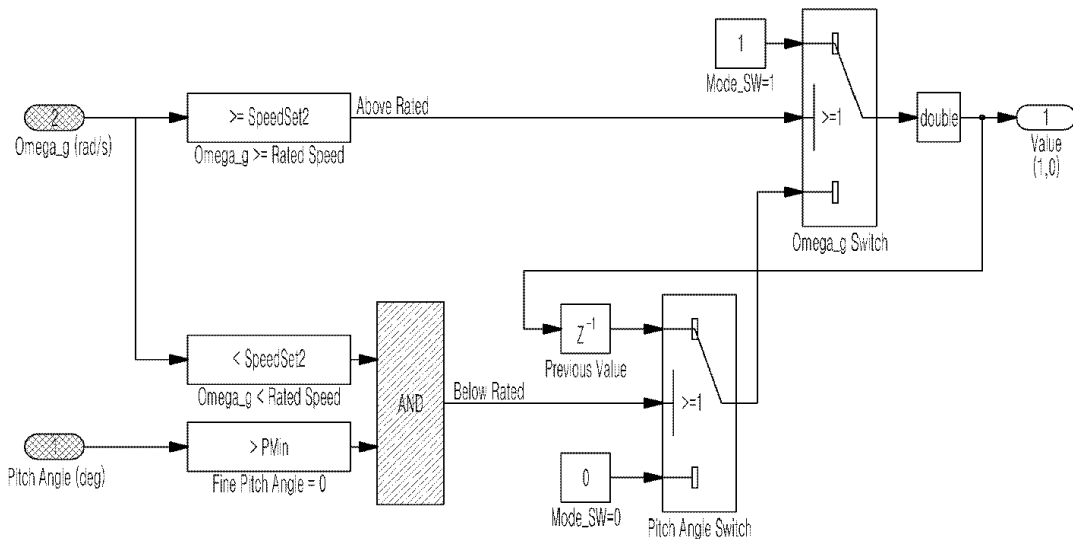
심사관 : 박종오

(54) 발명의 명칭 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법 및 그 시스템

(57) 요약

본 발명은 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법 및 그 시스템에 대한 것이다. 보다 상세하게는, 발전기 회전속도를 실시간으로 측정하는 회전속도 측정부; 블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하는 피치제어기; 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 피치각 제한장치부; 상기 회전속도 측정부에서 (뒷면에 계속)

대표도



측정된 회전속도와 피치제어기와 피치각 제한장치부에서 결정된 피치각을 기준으로, 바람에너지가 정격출력미만 이라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 정격출력이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하는 토크모드스위치; 및 상기 토크모드스위치에서 선택된 모드값이 상기 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 상기 발전기토크를 제어하고, 상기 제2모드값의 경우, 정격출력파워로 일정하게 유지되는 발전기 토크크기로 상기 발전기 토크를 제어하는 토크제어기를 포함하여, 바람에너지가 풍력터빈의 정격출력 부근에서 변동할 때 정격출력 이상에서는 발전기의 정격출력은 유지하고 정격출력 이하에서는 최대출력을 생산하기 위하여 토크모드스 위치를 이용할 때 발생하는 토크채터링이 발생하지 않도록 토크제어기를 안정적으로 작동시킬 수 있는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 시스템에 관한 것이다.

(52) CPC특허분류

F03D 9/25 (2016.05)

H02P 9/04 (2013.01)

F05B 2270/327 (2013.01)

Y02E 10/70 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2015R1D1A3A01019361

부처명 교육부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 지역대학우수과학자지원사업

연구과제명 MW급 대형 풍력터빈의 센서리스 개별피치제어기 개발

기여율 1/1

주관기관 한밭대학교 산학협력단

연구기간 2015.06.01 ~ 2018.05.31

명세서

청구범위

청구항 1

발전기 회전속도를 실시간으로 측정하는 회전속도 측정부;

블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하는 피치제어기;

피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 피치각 제한장치부;

상기 회전속도 측정부에서 측정된 회전속도와 피치제어기와 피치각 제한장치부에서 결정된 피치각을 기준으로, 바람에너지가 정격출력미만이라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 정격출력이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하는 토크모드스위치; 및

상기 토크모드스위치에서 선택된 모드값이 상기 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 발전기 토크크기를 제어하고, 상기 제2모드값의 경우, 정격출력파위로 일정하게 유지되는 발전기 토크크기로 상기 발전기 토크를 제어하는 토크제어기를 포함하고,

상기 제2모드값이 선택된 경우 발전기를 제어하게 되는 발전기 토크크기는 이하의 수학적 식 3으로 정의되며,

상기 토크모드스위치는, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우 상기 제2모드값을 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 상기 제2모드값을 선택하며, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우, 이전 선택된 모드값을 그대로 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 제1모드값을 선택하는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 시스템:

[수학적 식 3]

$$T_g(t) = \frac{P_{grat}}{\Omega_g(t)}$$

수학적 식 3에서, P_{grat} 는 정격출력파위이고, Ω_g 는 발전기 회전속도이다.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 기 연산된 회전속도에 따른 토크값은 이하의 수학적 식 1과 수학적 식 2에 의해 연산되는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 시스템:

[수학적 식 1]

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t)$$

[수학적 식 2]

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5}{2 \lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} C_{P,max}$$

수학적 식 1에서 Ω_g 는 발전기 회전속도, $T_g(t)$ 는 제1모드값에서 제어되는 발전기 토크, K_{opt} 는 최적모드계인이고,

수학적 식 2에서 $C_{P,max}$ 는 최대출력계수, λ_{opt} 는 최적주속비, R 은 블레이드 길이, ρ 은 공기밀도, N_{gb} 는 기어비이다.

청구항 3

삭제

청구항 4

삭제

청구항 5

제 1항에 있어서,

상기 회전속도가 정격회전속도 이하인 경우 피치각을 파인피치각으로 유지하고, 피치제어기는 회전속도가 정격회전속도를 초과하는 경우 상기 회전속도와 상기 정격회전속도의 오차를 기반으로 상기 피치 명령각을 연산하고, 상기 피치각 제한장치부는 기설정된 최소피치각과 최대피치각 사이로 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 시스템.

청구항 6

정격출력파워와, 정격회전속도와, 파인피치각을 설정하는 단계;

회전속도 측정부가 발전기 회전속도를 실시간으로 측정하고, 피치제어기가 블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하고, 피치각 제한장치부가 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 단계;

토크모드스위치가 상기 회전속도 측정부에서 측정된 회전속도와 상기 피치제어기와 상기 피치각 제한장치부에서 결정된 피치각을 기준으로, 모드값을 선택하는 단계; 및

토크제어기가 상기 토크모드스위치에서 선택된 모드값에 따라 발전기의 토크를 제어하는 단계;를 포함하고,

상기 선택하는 단계에서, 상기 토크모드스위치는 상기 회전속도와 상기 피치각을 기준으로 바람에너지가 정격출력이하라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 정격출력이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하며,

상기 제어하는 단계에서, 상기 토크제어기는, 상기 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 상기 발전기 토크크기를 제어하고, 상기 제2모드값의 경우, 정격출력파워로 일정하게 유지되는 발전기 토크크기로 상기 발전기 토크를 제어하며,

상기 제2모드값이 선택된 경우 발전기를 제어하게 되는 발전기 토크크기는 이하의 수학식 3으로 정의되고,

상기 선택하는 단계에서, 상기 토크모드스위치는, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우 상기 제2모드값을 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 상기 제2모드값을 선택하며, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우, 이전 선택된 모드값을 그대로 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 제1모드값을 선택하는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 방법:

[수학식 3]

$$T_g(t) = \frac{P_{grat}}{\Omega_g(t)}$$

수학식 3에서, P_{grat} 는 정격출력파워이고, Ω_g 는 발전기 회전속도이다.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 기 연산된 회전속도에 따른 토크값은 이하의 수학식 1과 수학식 2에 의해 연산되는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 방법:

[수학식 1]

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t)$$

[수학식 2]

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5}{2 \lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} C_{P,max}$$

Ω_g 는 발전기 회전속도, $T_g(t)$ 는 제1모드값에서 제어되는 발전기 토크, K_{opt} 는 최적모드게인, $C_{P,max}$ 는 최대출력계수, λ_{opt} 는 최적주속비, R 은 블레이드 길이, ρ 은 공기밀도, N_{gb} 는 기어비이다.

청구항 8

삭제

청구항 9

삭제

청구항 10

제 6항에 있어서,

상기 회전속도가 정격회전속도 이하인 경우 피치각을 파인피치각으로 유지하고, 피치제어기는 회전속도가 정격회전속도를 초과하는 경우 상기 회전속도와 상기 정격회전속도의 오차를 기반으로 상기 피치 명령각을 연산하고, 상기 피치각 제한장치부는 기설정된 최소피치각과 최대피치각 사이로 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법 및 그 시스템에 대한 것이다. 보다 상세하게는, 토크 제어와 피치제어를 이용한 풍력터빈의 출력제어 방법으로서, 풍력터빈에서 정격출력 이하인 경우와 정격출력 이상인 경우에 따라서 최대의 출력과 생산과 정격출력과유를 유지하기 위하여 발전기의 토크크기를 변화시키는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 풍력터빈은 바람이 가진 운동에너지를 블레이드 회전을 통하여 기계적인 에너지로 변화시키고 기계적인 에너지를 발전기를 이용하여 전기에너지로 변환시키는 기계이다.

[0003] 풍력터빈의 출력제어 방법은 개념적으로 발전기의 회전속도를 제어하는 토크제어와 피치각을 제어하는 피치제어 두 가지 방법으로 구분할 수 있다. 정격풍속 이하의 영역에서는 토크제어를 수행하고 정격풍속 이상의 영역에서는 피치제어를 수행한다.

[0004] 토크제어기는 정격풍속 이하의 영역에서 최대출력을 얻기 위하여 발전기의 토크크기를 제어하게 되고, 피치제어기에서는 정격풍속 이상의 영역에서 정격출력이 유지되도록 피치각을 조절하게 된다.

[0005] 풍력터빈의 토크제어기는 정격출력 이상인 경우 두 가지 제어로직을 가지고 있다. 그 중 하나는 발전기의 토크크기를 일정하게 정격토크크기로 유지하도록 하는 방법이고, 또 다른 하나는 발전기의 출력과유를 정격출력과유로 일정하게 유지하도록 하는 방법이다.

[0006] 이와 같은 풍력터빈의 토크제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항은 바람이 정격 이하로 불 때와 정격이상으로 불 때 발전기의 토크크기를 다르게 사용해야 한다. 따라서 정격풍속 이하에서는 최대의 출력과유를 생산하고 정격풍속 이상에서는 정격출력과유를 생산하기 위하여 발전기의 토크크기를 변화시키기 위한 토크모드스위치를 적절하게 제어하는 방법이 필요하다.

[0007] 일반적인 풍력터빈의 토크모드스위치 제어방법에서는 발전기 회전속도와 블레이드 피치각 두 가지 정보를 고려한다. 발전기의 회전속도는 정격회전속도 이상이고 피치각이 파인피치각(Fine Pitch Angle)보다 크면, 정격풍속 이상인 경우라고 판단하여 토크모드스위치를 이용하여 정격출력과유를 유지하도록 발전기의 토크크기를 조절한다.

다.

