(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2014년06월03일
(11) 등록번호 10-1402307
(24) 등록일자 2014년05월26일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/00 (2006.01) *F03D 11/00* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-0052052
(22) 출원일자 2013년05월08일
심사청구일자 2013년05월08일
(56) 선행기술조사문헌
JP2004064809 A
KR1020120103966 A
KR1020120110685 A

(73) 특허권자
한발대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
임채욱
대전 서구 월평동로 83, 110동 1506호 (월평동, 다모아아파트)
김상균
충청북도 청원군 현도면 노산리 571-4번지
(74) 대리인
특허법인 신지

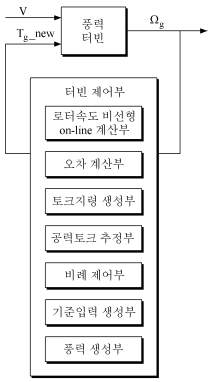
전체 청구항 수 : 총 6 항 심사관 : 방승훈

(54) 발명의 명칭 **공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법 및 그 장치**

(57) 요 약

본 발명은 풍속의 정보를 간접적으로 추정하여 로터속도의 비선형 파라미터를 온라인 또는 오프라인으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 사용하는 로터속도 비선형 파라미터와 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법 및 그 장치에 관한 것으로, 발전기 회전속도를 제곱하여 최적모드 게인에 곱함으로써, 토크지령을 생성하는 토크지령 생성부와, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부와, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부와, 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산부와, 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산부와, 상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부를 포함하는 풍력터빈의 토크제어장치 및 이를 이용한 토크제어방법에 관한 것이다.

대 표 도 - 도3



이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	20120002397
부처명	교육과학기술부
연구사업명	일반연구자지원사업
연구과제명	풍력발전기의 공기역학적 비선형성 제거 보상기 개발
기 여 율	1/1
주관기관	한밭대학교 산학협력단
연구기간	2012.05.01 ~ 2013.04.30

특허청구의 범위

청구항 1

토크제어를 사용하여 풍속의 변화에 따른 응답속도를 빠르게 하여 최대출력을 생산하기 위한 풍력터빈의 토크제어 장치에 있어서,

발전기 회전속도를 제곱하여 최적모드 게인에 곱함으로써, 토크지령을 생성하는 토크지령 생성부;

공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부,

상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부,

상기 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부,

현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산부;

로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산부;

상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부; 를 포함하는 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어장치.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 로터속도 비선형 계산부는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산하는 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어장치.

청구항 3

토크제어를 사용하여 풍속의 변화에 따른 응답속도를 빠르게 하여 최대 출력을 생산하기 위한 풍력터빈의 토크제어방법에 있어서,

발전기의 회전속도를 제곱하고 최적모드 게인에 곱하여 토크 지령을 생성하는 단계;

공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정하는 단계와;

상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 단계와;

상기 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성하는 단계와;

현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력 사이에 오차를 계산하는 단계;

로터속도의 비선형 파라미터를 계산하는 단계; 및

상기 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산하는 단계; 를 포함하는 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 로터속도의 비선형 파라미터는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 계산되는 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법.

청구항 5

제 3항에 있어서,

상기 생성된 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력(Ω_{ref})은 발전기 정격속도 값을 갖는 최대값($\Omega_{ref,max}$)과, 발전기 특성에 의해 좌우되는 값으로 발전기 정격속도의 50 ~ 70%정도의 값을 갖는 최소값($\Omega_{ref,min}$)사이에 포화되도록

설정된 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법.

청구항 6

제 3항에 있어서,

상기 게인상수는 0보다 큰 값을 사용하는 것을 특징으로 하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법.

명 세 서

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 로터속도 비선형 파라미터와 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어 방법 및 그 장치에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 공력토크 관측기를 이용하여 풍속의 정보를 생성하고 로터속도의 비선형 파라미터를 온라인 또는 오프라인으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 사용하는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법 및 그 장치 에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 일반적으로, 풍력터빈은 바람이 가진 운동에너지를 블레이드 회전을 통하여 기계적인 에너지로 변환시키고 기계적인 에너지를 발전기를 이용하여 전기에너지로 변환하는 기계이다.