- [0008] 같은 이치로 발전기의 회전속도는 정격회전속도보다 작고 피치각이 파인피치각(Fine Pitch Angle)이면, 정격풍속 이하인 경우라고 판단하고 토크모드스위치를 이용하여 미리 연산된 순람표(lookup table)를 따라서 발전기 토크를 조절한다.
- [0009] 이러한 방법을 통하여 토크모드스위치를 이용하지 않은 경우보다 더 좋은 출력파워를 얻을 수 있다. 하지만 토크모드스위치를 이용할 경우 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 떨어질 때 토크모드스위치를 사용함으로 인해 토크채터링이 발생하는 문제점이 있다. 즉, 최적의 출력파워를 생산함에 있어서 기존 풍력터빈의 토크모드스위치를 적용하면 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 떨어질 때 토크채터링이 발생하게 되고, 이러한 토크채터링이 발생하기 때문에 출력제어기 자체의 안정성 문제와 발전기 토크크기의 급격한 변화 및 출력파워의 급격한 변화로 풍력터빈의 실제 수명과 출력파워 생산이 감소할 가능성이 있다.
- [0010] 따라서, 최적의 출력파워를 생산함에 있어서 이러한 토크채터링 문제점을 극복할 수 있는 보완된 토크모드스위치 제어방법이 요구되었다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0011] (특허문헌 0001) 한국등록특허 제1251285호
- (특허문헌 0002) 한국공개특허 제2012-0130892호
- (특허문헌 0003) 한국등록특허 제1264169호
- (특허문헌 0004) 한국등록특허 제1282540호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0012] 따라서 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 해결하기 위하여 안출된 것으로서, 본 발명의 일실시예에 따르면, 바람에너지가 풍력터빈의 정격출력 부근에서 변동할 때 정격출력 이상에서는 발전기의 정격출력은 유지하고 정격출력 이하에서는 최대출력을 생산하기 위하여 토크모드스위치를 이용할 때 발생하는 토크채터링이 발생하지 않도록 토크제어기를 안정적으로 작동시킬 수 있는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법 및 그 시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0013] 또한, 본 발명의 일실시예 따르면, 발전기 회전속도와 블레이드 피치각의 두 가지 정보를 다 고려하고, 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 변하는 경우에는 토크모드스위치의 값을 “이전 값”으로 사용한다. 본 발명을 통하여 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 토크모드스위치를 이용할 때 발생하는 토크채터링을 방지할 수 있는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법 및 그 시스템을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0014] 한편, 본 발명에서 이루고자 하는 기술적 과제들은 이상에서 언급한 기술적 과제들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 기술적 과제들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0015] 본 발명의 제1목적은, 발전기 회전속도를 실시간으로 측정하는 회전속도 측정부; 블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하는 피치제어기; 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 피치각 제한장치부; 상기 회전속도 측정부에서 측정된 회전속도와 피치제어기와 피치각 제한장치부에서 결정된 피치각을 기준으로, 바람에너지가 정격출력미만이라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 정격출력이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하는 토크모드스위치; 및 상기 토크모드스위치에서 선택된 모드값이 상기 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 상기 발전기의 토크크기를 제어하고, 상기 제2모드값의 경우, 정격출력 파워로 일정하게 유지되는 발전기 토크크기로 상기 발전기 토크를 제어하는 토크제어기를 포함하는 것을 특징으

로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 시스템으로서 달성될 수 있다.

[0016] 또한, 상기 기 연산된 회전속도에 따른 토크값은 이하의 수학적 식 1과 수학적 식 2에 의해 연산되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0017] [수학적 식 1]

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t)$$

[0019] [수학적 식 2]

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5}{2 \lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} C_{P,max}$$

[0021] 수학적 식 1에서 Ω_g 는 발전기 회전속도, $T_g(t)$ 는 제1모드값에서 제어되는 발전기 토크, K_{opt} 는 최적모드계인이고, 수학적 식 2에서 $C_{P,max}$ 는 최대출력계수, λ_{opt} 는 최적주속비, R 은 블레이드 길이, ρ 은 공기밀도, N_{gb} 는 기어비이다.

[0022] 그리고, 상기 제2모드값이 선택된 경우 정격출력파워를 유지하도록 발전기를 제어하게 되는 발전기 토크크기는 이하의 수학적 식 3으로 정의되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0023] [수학적 식 3]

$$T_g(t) = \frac{P_{grat}}{\Omega_g(t)}$$

[0024] 수학적 식 3에서, P_{grat} 는 정격출력파워이고, Ω_g 는 발전기 회전속도이다.

[0025] 그리고, 상기 토크모드스위치는, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우 상기 제2모드값을 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 상기 제2모드값을 선택하며, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우, 이전 선택된 모드값을 그대로 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 제1모드값을 선택하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0026] 또한, 상기 회전속도가 정격회전속도 이하인 경우 피치각을 파인피치각으로 유지하고, 피치제어기는 회전속도가 정격회전속도를 초과하는 경우 상기 회전속도와 상기 정격회전속도의 오차를 기반으로 상기 피치 명령각을 연산하고, 상기 피치각 제한장치부는 기설정된 최소피치각과 최대피치각 사이로 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0027] 본 발명의 제2목적은, 정격출력파워와, 정격회전속도와, 파인피치각을 설정하는 단계; 회전속도 측정부가 발전기 회전속도를 실시간으로 측정하고, 피치제어기가 블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하고, 피치각 제한장치부가 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 단계; 토크모드스위치가 상기 회전속도 측정부에서 측정된 회전속도와 피치제어기와 피치각 제한장치부에서 결정된 피치각을 기준으로, 모드값을 선택하는 단계; 및 토크제어기가 상기 토크모드스위치에서 선택된 모드값에 따라 발전기의 토크를 제어하는 단계;를 포함하고, 상기 선택하는 단계에서, 상기 토크모드스위치는 상기 회전속도와 상기 피치각을 기준으로 바람에너지가 정격출력이하라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 정격출력이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하며, 상기 제어하는 단계에서, 상기 토크제어기는, 상기 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 상기 발전기의 토크크기를 제어하고, 상기 제2모드값의 경우, 정격출력파워로 일정하게 유지되는 발전기 토크크기로 상기 발전기 토크를 제어하는 것을 특징으로 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어 방법으로서 달성될 수 있다.

[0028] 그리고, 본 발명의 제2목적에 따르면, 상기 기 연산된 회전속도에 따른 토크값은 이하의 수학적 식 1과 수학적 식 2에 의해 연산되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0029] [수학적 식 1]

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t)$$

[0030]

[0031] [수학식 2]

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5}{2 \lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} C_{P,max}$$

[0032]

[0033] Ω_g 는 발전기 회전속도, $T_g(t)$ 는 제1모드값에서 제어되는 발전기 토크, K_{opt} 는 최적모드게인, $C_{P,max}$ 는 최대출력계수, λ_{opt} 는 최적주속비, R 은 블레이드 길이, ρ 은 공기밀도, N_{gb} 는 기어비이다.

[0034] 그리고, 본 발명의 제2목적에 따르면, 상기 제2모드값이 선택된 경우 정격출력파워를 유지하도록 발전기를 제어하게 되는 발전기 토크크기는 이하의 수학식 3으로 정의되는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0035] [수학식 3]

$$T_g(t) = \frac{P_{grat}}{\Omega_g(t)}$$

[0036] 수학식 3에서, P_{grat} 는 정격출력파워이고, Ω_g 는 발전기 회전속도이다.

[0037] 그리고, 본 발명의 제2목적에 따르면, 상기 선택하는 단계에서, 상기 토크모드스위치는, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우 상기 제2모드값을 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 이상이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 상기 제2모드값을 선택하며, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각을 초과하는 경우, 이전 선택된 모드값을 그대로 선택하고, 상기 회전속도가 정격회전속도 미만이고, 상기 피치각이 파인피치각 이하인 경우 제1모드값을 선택하는 것을 특징으로 할 수 있다.

[0038] 그리고, 본 발명의 제2목적에 따르면, 상기 회전속도가 정격회전속도 이하인 경우 피치각을 파인피치각으로 유지하고, 피치제어기는 회전속도가 정격회전속도를 초과하는 경우 상기 회전속도와 상기 정격회전속도의 오차를 기반으로 상기 피치 명령각을 연산하고, 상기 피치각 제한장치부는 기설정된 최소피치각과 최대피치각 사이로 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정하는 것을 특징으로 할 수 있다.

발명의 효과

[0039] 본 발명의 일실시예에 따르면, 바람에너지가 풍력터빈의 정격출력 부근에서 변동할 때 정격출력 이상에서는 발전기의 정격출력은 유지하고 정격출력 이하에서는 최대출력을 생산하기 위하여 토크모드스위치를 이용할 때 발생하는 토크채터링이 발생하지 않도록 토크제어기를 안정적으로 작동시킬 수 있는 효과를 갖는다.

[0040] 또한, 본 발명의 일실시예에 따르면, 발전기 회전속도와 블레이드 피치각의 두 가지 정보를 다 고려하고, 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 변하는 경우에는 토크모드스위치의 값을 “이전 값”으로 사용한다. 본 발명을 통하여 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 토크모드스위치를 이용할 때 발생하는 토크채터링을 방지할 수 있는 효과를 갖는다.

[0041] 한편, 본 발명에서 얻을 수 있는 효과는 이상에서 언급한 효과들로 제한되지 않으며, 언급하지 않은 또 다른 효과들은 아래의 기재로부터 본 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0042] 본 명세서에 첨부되는 다음의 도면들은 본 발명의 바람직한 실시예를 예시하는 것이며, 발명의 상세한 설명과 함께 본 발명의 기술적 사상을 더욱 이해시키는 역할을 하는 것이므로, 본 발명은 그러한 도면에 기재된 사항에만 한정되어 해석 되어서는 아니 된다.

- 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어시스템의 구성을 나타낸 블록도,
- 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법의 흐름도,
- 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 발전기 회전속도에 대한 발전기 토크 그래프,
- 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 피치제어기의 블록선도,
- 도 5는 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치와 토크제어방법을 나타낸 블록도,

- 도 6은 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치의 블록도,
- 도 7은 계단풍속을 나타낸 시간에 대한 풍속 그래프,
- 도 8은 본 발명의 제1실시예에 따른 계단 응답그래프,
- 도 9는 본 발명의 제1실시예에 따른 토크채터링 분석 그래프,
- 도 10은 시간에 따른 피치각 응답 그래프,
- 도 11은 본 발명의 제2실시예에 따른 계단 응답그래프,
- 도 12는 본 발명의 제2실시예에 따른 토크채터링 분석 그래프,
- 도 13은 제1실시예와 제2실시예의 계단응답 비교 그래프,
- 도 14는 본 발명의 제2실시예에 따른 토크모드스위치의 블록도,
- 도 15는 시간에 따른 난류풍속 그래프,
- 도 16은 도 15에서 정격풍속 이하인 것을 표시한 그래프,
- 도 17은 본 발명의 제1실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(1) 그래프,
- 도 18은 본 발명의 제1실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(2) 그래프,
- 도 19는 본 발명의 제1실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(3) 그래프,
- 도 20은 본 발명의 제2실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(1) 그래프,
- 도 21은 본 발명의 제2실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(2) 그래프,
- 도 22는 본 발명의 제2실시예에 따른 난류풍속 수치실험 결과(3) 그래프를 도시한 것이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0043] 이상의 본 발명의 목적들, 다른 목적들, 특징들 및 이점들은 첨부된 도면과 관련된 이하의 바람직한 실시예들을 통해서 쉽게 이해될 것이다. 그러나 본 발명은 여기서 설명되는 실시예들에 한정되지 않고 다른 형태로 구체화될 수도 있다. 오히려, 여기서 소개되는 실시예들은 개시된 내용이 철저하고 완전해질 수 있도록 그리고 통상의 기술자에게 본 발명의 사상이 충분히 전달될 수 있도록 하기 위해 제공되는 것이다.
- [0044] 본 명세서에서, 어떤 구성요소가 다른 구성요소 상에 있다고 언급되는 경우에 그것은 다른 구성요소 상에 직접 형성될 수 있거나 또는 그들 사이에 제 3의 구성요소가 개재될 수도 있다는 것을 의미한다. 또한 도면들에 있어서, 구성요소들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다.
- [0045] 본 명세서에서 기술하는 실시예들은 본 발명의 이상적인 예시도인 단면도 및/또는 평면도들을 참고하여 설명될 것이다. 도면들에 있어서, 막 및 영역들의 두께는 기술적 내용의 효과적인 설명을 위해 과장된 것이다. 따라서 제조 기술 및/또는 허용 오차 등에 의해 예시도의 형태가 변형될 수 있다. 따라서 본 발명의 실시예들은 도시된 특정 형태로 제한되는 것이 아니라 제조 공정에 따라 생성되는 형태의 변화도 포함하는 것이다. 예를 들면, 직각으로 도시된 영역은 라운드지거나 소정 곡률을 가지는 형태일 수 있다. 따라서 도면에서 예시된 영역들은 속성을 가지며, 도면에서 예시된 영역들의 모양은 소자의 영역의 특정 형태를 예시하기 위한 것이며 발명의 범주를 제한하기 위한 것이 아니다. 본 명세서의 다양한 실시예들에서 제1, 제2 등의 용어가 다양한 구성요소들을 기술하기 위해서 사용되었지만, 이들 구성요소들이 이 같은 용어들에 의해서 한정되어서는 안 된다. 이들 용어들은 단지 어느 구성요소를 다른 구성요소와 구별시키기 위해서 사용되었을 뿐이다. 여기에 설명되고 예시되는 실시예들은 그것의 상보적인 실시예들도 포함한다.
- [0046] 본 명세서에서 사용된 용어는 실시예들을 설명하기 위한 것이며 본 발명을 제한하고자 하는 것은 아니다. 본 명세서에서, 단수형은 문구에서 특별히 언급하지 않는 한 복수형도 포함한다. 명세서에서 사용되는 '포함한다(comprises)' 및/또는 '포함하는(comprising)'은 언급된 구성요소는 하나 이상의 다른 구성요소의 존재 또는 추가를 배제하지 않는다.
- [0047] 아래의 특정 실시예들을 기술하는데 있어서, 여러 가지의 특정적인 내용들은 발명을 더 구체적으로 설명하고 이해를 돕기 위해 작성되었다. 하지만 본 발명을 이해할 수 있을 정도로 이 분야의 지식을 갖고 있는 독자는 이를

한 여러 가지의 특징적인 내용들이 없어도 사용될 수 있다는 것을 인지할 수 있다. 어떤 경우에는, 발명을 기술하는 데 있어서 흔히 알려졌으면서 발명과 크게 관련 없는 부분들은 본 발명을 설명하는데 있어 별 이유 없이 혼돈이 오는 것을 막기 위해 기술하지 않음을 미리 언급해 둔다.

[0049] <구성>

[0050] 이하에서는 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어시스템의 구성 및 기능에 대해 설명하도록 한다. 먼저, 도 1은 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어시스템의 구성을 나타낸 블록도를 도시한 것이고, 도 2는 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어방법의 흐름도를 도시한 것이다.

[0051] 도 1에 도시된 바와 같이, 본 발명의 일실시예에 따른 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력제어시스템은, 회전속도 측정부(10), 피치각 제한장치부(20), 토크모드스위치(30), 토크제어기(40), 피치제어기(50) 등을 포함하여 구성될 수 있음을 알 수 있다.

[0052] 도 3은 본 발명의 일실시예에 따른 발전기 회전속도에 대한 발전기 토크 그래프를 도시한 것이다.

[0053] 풍력터빈의 토크제어기(40)는 정격출력 이상인 경우와 이하인 경우 두 가지로 나눌 수 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, “토크모드 1”은 정격출력 이하인 경우와, “토크모드 2”는 정격출력 이상인 경우로 구분된다. 후에 설명되는 바와 같이, 토크모드스위치(30)에 의해 제1모드값이 선택될 때, 토크제어기(40)는 토크모드 1로, 제2모드값이 선택될 때, 토크모드 2로 발전기토크를 제어하게 된다.

[0054] 도 3에 도시된 바와 같이, “SpeedSet1”은 발전기 토크크기의 제어가 시작되는 발전기 회전속도이다. “SpeedSet2”는 발전기의 정격출력파워를 유지하기 시작할 때의 발전기 회전속도로써 일반적으로 발전기의 정격 회전속도이다.

[0055] 정격출력 이하에서의 토크제어기(40)는 풍속의 크기에 따라 최적 주속비(λ_{opt})를 얻기 위하여 토크-속도의 정상 상태 관계특성을 나타내는 이하의 수학적 식 1을 이용하여 발전기의 토크(T_g)를 발전기의 회전속도(Ω_g)의 제곱에 비례하도록 제어하는 것으로 비선형 제어방법이다. 정격출력 이하에서의 토크제어기(40)는 도 3에 도시된 “토크모드 1”에서 표시한 것과 같이 기 연산된 순람표(lookup table)를 사용하여 발전기 토크를 발생시킨다.

[0056] [수학적 식 1]

$$T_g(t) = K_{opt} \Omega_g^2(t)$$

[0058] K_{opt} 는 최적모드계인으로 발전기의 토크와 발전기의 회전속도 사이의 이차특성을 나타내는 계수값으로 이하의 수학적 식 2와 같이 정의된다.

[0059] [수학적 식 2]

$$K_{opt} = \frac{\rho \pi R^5}{2 \lambda_{opt}^3 N_{gb}^3} C_{P, \max}$$

[0061] 여기서, $C_{P, \max}$ 는 최대출력계수, λ_{opt} 는 최적주속비, R은 블레이드 길이, ρ 은 공기밀도, N_{gb} 는 기어비이다.

[0062] 또한, 풍력터빈의 토크제어기(40)는 정격출력 이상인 경우 두 가지 제어모드를 가지고 있다. 하나는 발전기의 토크크기를 정격토크크기로 일정하게 유지하도록 하는 방법이고, 또 하나는 발전기의 출력파워를 정격출력파워로 일정하게 유지하도록 하는 방법이다. 본 발명의 일실시예에서는 도 3에서 “토크 모드 2”로 표시된 것과 같이 발전기의 출력파워를 정격출력파워로 일정하게 유지하는 제어방법을 사용한다. 발전기의 출력파워를 정격출력파워로 일정하게 유지하도록 하는 계산식은 이하의 수학적 식 3과 같다. 수학적 식 3과 같이 발전기의 정격출력파워와 발전기의 회전속도는 반비례관계를 가지게 된다.

[0063] [수학적 식 3]

$$T_g(t) = \frac{P_{g, \text{rat}}}{\Omega_g(t)}$$

[0064]

- [0065] 여기서 $P_{g,ref}$ 는 발전기의 정격출력파워이다.
- [0066] 본 발명의 일실시예에 따른 하는 정격출력 유지를 위한 풍력터빈의 출력 제어방법은 전체적으로 먼저, 정격출력 파워와, 정격회전속도와, 파인피치각을 설정하게 된다(S10).
- [0067] 그리고, 회전속도 측정부(10)가 발전기 회전속도를 실시간으로 측정하고, 피치제어기(50)가 블레이드의 피치 명령각을 실시간으로 계산하고, 피치각 제한장치부(20)가 피치 명령각을 제한하여 실제 블레이드의 피치각을 결정한다(S20). 그리고, 토크모드스위치(30)는 회전속도 측정부(10)에서 측정된 회전속도와 피치제어기(50)와 피치각 제한장치부(20)에서 결정된 피치각을 기준으로, 모드값을 선택하게 된다.
- [0068] 그리고, 토크제어기(40)는 토크모드스위치(30)에서 선택된 모드값에 따라 발전기의 토크를 제어하게 된다.
- [0069] 토크모드스위치(30)는 회전속도와 피치각을 기준으로 바람에너지가 정격출력이하라고 판단되면 제1모드값을 선택하고, 바람에너지가 정격출력 이상이라고 판단되면 제2모드값을 선택하게 된다.
- [0070] 그리고, 토크제어기(40)는 앞서 언급한 바와 같이, 제1모드값의 경우, 기 연산된 회전속도에 따른 토크값으로 발전기토크를 제어하고, 제2모드값의 경우, 정격출력파워가 유지되도록 발전기 토크를 제어하게 된다.
- [0071] 또한, 본 발명의 일실시예에 따른 제어시스템은 피치제어기(50)를 더 포함할 수 있다. 풍력터빈의 토크모드스위치(30)에서는 발전기의 회전속도만 고려하는 것이 아니라 블레이드의 피치각도 고려한다.
- [0072] 정격이하의 풍속에서 블레이드의 피치각은 최대의 출력파워를 생산하기 위하여 최적의 일정한 값인 파인피치각(Fine Pitch Angle)으로 유지한다. 일반적으로 파인피치각은 “0도”가 대표적이다.
- [0073] 여기서는 파인피치각은 “0도”로 두고 설정한다. 평균풍속이 정격이상인 경우에도 실제 풍속은 난류풍속이어서 발전기의 회전속도는 정격속도를 중심으로 변화하기 때문에 정격속도보다 작은 경우가 발생한다. 이런 상황에서도 출력파워를 향상하기 위하여 회전속도는 정격속도보다 작고 피치각은 파인피치보다 크면 토크모드스위치(30)를 이용하여 계속 정격출력파워를 유지한다. 이를 통해 더 많은 정격파워를 유지할 수 있게 된다.
- [0074] 풍력터빈의 출력제어에 있어서 바람에너지가 정격출력 이상에서는 피치제어기(50)가 작동한다. 풍력터빈의 피치제어기(50)는 일반적으로 속도제어 루프 형태의 PI 제어기와 피치 게인-스케줄링을 사용하며, 피치제어기(50)는 발전기의 회전속도를 피드백하여 기준입력인 발전기 정격회전속도(SpeedSet2)와의 오차를 PI 제어를 통해 정격 풍속이상에서 블레이드의 피치각을 조절하는 방법이다.
- [0075] 피치 게인-스케줄링의 개념은 풍속이 증가할수록 피치각에 대한 공력토크의 비선형 파라미터의 절대값이 커져서 피치제어기(50)의 고유진동수를 증가시키기 때문에, 고정된 PI 게인값을 사용하는 것이 아니라 풍속이 증가할수록 작은 PI 게인값을 사용하기 위해 게인제수를 이용하여 PI 게인값을 줄여주는 방법이다.
- [0076] 도 4는 본 발명의 일실시예에 따른 피치제어기(50)의 블록선도를 도시한 것이다. 실제 전 풍속구간에서 피치제어기(50)의 시스템 형태는 도 4와 같은 블록선도로 표시된다. 도 4에 도시된 바와 같이, e_{Ω_g} 는 피드백 되는 발전기 회전속도(Ω_g)와 기준입력인 발전기 정격 회전속도(Ω_{ref})와의 오차이다.
- [0077] 피치제어기(50)는 발전기 회전속도(Ω_g)를 피드백하여 기준입력인 발전기 정격 회전속도(Ω_{ref})와의 오차 (e_{Ω_g})를 최소화하도록 피치 명령각(β_c)을 조절한다. 실제적으로 피치각(β)은 피치각 제한장치를 통하여 이하의 수학식 4와 같이 피치각의 최소값과 최대값 사이로 제한한다.
- [0078] [수학식 4]
- [0079] $\beta_{min} \leq \beta \leq \beta_{max}$
- [0080] β_{min} 는 피치각의 최소값이고, 일반적으로 파인피치각(β_{fine}) 값을 이용한다. 여기서 파인피치각(β_{fine}) 값은 “0도”이다. 바람에너지가 정격출력 이하에서 최대의 출력파워를 생산하기 위하여 파인피치각(β_{fine})으로 제한된다. 피치각의 최대값(β_{max})은 피치각의 최대값이고, 풍력터빈에 따라 임의로 설정할 수 있다.
- [0082] <토크모드스위치 제어방법>

[0083] 이하에서는 앞서 언급한 토크모드스위치(30)의 제어방법에 대해 설명하도록 한다. 즉, 어떠한 경우에 제1모드값(이하 '0') 또는 제2모드값(이하 '1')을 선택하게 되는지 설명하도록 한다.

[0084] 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치 제어방법은, 발전기의 회전속도와 피치각에 따라 이하와 같이 네 가지 경우로 나눌 수 있다. 네 가지 경우는 다음과 같다.

[0085] “경우1 (Case1)” :

[0086] If $\Omega_g \geq \Omega_{grat}$ and $\beta > \beta_{fine}$

[0087] 토크모드스위치 모드값 = '1' ($T_g = \frac{P_{grat}}{\Omega_g}$)

[0088] “경우2 (Case2)” :

[0089] If $\Omega_g \geq \Omega_{grat}$ and $\beta \leq \beta_{fine}$

[0090] 토크모드스위치 모드값 = '1' ($T_g = \frac{P_{grat}}{\Omega_g}$)

[0091] “경우3 (Case3)” :

[0092] If $\Omega_g < \Omega_{grat}$ and $\beta > \beta_{fine}$

[0093] 토크모드스위치 모드값 = '1' ($T_g = \frac{P_{grat}}{\Omega_g}$)

[0094] “경우4 (Case4)” :

[0095] If $\Omega_g < \Omega_{grat}$ and $\beta \leq \beta_{fine}$

[0096] 토크모드스위치 모드값 = '0' ($T_g = \text{Lookup Table}$)

[0097] 여기서, Ω_g 는 발전기 회전속도, Ω_{grat} 는 발전기 정격회전속도, β 는 블레이드의 피치각, β_{fine} 는 피치각의 파인피치각, T_g 는 발전기의 토크크기, P_{grat} 는 발전기의 정격출력파워이다.

[0098] 앞서 언급한 바와 같이, 토크모드스위치(30)의 모드값이 “1” 인 경우 발전기의 정격출력파워를 유지함으로써 발전기의 토크크기를 생산시킨다. 토크모드스위치(30)의 모드값이 “0” 인 경우 미리 계산된 순람표(Lookup Table)를 사용한다.