[0003] 상기와 같은 풍력터빈의 제어에 있어서 중요하게 고려되어야 할 사항은 바람과 블레이드의 상호작용에 의한 공력토크 비선형의 영향이다. 공력토크의 비선형으로 인해 블레이드, 로터, 회전축, 기어박스, 타워, 발전기 등 풍력터빈의 각 구성요소들을 선형모델로 가정하더라도 풍력터빈의 전체 거동은 비선형적인 거동을 보이게 된다. 풍력터빈의 비선형성과 제어는 밀접한 연관성을 갖는다.

[0004] 풍력터빈 제어에 있어서 비선형적인 3가지의 요인이 존재하는데, 입력이 되는 풍속, 토크제어에 영향을 주는 로터속도, 피치제어에 영향을 주는 피치각이 그 요인에 해당된다. 토크제어는 발전기 회전속도를 제어하기 위해서 발전기 토크 크기를 조절하여 최적의 발전기 속도를 제어하게 된다. 종래에 많이 사용해오던 토크제어 방법으로 최적모드 게인방법이 있다.

[0005] 도2는 종래에 사용되는 풍력터빈의 토크제어 방법을 도시한 블록선도이다. 상기와 같은 종래 최적모드 게인방법은 고정된 게인값인 최적모드게인(K_{opt})에 발전기 회전속도(Ω_g)의 제곱을 곱하여 토크입력을 제어하는 방법이다.

그러나 최적모드게인(K_{opt})을 이용한 토크제어 방법을 사용할 때 다음과 같은 한계가 발생하게 된다. 근래 들어

풍력터빈은 더 많은 출력을 얻기 위해서 대형화되는 추세이며, 이에 따라 블레이드의 반경도 길어지게 되고, 블레이드의 길이 증가와 동시에 로터의 관성모멘트 또한 증가하여 토크시스템의 응답이 느려지게 된다. 최적모드 게인은 풍력터빈의 블레이드의 공력특성 및 기어박스의 증속비가 결정되면 이에 따라 한 값으로 고정되므로 응답특성을 향상 시킬 수 없는 단점을 갖게 된다.

[0006] 이런 단점을 극복하기 위해 다른 제어 방법들이 많이 거론되고 있는 추세이며, 풍력터빈의 관성모멘트를 줄여주기 위해서 발전기 회전가속도를 이용한 토크제어방법, 발전기에 발생되는 토크와 공기역학적 생성되는 공력토크와의 오차를 줄여주기 위해서 공력토크를 이용한 토크제어 방법 등이 제시 되고 있다.

종래에 출원 등록된 '한국 등록특허 10-1322240'에는 영구자석 동기모터(permanent magnet synchronous motor, PMSM)의 토크(torque)를 제어하기 위한 것으로, 정상상태 오차(steady-state error) 없이 영구자석 동기모터의 토크를 제어하기 위해 외란관측기(disturbance observer, DOB)와 결합된 모델예측제어기(model predictivecontroller, MPC)를 제안하고 있으며, 상기 외란관측기는 루엔버거 관측기(Luenberger observer) 설계방법을 통해 간단한 방식으로 설계되며, 영구자석 동기모터의 파라미터를 추정하기 위해 이용된다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 공력토크 관측기를 이용하여 풍속의 정보를 간접적으로 추정하여 로터속도 비선형 파라미터를 온라인

(On-line) 또는 오프라인(Off-line) 으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 이용하여 풍력터빈의 발전기 응답속도를 빠르게 하고 출력파워를 향상 시키는 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어 방법 및 그 장치를 제공하는 데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0008] 상기의 과제를 달성하기 위한 본 발명의 일 실시 예에 따른 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어 장치는 발전기 회전속도를 제곱하여 최적모드 게인에 곱함으로써 토크지령을 생성하는 토크지령 생성부와, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부, 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산부와, 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산부와, 상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부를 포함한다.

[0009] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 로터속도 비선형 계산부는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산한다.

[0010] 본 발명의 일 실시 예에 따른 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법은, 발전기의 회전속도를 제곱하고 최적모드 게인에 곱하여 토크 지령을 생성하는 단계와, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정하는 단계와, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 단계와, 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성하는 단계와, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산하는 단계와, 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산하는 단계와 및 상기 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산하는 단계를 포함한다.