[0099] 도 5는 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치(30)와 토크제어방법을 나타낸 블록도를 도시한 것이다. 도 6은 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 블록도를 도시한 것이다. 바람에너지가 정격출력 이상일 때는 발전기의 정격출력파워를 유지하도록 토크모드스위치(30)의 값을 “1” 로 한다. 바람에너지가 정격출력 이하일 때는 최적모드게인을 이용하여 미리 계산된 순람표(Lookup Table)를 사용하여 발전기 토크를 발생시키도록 토크모드스위치(30)의 값을 “0” 으로 한다. 상기의 네 가지 경우를 토크모드스위치(30)로 구현하는 방법은 여러 가지가 가능한데 그 중 하나가 로직회로 “OR” 문을 이용하여 구현하는 방법이다.

[0100] 이 구현의 의미는 발전기의 회전속도가 정격회전속도 이상이고 피치각이 파인피치각(Fine Pitch Angle)보다 크면 바람에너지가 정격출력 이상인 경우라고 판단하고 토크모드스위치(30)를 통해 정격 토크크기의 발전기 토크를 발생시킨다. “OR” 문의 구현은 도면 6과 같다. 이러한 본 발명의 제1실시예에 따른 토크모드스위치 제어방법을 통하여 난류풍속 등의 영향으로 토크크기가 순간적으로 떨어지는 문제를 방지할 수 있게 된다.

[0101] 그러나, 앞서 언급한 제1실시예에 따른 제어방법은, 바람에너지가 정격출력 이상에서 바람에너지가 정격출력 이하로 떨어질 때 발전기의 토크크기에서 토크채터링이 발생하는 문제를 가지고 있다.

[0102] 이러한 토크채터링의 문제를 해결하기 위하여 우선 토크채터링이 발생하는 이유를 분석해 보기 위해, 2MW 풍력 터빈을 예시로 설명하고자 한다. 풍력터빈의 수치실험 시 토크채터링이 발생하는 이유를 분석하기 위하여 계단

풍속을 이용하였다. 도 7은 계단풍속을 나타낸 시간에 대한 풍속 그래프를 도시한 것이다.

[0103] 2MW 풍력터빈의 바람에너지가 정격출력은 약 12m/s(11.7m/s)이고 발전기의 정격회전속도는 1,500rpm이다. 풍력터빈의 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격하게 떨어지는 경우의 분석을 위하여 도 7에 도시된 바와 같이 13m/s에서 11m/s로 변하는 계단풍속을 사용하였다. 그 실험의 결과는 도 8에 도시된 바와 같다. 도면 7에서 V는 풍속이다.

[0104] 먼저, 바람에너지가 정격출력 이상과 정격출력 이하에서의 정상상태를 구분하여 확인해보면, 그 수치실험 결과는 도 8과 같다. 도면 8에서 P_g 는 발전기의 출력과워, T_g 는 발전기의 토크 크기, Ω_g 는 발전기의 회전속도, β 는 블레이드의 피치각이다. 도 8의 계단응답을 시간대 별로 그에 해당하는 경우(Case)를 구분하여 분석하면 도 9 및 이하의 표 1과 같다. 표 1에서 t는 시간을 나타낸다.

[0105] [표 1]

Time (sec)	Case	Value of torque mode switch
$0 \leq t \leq 5$	Case1	"1"
$5 < t < 6.2$	Case3	"1"
$t = 6.2$	Case4	"0"
$6.2 < t \leq 7.51$	Case3 or Case4	"0" or "1"
$7.51 < t \leq 15$	Case4	"0"

[0106]

[0107] 바람에너지가 정격출력 이상에서의 정상상태를 설명하면, 0~5초 동안에는 풍속이 13m/s로 정격출력 이상이어서 발전기의 회전속도는 정격회전속도인 1,500rpm이다. 이때 정격출력을 유지하기 위해서는 블레이드에서 발생하는 공력토크를 줄여야한다.

[0108] 블레이드의 피치각이 파인피치각인 “0도” 보다 커지면 공력토크는 줄어드는데, 풍속이 13m/s인 경우 피치각의 정상상태 값은 도 10에 도시된 바와 같이, 약 “6.5도” 로 유지된다. 이때의 토크모드스위치(30)는 “경우 1” 에 해당되고 정격출력과워를 유지함으로써 발전기의 토크크기를 발생시킨다.

[0109] 바람에너지가 정격출력 이하에서의 정상상태를 설명하면, 7.51~15초 동안에는 풍속이 11m/s로 바람에너지가 정격출력 이하이어서 발전기의 회전속도는 정격회전속도보다 작은 1,494rpm이다. 그리고 바람에너지가 정격출력 이하로 떨어지기 때문에 더 많은 공력토크를 얻기 위하여 피치각이 파인피치각인 “0도” 로 떨어진 후 유지된다. 이때의 토크모드스위치(30)는 “경우 4” 에 해당되고 발전기의 토크크기는 발전기의 회전속도에 따라 발전기의 토크크기를 조절한다.

[0110] 다음으로 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 과도응답으로 인해 발생하는 토크채터링의 문제점을 확인해보도록 한다.

[0111] 5~7.51초 동안에는 공력토크와 발전기 토크가 바뀌면 발전기의 회전속도가 변하는데 이에 따라서 풍력터빈의 동특성으로 인해 과도응답이 발생한다. 그러나 바람에너지가 정격출력 이하에서는 발전기의 회전속도가 항상 정격회전속도 이하이므로 토크채터링의 발생과는 상관이 없다. 블레이드 피치각 또한 피치제어기(50)의 동특성으로 인해 과도응답이 발생하는데, 피치각이 파인피치각인 “0도” 로 되는 6.2초에서 바로 멈추지 않고 6.2초 이후에 “0도” 를 중심으로 몇 차례 진동한 후에 “0도” 로 유지된다. “0도” 를 중심으로 진동할 때 피치각은 피치각 제한장치로 인해 파인피치각의 최솟값인 “0도” 보다 작아지지는 않지만 “0도” 보다 조금 커지는 경우가 발생하여 토크채터링에 영향을 미치게 된다.

[0112] 이러한 현상으로 인해 토크모드스위치(30)는 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격하게 떨어질 때 “경우 1” 에서 “경우 4” 로 바뀐 후 “경우 4” 의 상태가 지속적으로 유지되지 않고 피치각이 파인피치각인 “0도” 보다 큰 경우가 발생하여 다시 “경우 3” 으로 바뀌고 또 다시 “경우 4” 로 바뀌는 현상을 반복한다. 이때 “경우 3” 에서는 정격출력과워를 유지시키고 “경우 4” 에서는 발전기의 회전속도에 따라 발전

기의 토크크기를 조절하는데, “경우 3” 과 “경우 4” 가 짧은 시간에 반복되는 현상 때문에 토크크기가 급격히 바뀌어 토크채터링이 발생된다.

[0113] 도 8은 풍속이 13m/s에서 11m/s로 급격히 바뀐 후 피치각 “0도” 로 떨어지는 시점에서부터 약 1.3초 동안 토크채터링이 발생함을 보여준다. 이때 피치각은 약 1.3초 동안 “0~0.02도” 사이에서 매우 작은 진동이 여러 번 발생한 후에 “0도” 로 유지되는 것을 확인할 수 있다.

[0114] 상기와 같은 이유로 발생한 토크채터링의 문제는 토크모드스위치(30)의 “경우3” 에서 나타나는 현상이므로 “경우3” 을 보완할 필요성이 있다.

[0116] 이하에서 설명되는 본 발명의 제2실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법은 제1실시예에서 나타난 토크채터링 문제를 해결하기 위한 것이다. 본 발명의 제2실시예에 따라 토크모드스위치(30)를 제어할 때 제1실시예와 동일하게 발전기의 회전속도와 블레이드의 피치각 두 가지 정보를 모두 고려한다.

[0117] 앞서 언급한 바와 같이, 제1실시예를 적용하면 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 피치각은 피치제어기(50)의 동특성으로 인해 발생하는 토크채터링 때문에 파인피치각인 “0도” 를 중심으로 변동하는 매우 작은 진동이 발생한다.

[0118] 앞서 언급한 바와 같이, 발전기의 회전속도가 정격회전속도보다 작은 경우에 블레이드의 피치각이 “0도” 부근에서 진동하게 되면 토크모드스위치(30)의 네 가지 경우 중 “경우 3” 으로 인해 토크채터링이 발생한다. 풍력 터빈이 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 피치각이 “0도” 부근에서 진동하는 현상은 물리적으로 피할 수 없지만 “경우 3” 의 토크모드스위치(30) 값은 제어가 가능하다.

[0119] 토크채터링을 방지하기 위하여 토크채터링의 발생과 관련이 있는 “경우 3” 에서는 토크모드스위치(30)의 값을 항상 “1” 로 사용하는 대신에 “1” 또는 “0” 을 사용하는 것이 필요하다. “1” 과 “0” 을 결정하기 위한 판단이 필요한데, 토크모드스위치(30)의 “이전 값” 을 사용하면 “0” 과 “1” 을 판단할 수 있다.

[0120] 토크채터링 문제를 해결하기 위해 제안되는 본 발명의 제2실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법은 다음과 같다. 발전기의 회전속도와 피치각에 따라서 네 가지 경우로 나눌 수 있다.

[0121] “경우 1 (Case1)” :

[0122]
$$\text{If } \Omega_g \geq \Omega_{\text{grat}} \text{ and } \beta > \beta_{\text{fine}}$$

[0123] 토크모드스위치 모드값 = ‘1’ (
$$T_g = \frac{P_{\text{grat}}}{\Omega_g}$$
)

[0124] “경우 2 (Case2)” :

[0125]
$$\text{If } \Omega_g \geq \Omega_{\text{grat}} \text{ and } \beta \leq \beta_{\text{fine}}$$

[0126] 토크모드스위치 모드값 = ‘1’ (
$$T_g = \frac{P_{\text{grat}}}{\Omega_g}$$
)

[0127] “경우 3 (Case3)” :

[0128]
$$\text{If } \Omega_g < \Omega_{\text{grat}} \text{ and } \beta > \beta_{\text{fine}}$$

[0129] 토크모드스위치 모드값(k) = 토크모드스위치 모드값(k-1)

[0130] (‘1’ 또는 ‘0’)

[0131]
$$T_g = \frac{P_{\text{grat}}}{\Omega_g}$$
 또는 $T_g = \text{Lookup Table}$

[0132] “경우 4 (Case4)” :

[0133]
$$\text{If } \Omega_g < \Omega_{\text{grat}} \text{ and } \beta \leq \beta_{\text{fine}}$$

[0134] 토크모드스위치 모드값 = '0' (T_g = Lookup Table)

[0135] 여기서 k는 “현재 상태” 이고 k-1은 “이전 상태” 를 의미한다.

[0136] “경우3” 에서 토크모드스위치(30)의 “이전 상태” 를 사용한 결과에 대해 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 떨어지는 도면 5의 계단풍속에 대하여 동일하게 살펴보도록 한다. 수치실험 결과는 도 10과 같다. 또한, 도 11의 계단응답을 시간대 별로 그에 해당하는 경우를 구분하여 분석하면 도 12 및 이하의 표 2와 같다. 표 2에서 t는 시간을 나타낸다.

[0137] [표 2]

Time (sec)	Case	Value of torque mode switch
$0 \leq t \leq 5$	Case1	"1"
$5 < t < 6.2$	Case3	"1"
$t = 6.2$	Case4	"0"
$6.2 < t \leq 11.21$	Case3	"0"
$11.21 < t \leq 15$	Case4	"0"

[0138]

[0139] 먼저, 바람에너지가 정격출력 이상과 정격출력 이하에서의 정상상태를 구분하여 확인해보도록 한다. 바람에너지가 정격출력 이상에서의 정상상태를 설명하면, 0~5초 동안에는 풍속이 13m/s로 정격출력 이상이므로 발전기의 회전속도는 정격회전속도인 1,500rpm이고 피치각은 약 “6.5도” 로 파인피치각보다 크다. 이는 “경우 1” 에 해당되고 토크모드스위치(30)의 값은 “1” 로 유지된다. 이는 제1실시예의 결과와 동일하다.

[0140] 바람에너지가 정격출력 이하에서의 정상상태를 설명하면, 11.21~15초 동안에는 풍속이 11m/s로 바람에너지가 정격출력 이하이어서 발전기의 회전속도는 1,494rpm으로 정격회전속도보다 작고 피치각은 “0도” 로 파인피치각이다. 이는 “경우 4” 에 해당되고 토크모드스위치(30)의 값은 “0” 으로 유지된다. 이는 제1실시예의 결과와 동일하다.

[0141] 다음으로 바람에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 발생하는 과도응답에서의 토크모드스위치(30)의 작동을 확인해 보도록 한다.

[0142] 우선, 풍속이 11m/s로 바뀐 후 5~6.2초 동안의 과도응답을 살펴보면 발전기의 회전속도는 정격회전속도보다 작지만 피치각은 파인피치각보다 크다. 이는 “경우 3” 에 해당되므로 토크모드스위치(30)의 값은 “1” 과 “0” 중에서 판단해야한다.

[0143] 이 경우 토크모드스위치(30)의 “이전 값” 이 “1” 이므로 “1” 로 판단되어 “1” 로 유지된다. 다음으로, 6.2초일 때 피치각이 파인피치각인 “0도” 로 떨어진다. 이때 발전기의 회전속도는 정격회전속도보다 작고 피치각은 파인피치각이기 때문에 “경우 4” 에 해당되고 토크모드스위치(30)의 값은 “0” 으로 바뀐다. 다음으로 6.2~11.21초 동안에는 피치제어기(50)의 동특성 때문에 피치각이 다시 파인피치각보다 커지기 된다.

[0144] 이는 “경우 3” 에 해당되므로 토크모드스위치(30)의 값은 “1” 과 “0” 중에서 판단해야한다. 이 경우 토크모드스위치(30)의 “이전 값” 이 “0” 이므로 “0” 으로 판단되어 “1” 로 바뀌지 않고 “0” 으로 유지된다. 이때 발전기의 토크 크기는 정격출력파워로 급격하게 바뀌지 않으므로 토크채터링을 방지할 수 있다.

[0145] 그러므로 이와 같이 피치각이 파인 피치각인 “0도” 로 떨어진 후 피치제어기(50)의 동특성으로 인해 피치각이 “0도” 부근에서 진동하여도, 토크모드스위치(30)의 값을 “이전 값” 으로 사용하면 기존 방법의 “경우3” 에서 나타나는 토크채터링의 발생을 방지할 수 있게 됨을 알 수 있다.

[0146] 제1실시예의 토크모드스위치(30) 제어방법과 제2실시예의 방법을 계단풍속으로 비교한 수치실험 결과는 도 13과 같다. 제2실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법을 적용하면 토크채터링이 방지되고 이로 인해 과도응답 특성이 향상됨을 확인할 수 있다.

[0147] 본 발명의 제2실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법을 상기와 같은 논리에 따라서 제안된 방법을

Matlab/Simulink로 구현한 것은 도 14와 같다. 이는 여러 가지 구현방법 중 하나이고 로직회로 “AND” 와 정수 지연(Integer Delay) z^{-1} 을 이용하여 구현되었다. 여기서 z^{-1} 은 “이전 값” 을 의미한다.

- [0148] 제안된 구현에서 발전기의 회전속도가 정격속도 이상이면 정격출력 이상으로 판단하여 토크모드스위치(30)의 값은 “1” 이 된다. 발전기의 회전속도가 정격속도보다 작고 피치각이 파인피치각이면 정격출력 이하로 판단하여 토크모드스위치(30)의 값은 “0” 이 된다. 또한 발전기의 회전속도가 정격속도보다 작고 피치각이 파인피치각보다 크면 정수지연(Integer Delay) 기능을 사용하여 토크모드스위치(30)의 값은 “이전 값” 이 된다.
- [0150] <수치실험 데이터>
- [0151] 이하에서는 토크채터링 문제 해결여부를 비교한 제1실시예와 제2실시예의 비교데이터를 설명하도록 한다. 실제와 유사한 풍속인 난류풍속을 사용하여 풍력터빈 제어시스템의 출력성능을 평가하는 것은 매우 중요하다. 바람 에너지가 정격출력 이상에서 정격출력 이하로 급격히 떨어질 때 발생하는 토크채터링의 문제를 확인하기 위하여 도 15와 같은 난류풍속을 사용하였다. 사용한 난류풍속은 IEC-61400-1의 규정에 따라서 생성되었는데 10분 동안의 평균풍속은 16m/s이고 난류강도는 17.6%이다.
- [0152] 도 15에 도시된 바와 같이, 실제 난류풍속은 난류강도가 매우 커서 정격풍속(약 12m/s) 이상에서 정격풍속 이하로 떨어지는 경우가 여러 번 발생하므로 올바른 토크모드스위치(30)의 작동이 중요하다.
- [0153] 도 16에서 표시한 것처럼 정격풍속 이상에서 정격풍속 이하로 떨어지는 경우는 13.5초(1), 46.1초(2), 56.6초(3), 97.5초(4), 205.9초(5), 228.1초(6), 264.2초(7), 277.8초(8), 376.2초(9), 389.7초(10), 435.2초(11), 489.5초(12), 571.2초(13), 585.6초(14) 부근으로 총 14회 발생하였다. 난류풍속을 이용하여 제1실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법을 적용한 수치실험의 결과는 도 17과 같고 토크채터링을 확인하기 위해 확대하여 표시한 도면은 도 18 및 도 19과 같다.
- [0154] 풍속이 정격풍속 이상에서 정격풍속 이하로 떨어지는 14회 중에서 세 번을 제외한 총 11회(도 16에서 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 13의 경우에 해당하는 시간 부근)에서 피치각이 파인피치각인 “0도” 로 떨어졌다. 이때 도 17을 보면 토크채터링이 여러 차례 발생하는 것을 확인할 수 있는데, 피치각이 파인피치각인 “0도” 로 떨어지는 11회 중에서 토크채터링은 총 8회(도 16에서 1, 4, 6, 7, 9, 11, 12, 13의 경우에 해당하는 시간 부근) 발생하였다. 그중에 토크채터링의 정도가 큰 경우는 도 18 및 도 19에서 표시한 97.5초(4)와 435.2초(11) 부근에서 발생하였다.
- [0155] 또한, 본 발명의 제2실시예에 따른 제어방법을 적용한 수치실험의 결과는 도 20과 같고 토크채터링의 해결 효과를 확인하기 위해 확대하여 표시한 도면은 도 21 및 도 22과 같다. 이 경우에는 풍속이 정격풍속 이상에서 정격풍속 이하로 급격히 떨어질 때 발생하는 토크채터링 문제를 방지하여 안정적으로 정격출력파워를 유지할 수 있음을 알 수 있다.
- [0156] 제1실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법을 적용한 경우 평균 출력파워는 1.97MW이고, 제2실시예에 따른 제어방법을 적용한 경우의 평균 출력파워 또한 1.97MW로 동일하다. 그러므로 실제 난류풍속에서 제2실시예에 따른 토크모드스위치(30)의 제어방법을 사용하면 제1실시예에 따른 토크모드스위치(30) 제어방법의 문제점인 토크채터링의 발생을 방지하면서 동일한 출력파워를 얻을 수 있는 이점이 있음을 알 수 있다.
- [0157] 따라서 본 발명의 제2실시예에 따르면, 앞서 언급한 바와 같이, 풍력터빈이 정격풍속 이상에서 정격풍속 이하로 급격히 떨어질 때 발생하는 토크채터링의 문제를 완전히 해결할 수 있었고, 또한 안정적으로 정격출력파워를 유지하면서 발전기의 토크크기를 제어할 수 있다.
- [0159] 또한, 상기와 같이 설명된 장치 및 방법은 상기 설명된 실시예들의 구성과 방법이 한정되게 적용될 수 있는 것이 아니라, 상기 실시예들은 다양한 변형이 이루어질 수 있도록 각 실시예들의 전부 또는 일부가 선택적으로 조합되어 구성될 수도 있다.

부호의 설명

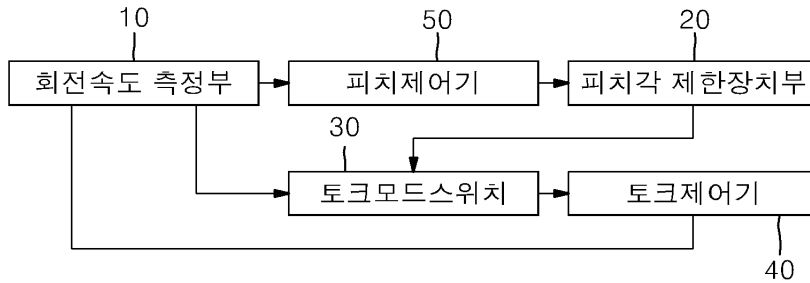
- [0160] 10: 회전속도 측정부
- 20: 피치각 제한장치부
- 30: 토크모드스위치