[0011] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 로터속도의 비선형 파라미터는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 계산된다.

[0012] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 생성된 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력은 발전기 정격속도 값을 갖는 최대값과, 발전기 특성에 의해 좌우되는 값으로 발전기 정격속도의 약 50 ~ 70%정도의 값을 갖는 최소값 사이에 포화되도록 설정된다.

[0013] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 게인상수는 0보다 큰 값을 사용한다.

발명의 효과

[0014] 본 발명에 따르면, 공력토크 관측기를 이용하여 풍속의 정보를 간접적으로 추정하여 로터속도 비선형 파라미터를 온라인(On-line) 또는 오프라인(Off-line)으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 이용하여 보다 정확한 풍력터빈의 제어가 이뤄질 수 있는 효과가 있다.

[0015] 또한, 로터속도의 비선형성 파라미터를 온라인(On-line) 또는 오프라인(Off-line)으로 계산 이를 이용하는 방법을 통해 발전기의 응답속도를 빠르게 하고 출력파워를 향상시킬 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0016] 도 1은 본 발명에 따른 토크제어의 구간에서 예를 표시하는 (최대 출력의 피치각이 0° , 최적 주속비 8.1, 최대 출력계수가 0.4662) 그래프.

도 2는 종래의 토크제어 방법인 최적모드게인 방법의 블록선도를 도시한 도면.

도 3은 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크 제어장치의 블록선도를 도시한 도면.

도 4는 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 off-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크 제어장치의 블록선도를 도시한 도면,

도 5는 공력토크를 추정하기 위한 일 예를 Simulink 모델로 구현한 도면.

도 6은 공력토크 추정을 이용하여 회전속도 기준입력 및 간접 풍속 추정을 생성하는 알고리즘을 설명한 도면.

도 7은 로터속도 비선형 파라미터를 on-line 계산하기 위한 일 예를 Simulink 모델로 구현한 도면.

도 8은 로터속도 비선형 파라미터를 off-line 계산하기 위한 일 예를 Simulink 모델로 구현한 도면.

도 9는 off-line으로 계산하기 위한 발전기속도 비선형 파라미터 값을 설명한 도면.

도 10은 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 사용한 블록선도의 도면.

도 11은 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 off-line으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 사용한 블록선도의 도면.

도 12는 풍속 추정을 위한 평균풍속 7m/s이고 난류강도 10%인 난류풍속을 구현한 일 예를 도시한 도면.

도 13은 공력토크 관측기를 이용하여 실제 등가의 공력토크와 추정된 등가의 공력토크를 나타낸 도면.

도 14는 공력토크 관측기를 이용하여 실제의 풍속과 추정된 풍속을 나타낸 도면.

도 15는 제어 성능 평가를 위한 평균풍속 6m/s이고 난류강도 26.97%인 난류풍속을 구현한 도면.

도 16은 평균풍속 6m/s이고 난류강도가 26.97%인 난류 풍속일때의 결과로 공력토크 관측기를 이용하여 off-line으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산하고 게인상수 2를 사용한 토크제어에 대한 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파워를 나타낸 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0017] 본 발명을 첨부된 도면을 참조하여 상세히 설명하면 다음과 같다. 여기서 동일한 구성에 대해서는 동일부호를 사용하며, 반복되는 설명, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있는 공지 기능 및 구성에 대한 상세한 설명은 생략한다. 본 발명의 실시형태는 당업계에서 평균적인 지식을 가진 자에게 본 발명을 보다 완전하게 설명하기 위해서 제공되는 것이다. 따라서, 도면에서의 요소들의 형상 및 크기 등은 보다 명확한 설명을 위해 과장될 수 있다.

[0018] 이하에서 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법 및 그 장치에 대해 상세하게 설명한다.

[0019] 도 3은 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크 제어장치의 블록선도를 도시한 도면이고, 도 4는 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 off-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크 제어장치의 블록선도를 도시한 도면이다. 상기 도 3 내지 도 4에 도시된 바와 같은 본 발명의 일 실시 예에 따른 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어 장치는 발전기 회전속도를 제곱하여 최적모드 게인에 곱함으로써 토크지령을 생성하는 토크지령 생성부와, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산부와, 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산부와, 상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부를 포함한다.