40: 토크제어기

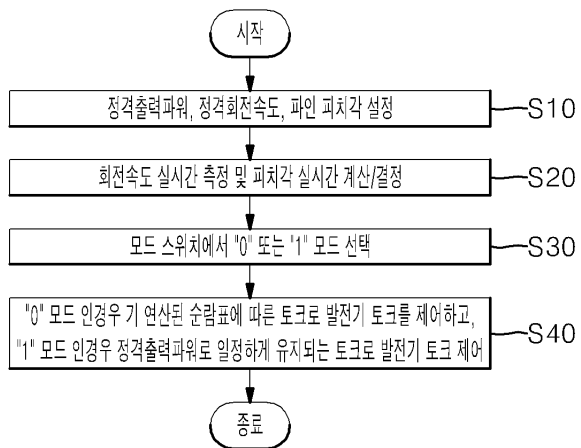
50: 피치제어기

도면

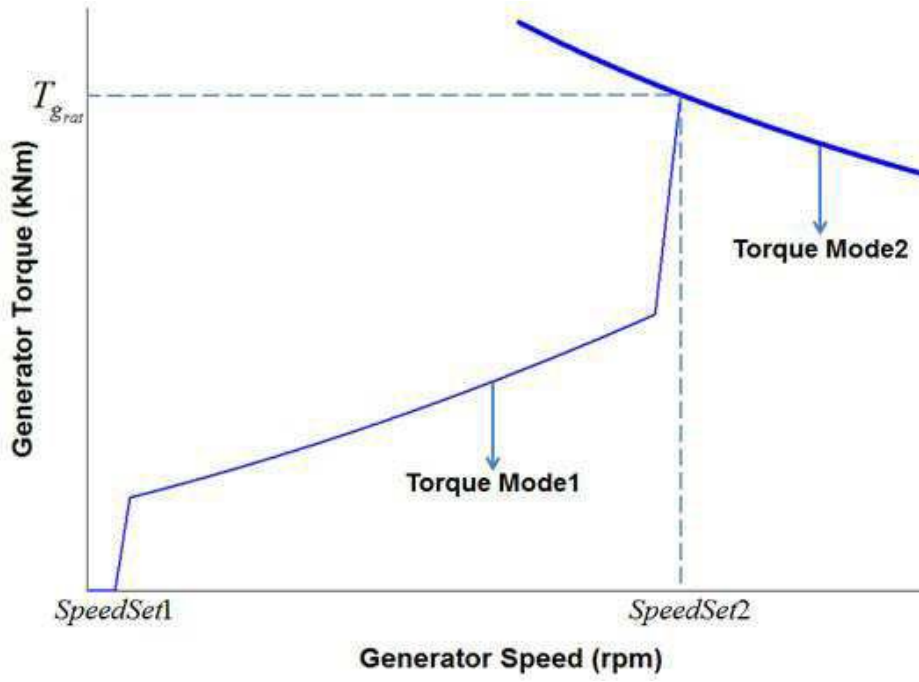
도면1



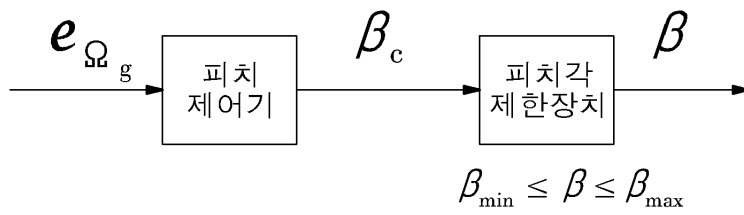
도면2



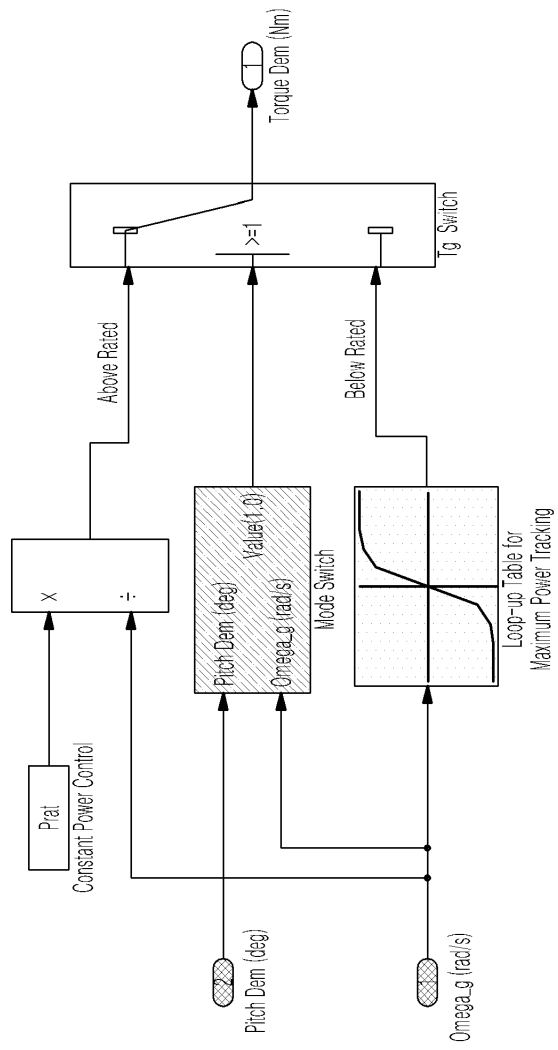
도면3



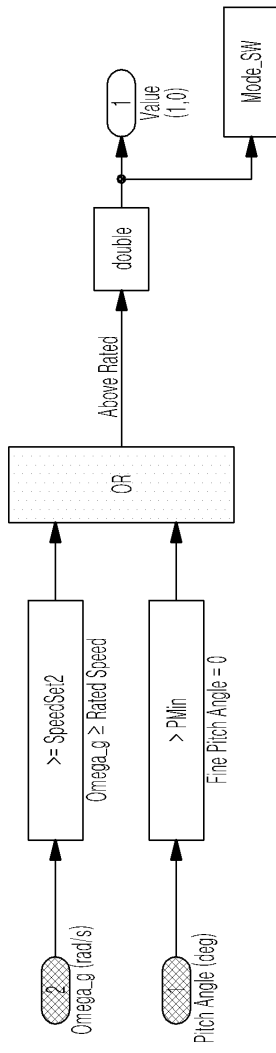
도면4



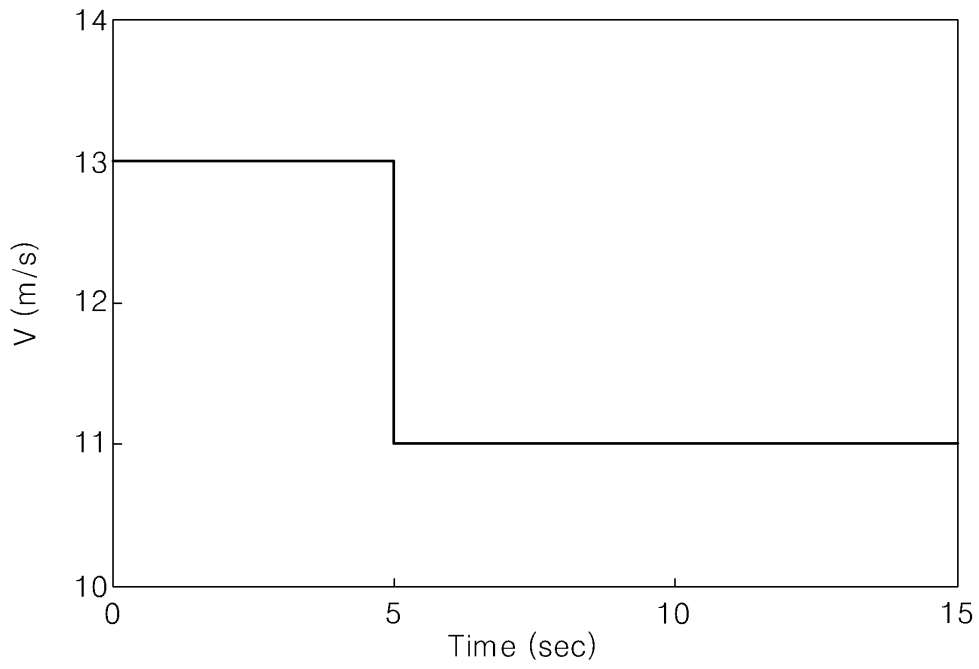
도면5



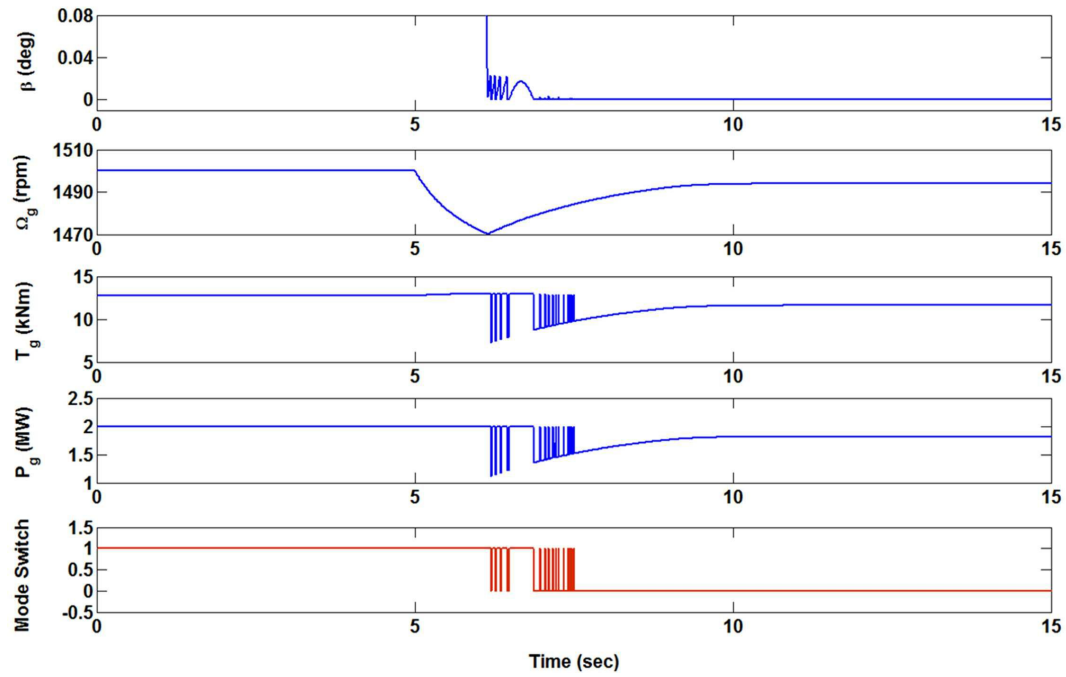