[0020] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 로터속도 비선형 계산부는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산한다.

[0021] 한편, 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 로터속도 비선형 계산부는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산한다.

[0022] 본 발명의 일 실시 예에 따른 공력토크 관측기를 이용한 풍력터빈의 토크제어방법은, 발전기의 회전속도를 제곱하고 최적모드 게인에 곱하여 토크 지령을 생성하는 단계와, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정하는 단계와, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 단계와, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성하는 단계와, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력간의 오차를 계산하는 오차 계산하는 단계와, 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 계산하는 단계와 및 상기 계산된 오차값과 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산하는 단계를 포함한다.

[0023] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 로터속도의 비선형 파라미터는 온라인(on-line) 또는 오프라인(off-line)으로 계산된다.

[0024] 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 생성된 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력은 발전기 정격속도 값을 갖는 최대값과, 발전기 특성에 의해 좌우되는 값으로 발전기 정격속도의 약 50 ~ 70%정도의 값을 갖는 최소값 사이에 포화되도록 설정된다. 본 발명의 일 실시 예에 따르면, 상기 게인상수는 0보다 큰 값을 사용한다.

[0025] 도 1은 토크제어 구간에서 사용되는 출력계수의 일 예를 도시한 그래프이다. 토크제어 구간에서의 출력계수는 피치각이 고정됨으로 $C_p(\lambda)$ 로 나타낼 수 있다. 토크제어 구간에서는 최대 출력계수가 나오는 지점인 최적주속비인 λ_{opt} 를 만들어 주는 것이 중요하다. 발전기 회전속도를 제어하기 위해 발전기 토크를 제어함으로써 최적 주속비를 유지하여 최대 출력계수가 생산될 수 있게 만들어준다.

[0026] [수학식 1]

[0027] $$P_r = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 C_p(\lambda(t),\beta(t))\,V^3(t)$$

[0028] [수학식 2]

[0029] $$T_r = \frac{1}{2}\rho\pi R^3 \frac{C_p(\lambda(t),\beta(t))}{\lambda(t)}\,V^2(t)$$

[0030] [수학식 3]

[0031] $$\lambda(t) = \frac{\Omega_r(t)R}{V(t)}$$

[0032] [수학식 4]

[0033] $$\Omega_g(t) = \Omega_r(t)N_{gb}$$

[0034] 여기서 λ 는 주속비, Ω_r 은 로터 회전속도, ρ 는 공기밀도, R 은 블레이드 길이, C_p 는 출력계수, V 는 풍속, β 는 피치각이다. 출력은 수학식 1로 공력 토크는 수학식 2와 같이 나타낸다. 출력계수 $C_p(\lambda,\beta)$ 는 주속비와 피치각의 함수이고 토크제어 구간에선 피치각이 고정됨으로 $C_p(\lambda)$ 로 나타낼 수 있다. 주속비는 수학식 3과 같이 정의된다. 기어박스가 적용된 풍력터빈의 경우 기어박스의 증속비(N_{gb})를 곱한값으로 된다.

[0035] 도 2는 종래에 사용되는 풍력터빈의 토크제어 방법을 도시한 블록선도이다. 즉, 발전기 회전속도를 되먹임하고 제곱한 후 최적모드게인인 K_{opt} 를 곱하여 풍력터빈에 토크입력으로 사용하였다. K_{opt} 는 수학식 5와 같이 정의된다.

[0036] [수학식 5]

[0037] $$T_g(t) = K_{opt}\Omega_g^2(t)$$

여기서 최적모드게인 $K_{opt} = \frac{\pi\rho R^5 C_{p,\max}}{2\lambda_{opt}^3 N_{gb}^3}$ 이다.