도면6



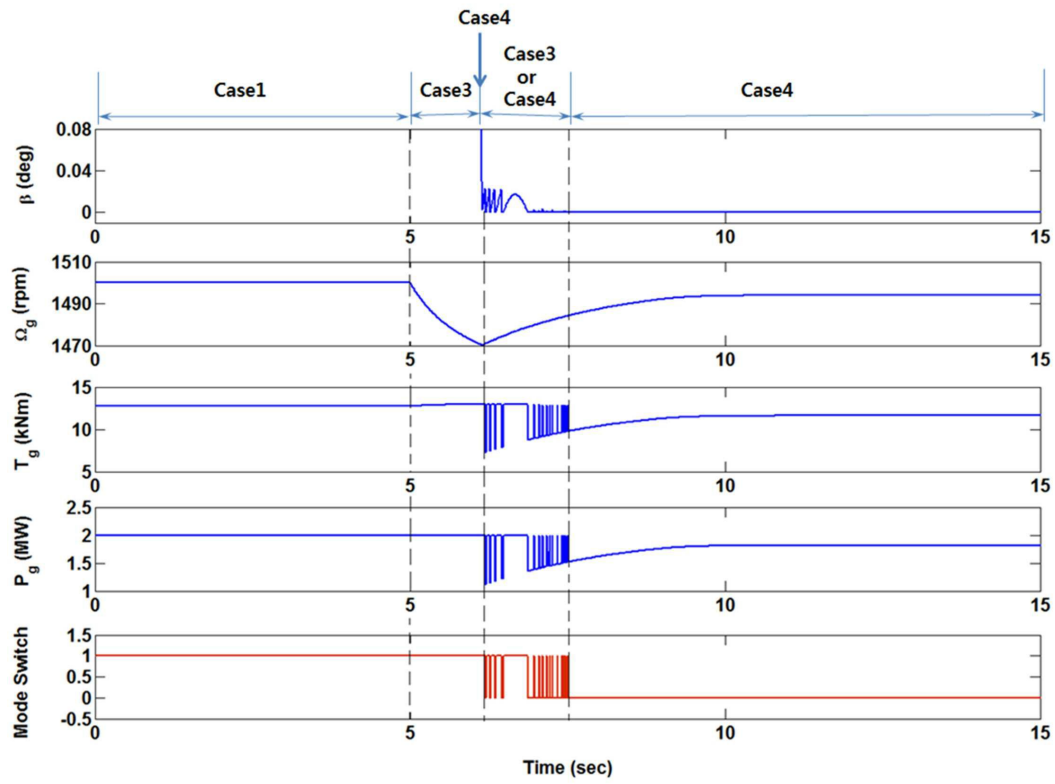
도면7



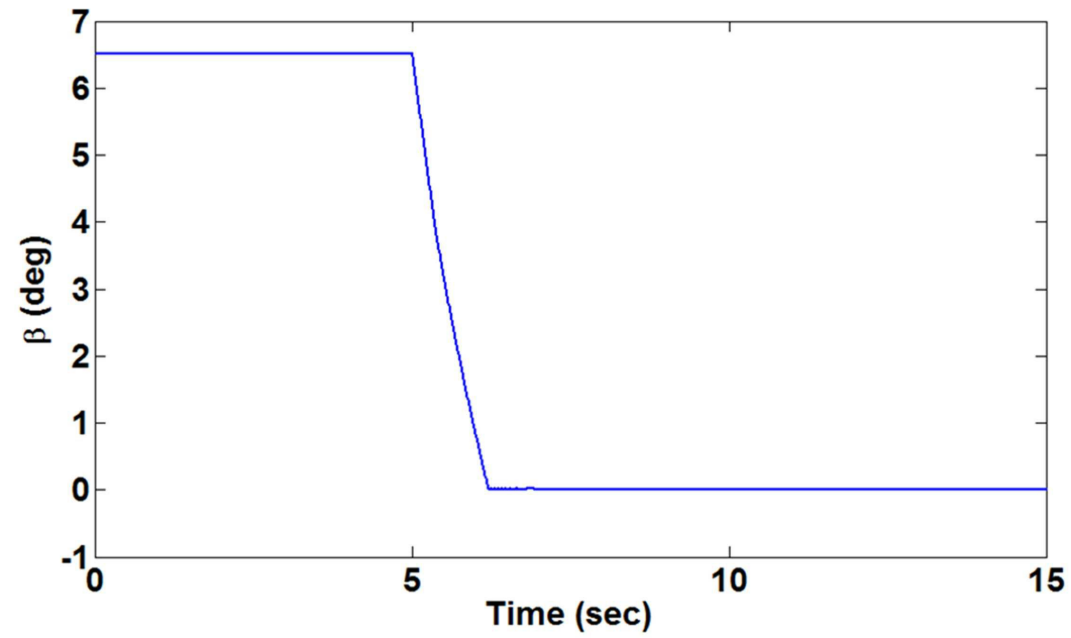
도면8



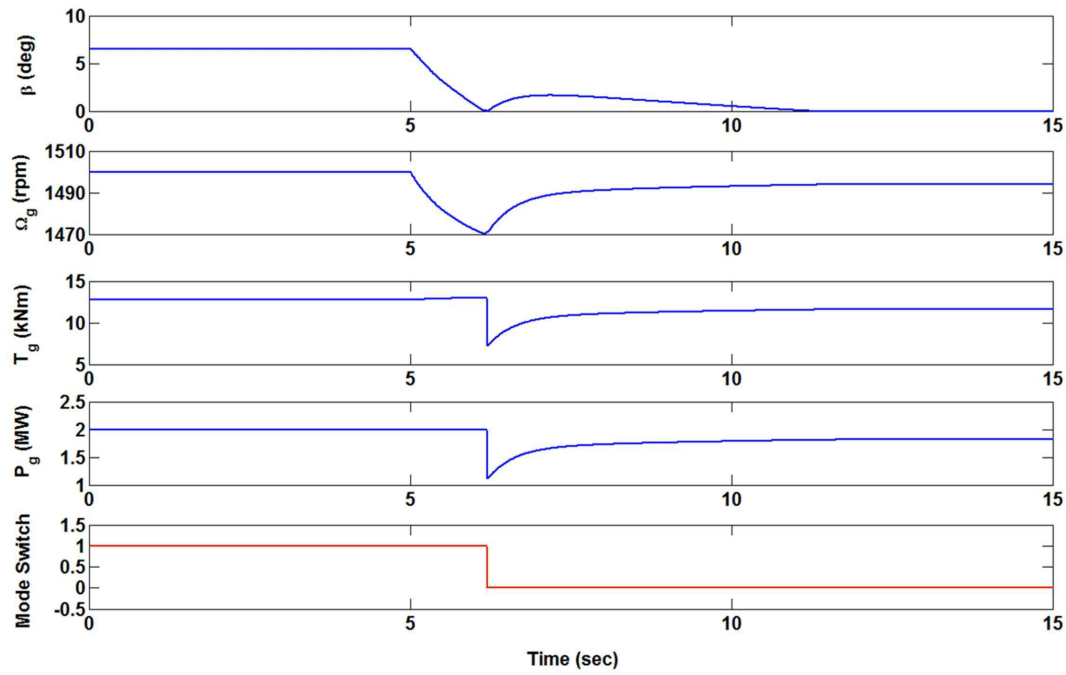
도면9



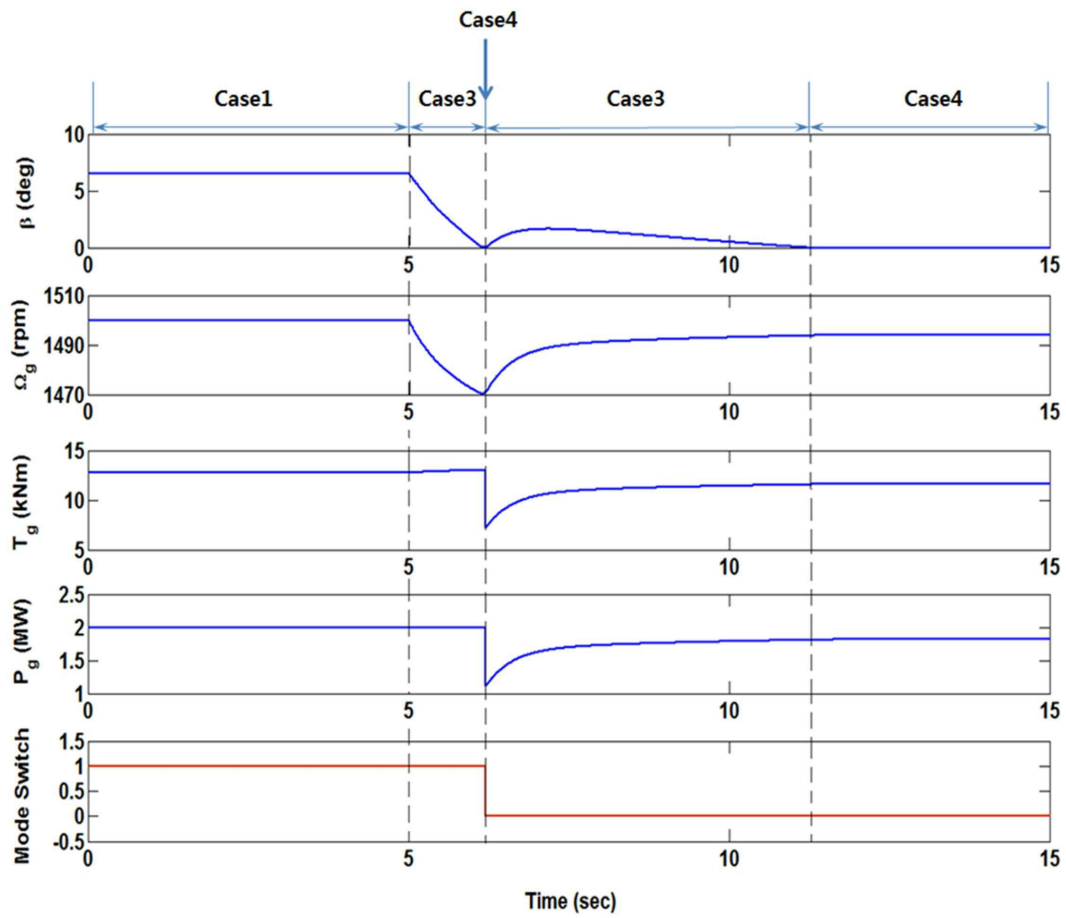
도면10



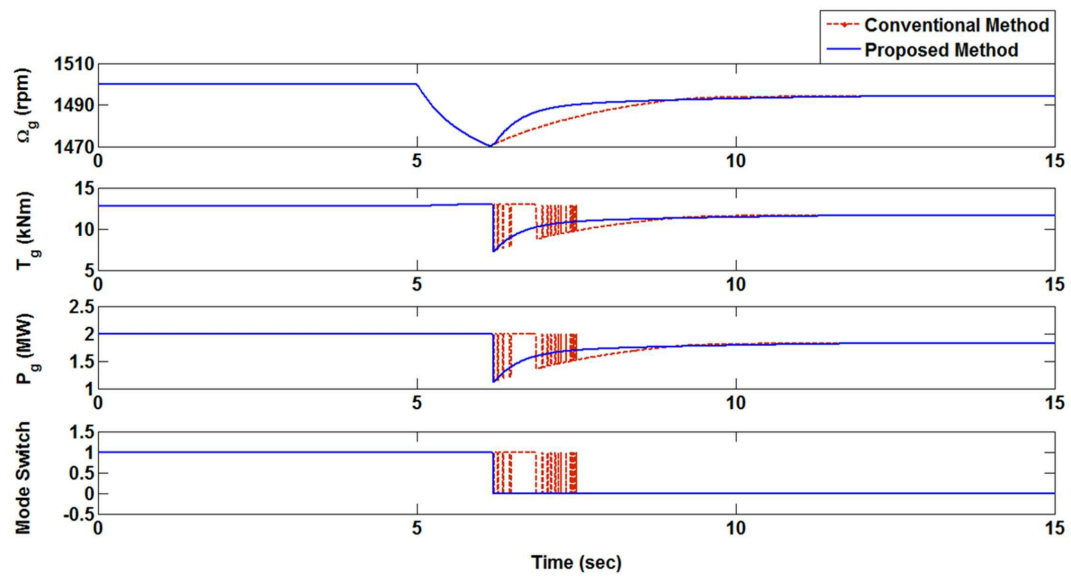
도면11



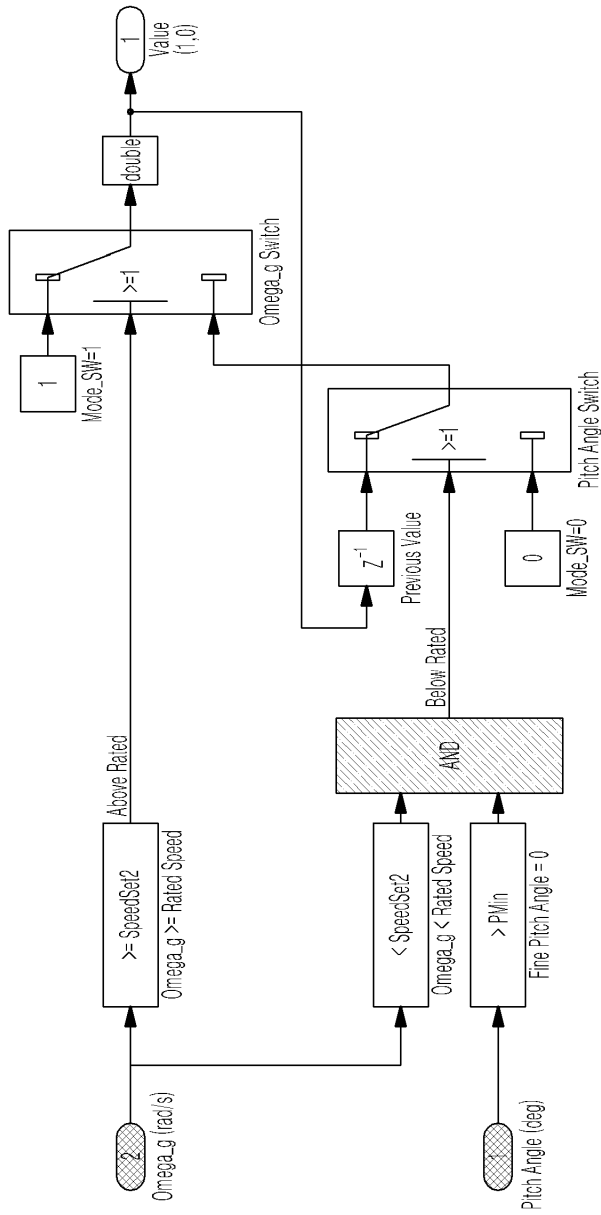
도면12



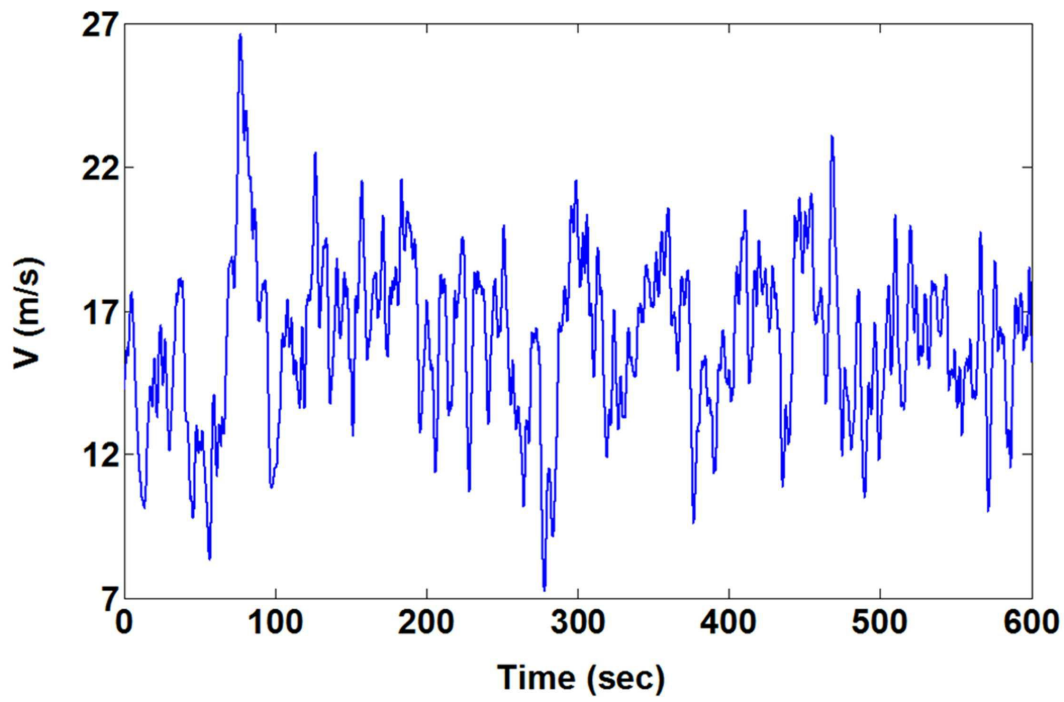