[0038] 하지만, 최적모드게인을 이용한 토크제어 방법을 사용할 때 다음과 같은 한계가 발생하게 된다. 풍력터빈의 더 많은 출력을 얻기 위해서 대형화되는 추세인데, 이에 따라 블레이드의 반경도 길어지게 된다. 블레이드의 길이 증가와 동시에 로터의 관성모멘트 또한 증가하여 토크시스템의 응답이 느려지게 된다. 최적모드게인 값은 풍력터빈의 블레이드의 공력특성 및 기어박스의 증속비가 결정되면 이에 따라 한 값으로 고정되므로 응답특성을 향상 시킬 수 없는 단점을 갖게 된다. 이를 개선하기 위하여 공력토크 관측기를 이용하고 로터속도 비선형 파라미터를 온라인(on-Line) 또는 오프라인(off-line)으로 계산하고 이를 제어게인으로 사용한 장치 및 방법을 도3 내지 도4와 같이 제시하였다.

[0039] 도 3은 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크제어방법을 위한 제어장치를 설명하고 있다. 종래의 방법으로 토크를 생성시킨 토크지령 생성부, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부, 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력 (Ω_{ref}) 간의 오차를 계산하는 오차 계산부와, on-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 on-line 계산부, 상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 on-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부를 포함하고 있다.

[0040] 도 4는 공력토크 관측기를 이용하여 로터속도 비선형 파라미터를 off-line으로 계산하고 이를 제어 게인으로 사용한 토크제어방법을 위한 제어장치를 설명하고 있다. 종래의 방법으로 토크를 생성시킨 토크지령 생성부, 공력토크 관측기를 이용하여 공력토크를 추정하는 공력토크 추정부, 상기 추정된 공력토크를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력을 생성하는 기준입력 생성부, 추정된 공력토크를 이용하여 풍속을 생성하는 풍속 생성부, 현 풍력터빈의 발전기 회전속도와 생성된 발전기 회전속도 기준입력 (Ω_{ref}) 간의 오차를 계산하는 오차 계산부와, off-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 계산하기 위한 로터속도 비선형 off-line 계산부, 상기 오차계산부에서 계산된 오차값과 on-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터에 게인상수를 곱하여 추가적으로 공급될 토크를 계산할 비례 제어부를 포함하고 있다.

[0041] [수학식 6]

[0042] $$O_p = \Omega_{ro}, \beta_o, V_o$$

[0043] [수학식 7]

[0044] $$T_r(t) = T_{ro}(t) + \delta T_r(t)$$

[0045] [수학식 8]

[0046] $$\delta T_r(t) = \left.\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)}\right|_{O_p} \cdot \delta\Omega_g(t) + \left.\frac{\partial T_r(t)}{\partial \beta(t)}\right|_{O_p} \cdot \delta\beta(t) + \left.\frac{\partial T_r(t)}{\partial V(t)}\right|_{O_p} \cdot \delta V(t)$$

[0047] 공력토크를 로터속도, 피치각, 풍속에 대한 동작점 O_p 를 수학식 6과 같이 두고, 이들의 동작점 근처에서의 발전기 회전속도, 피치각, 풍속의 변화를 각각 $\delta\Omega_g, \delta\beta, \delta V$ 로 두면 비선형적인 공력토크는 수학식 7과 같이 선형화 된다. 여기에서 T_{ro} 는 동작점에서의 공력토크이고 δT_r 은 동작점 근처에서 토크의 변화로 수학식 8과 같이 비선형 파라미터로 표현할 수 있다.

[0048] [수학식 9]

[0049] $$N_{\Omega_r}(t) = -\left.\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)}\right|_{O_p}$$

[0050] [수학식 10]

[0051] $$\frac{\partial \lambda(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{R}{V(t)}$$

[0052] [수학식 11]

[0053] $$\frac{\partial C_p(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)} \frac{\partial \lambda(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{R}{V(t)} \frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)}$$

[0054] [수학식 12]

[0055] $$\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)} = \frac{\pi R^2}{2}\left[-\frac{V^3(t)}{\Omega_r^2(t)}C_p(t) + \frac{RV^2(t)}{\Omega_r(t)}\frac{\partial C_p(t)}{\partial \lambda(t)}\right]$$