도면13



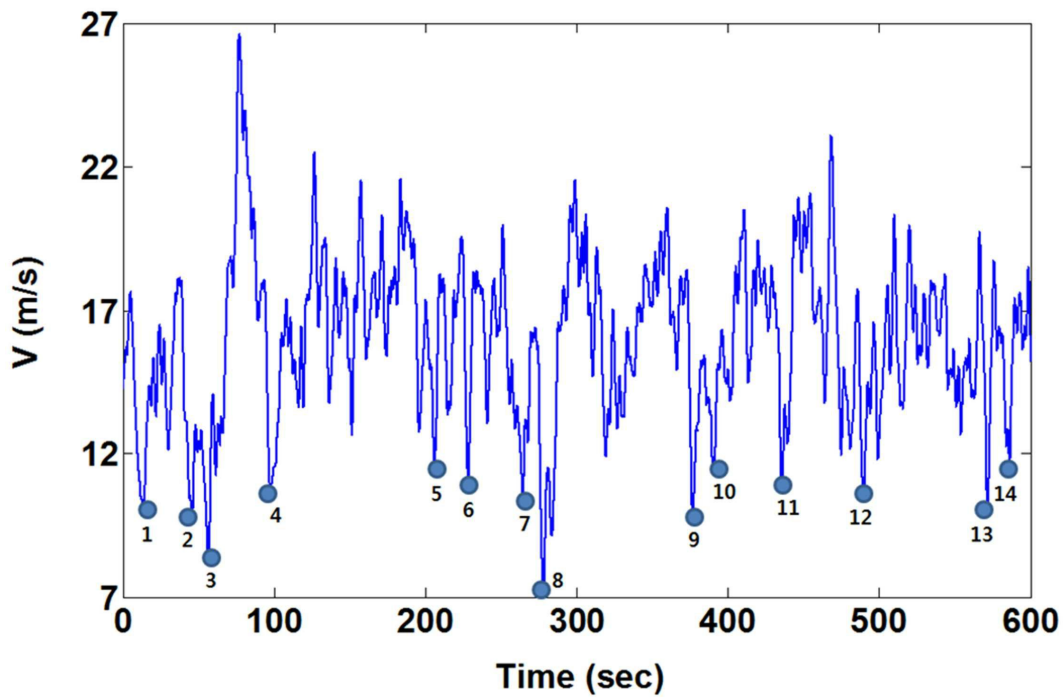
도면14



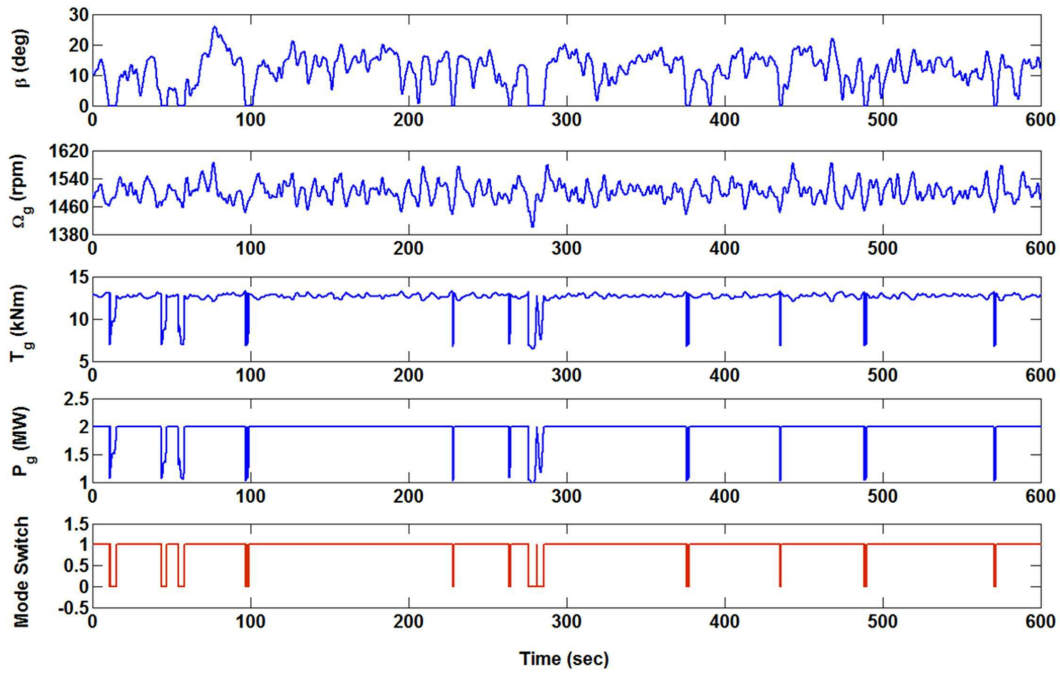
도면15



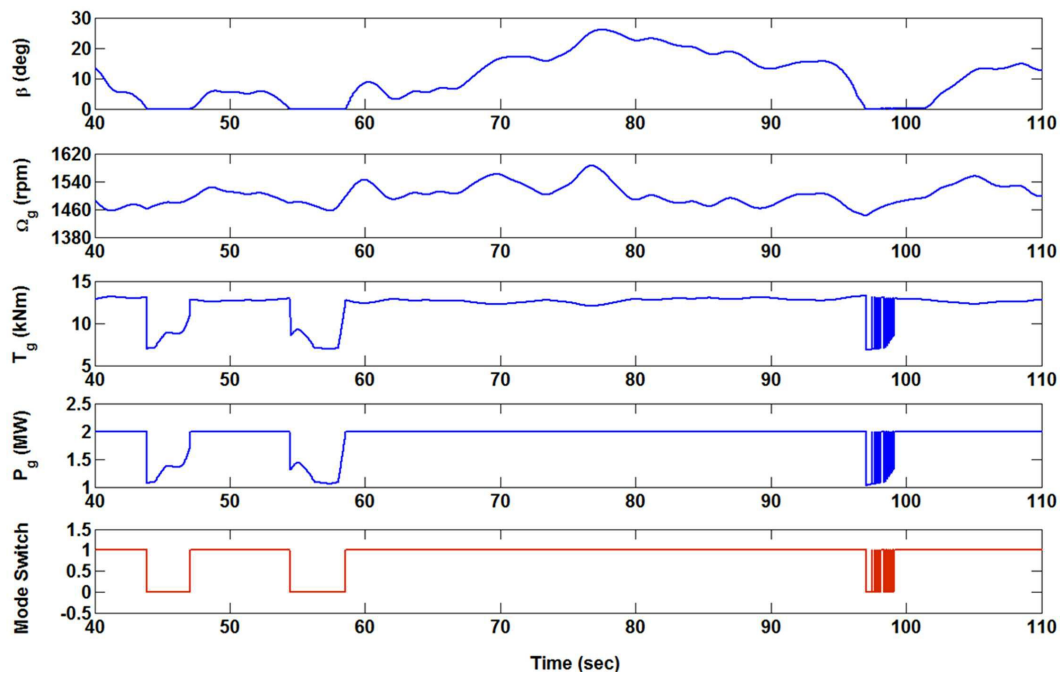
도면16



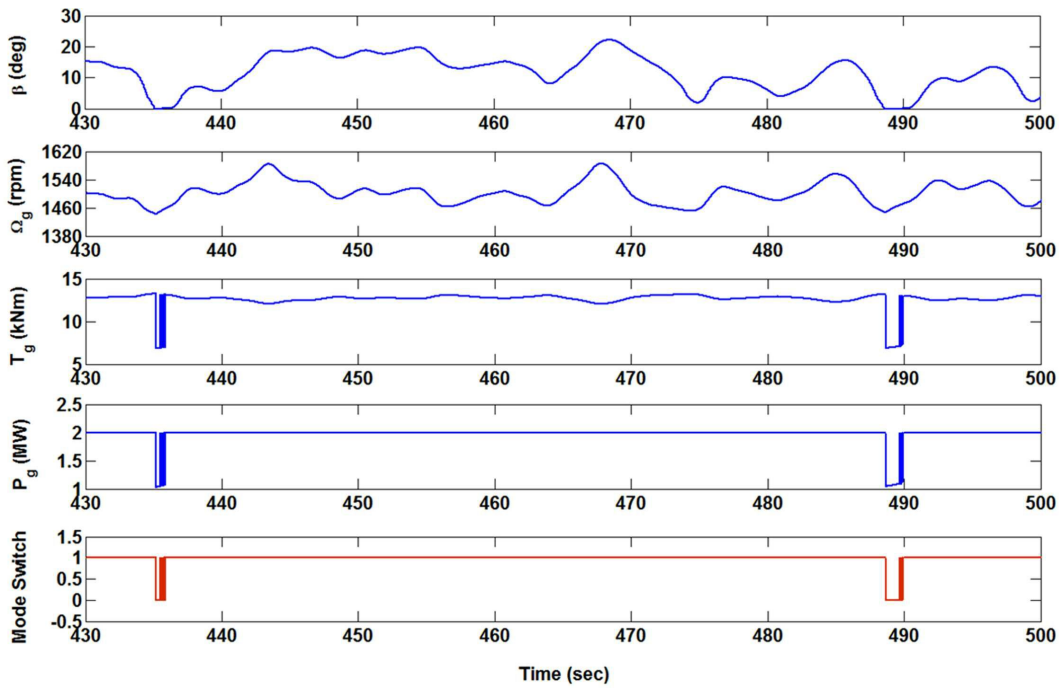
도면17



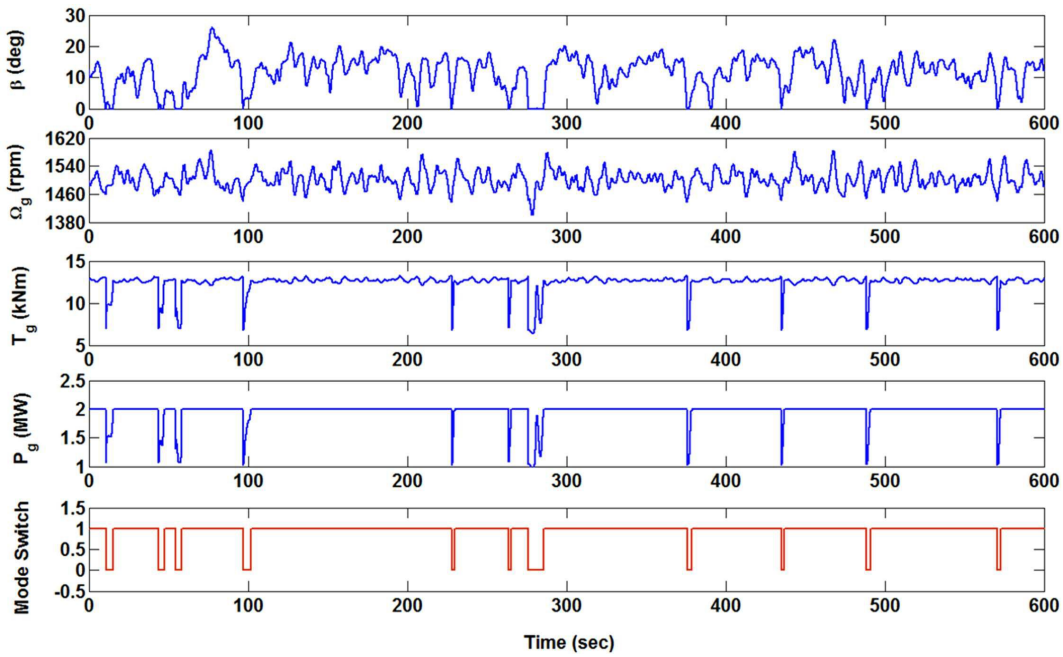
도면18



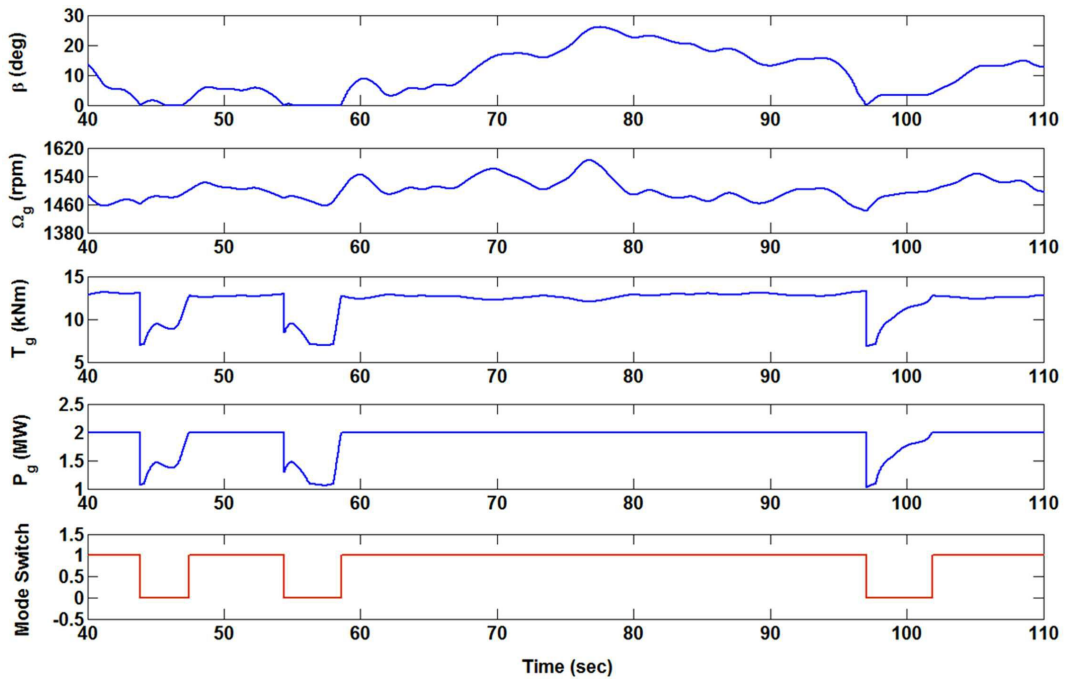
도면19



도면20



도면21



도면22