[0056] 여기서 N_{Ω_r}은 로터속도 비선형 파라미터이다. 토크제어 구간에선 한 값으로 고정되기 때문에 피치각에 대한 비선형 파라미터는 토크제어에 영향을 미치지 않게 된다. 토크제어 구간에서 특성을 파악하기 위해서는 수학식 9의 로터속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})를 알아야 하는데, 이는 공력토크를 로터속도에 대하여 편미분하면 구할 수 있다. 로터속도 비선형 파라미터는 물리적으로 감쇠역할을 함으로 마이너스 부호를 붙여서 표현한다. 로터속도의 비선형 파라미터를 구하기 위해서는 주속비와 로터속도에 대하여 편미분한 값과 출력계수를 로터속도에 대하여 편미분한 값은 수학식 10, 수학식 11과 같이 두어 표현하였다. 로터속도 비선형 파라미터는 수학식 10과 11을 적용하면 수학식 12과 같이 구할 수 있다.

[0057] [수학식 13]

[0058] $$J_{eq}\dot{\Omega}_g(t) + B_{eq}\Omega_g(t) = T_{eq}(t) - T_g(t)$$

[0059] [수학식 14]

[0060] $$J_{eq} = \frac{J_r}{N_{gb}^2} + J_g$$

[0061] [수학식 15]

[0062] $$T_{eq}(t) = \frac{T_r(t)}{N_{gb}}$$

[0063] [수학식 16]

[0064] $$B_{eq} = \frac{B_r}{N_{gb}}$$

[0065] 풍력터빈을 드라이버-트레인의 축강성을 고려하지 않고 1-질량 모델은 수학식 13과 같다. 발전기측에서 보면 수학식 14와 같이 등가 관성모멘트(J_{eq})는 로터 관성모멘트(J_r)의 기어비 제곱을 나누고 발전기 관성모멘트(J_g)를 더 한 만큼, 식 15와 같이 등가의 공력토크(T_{eq})는 공력토크(T_r)를 기어비 만큼, 수학식 14와 같이 등가의 감쇠(B_{eq})는 로터감쇠(B_r)를 기어비 만큼 차이가 발생된다.

[0066] [수학식 17]

[0067] $$J_{eq}\dot{\Omega}_g(t) + (B_{eq}(t) + \frac{1}{N_{gb}^2}\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)}\Big|_{O_s})\delta\Omega_g(t) = -\delta T_g(t) + \frac{1}{N_{gb}}\frac{\partial T_r(t)}{\partial \beta(t)}\Big|_{O_s} \cdot \delta N_\beta(t) + \frac{1}{N_{gb}}\frac{\partial T_r(t)}{\partial V(t)}\Big|_{O_s} \cdot \delta N_V(t)$$

[0068] [수학식 18]

[0069] $$B_{\Omega_s}(t) = \frac{1}{N_{gb}^2}\frac{\partial T_r(t)}{\partial \Omega_r(t)}\Big|_{O_s}, N_{\beta_s}(t) = \frac{1}{N_{gb}}\frac{\partial T_r(t)}{\partial \beta(t)}\Big|_{O_s}, N_{V_s}(t) = \frac{1}{N_{gb}}\frac{\partial T_r(t)}{\partial V(t)}\Big|_{O_s}$$

[0070] [수학식 19]

[0071] $$\frac{\delta\Omega_g(s)}{\delta T_g(s)} = \frac{-1}{J_{eq}s + B_{eq} + B_{\Omega_s}} \text{ (s)}$$

[0072] 발전기 가속도의 동작점($\dot{\Omega}_{go}$)근처에서의 변화를 $\delta\dot{\Omega}_g$, 발전기 회전속도의 동작점(Ω_{go})근처에서의 변화를 $\delta\Omega_{go}$, 등가의 공력와 발전기 토크의 동작점 근처에서의 변화를 각각 $\delta T_e, \delta T_g$로 두고 동작점에서의 특성을 이용하면 수학식 17과 같이 표현된다. 수학식 18은 각각의 로터속도 비선형 파라미터(N_{Ω_r})와 피치각 비선형 파라미터(N_β), 풍속 비선형 파라미터(N_{V_r})은 발전기측에서와 같이 기어비를 이용하여 발전기속도 비선형 파라미터(B_{Ω_s}), 피치각 비선형 파라미터(N_{β_s}), 풍속 비선형 파라미터(N_{V_s})로 표현된다. 선형화된 전달함수를 구하면 수학식 19와 같이 된다. 발전기속도 비선형 파라미터는 토크시스템에서 등가감쇠항을 크게하고 시상수를 작게하여 시스템의 응답특성을 향상시켜주는 역할을 한다.

[0073] [수학식 20]

[0074] $$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\Omega}_g(t) = -\frac{B_{eq}}{J_{eq}}\Omega_g(t) + \frac{T_{eq}}{J_{eq}}(t) - \frac{T_g}{J_{eq}}(t) \\ \dot{T}_{eq}(t) = -\frac{1}{T_t}T_{eq}(t) + \epsilon_1(t) \end{array} \right\}$$

[0075] [수학식 21]

[0076] $$y(t) = \Omega_g(t) + \eta_1(t)$$

[0077] 여기서 T_t는 공력토크의 시상수, ϵ_1은 입력 프로세스의 노이즈, η_1은 출력 신호 노이즈이다. 풍속을 간접적으로 추정하기 위해서는 공력토크의 정보를 추정하게 된다. 풍력터빈의 1-질량 모델과 추정 대상인 등가의 공력토크를 1차의 Markov 과정을 이용하여 미분 방정식으로 수학식 20과 같이 표현 가능하다. 그리고 출력은 발전기 회전속도와 출력신호의 잡음신호로 수학식 21과 같이 두었다. Luenberger 관측기 또는 Kalman Filter 관측기를 이용하며는 등가의 공력토크를 추정할 수 있다.

[0078] 도 5는 Matlab/Simulink를 이용하여 등가의 공력토크를 추정하기 위한 상태 관측기를 구현한 도면이다.

[0079] 도 6은 등가의 공력토크 관측기를 이용하여 발전기 회전속도 기준입력 및 풍속의 정보를 추정하는 알고리즘이다. 관측기는 센서를 통하여 취득 가능한 값인 발전기 토크(T_g)와 발전기 회전속도(Ω_g)의 입력신호로 사용한다. 수학식 15와 같이 추정된 등가의 공력토크($\hat{T}_{eq}$)에 기어비의 상관관계를 이용하면 추정된 공력토크($\hat{T}_r$)로도 이용 가능 하다. 추정된 등가의 공력토크로부터 수학식 5를 이용하여 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력($\Omega_{ref,v}$)을 생성할 수 있다. 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력($\Omega_{ref,v}$)은 수학식 3의 주속비를 이용하면 풍속의 정보($\hat{V}$)를 추정할 수 있다. 풍속추정을 위한 회전속도 기준입력($\Omega_{ref,v}$)을 이용하여 발전기 정격속도 값을 갖는 최대값($\Omega_{ref,\max}$)과, 발전기 특성에 의해 좌우되는 값으로 발전기 정격속도의 약 50 ~ 70%정도의 값을 갖는 최소값($\Omega_{ref,\min}$)사이에 포화되게 설정하여 발전기 회전속도 기준입력(Ω_{ref})을 생성한다.

[0080] 도 7은 Matlab/Simulink를 이용하여 on-line으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산한 도면이다. 수학식 10과 같이 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하기 위해서는 풍속, 로터속도, 출력계수, 출력계수를 주속비로 편미분한 값들의 정보가 필요하다. 이 정보중에 풍속의 정보는 공력토크관측기를 이용하여 추정된 풍속의 정보를 사용한다. 출력계수와 주속비로 편미분한 값은 Matlab의 편미분 함수를 이용하여 미리 계산된 값을 순람표

(Look-up Table)를 이용하였다. 발전기속도 비선형 파라미터($\hat{B}_{\Omega_r}$)는 수학식 9와 12로부터 로터속도 비선형 파라미터($\hat{N}_{\Omega_r}$)을 계산한 후 기어비의 제곱을 나누면 계산된다.

[0081] 도 8은 Matlab/Simulink를 이용하여 off-line으로 발전기속도 비선형 파라미터를 구현한 도면이다. 풍속의 입력을 주어 수학식 10과 같이 순람표를 이용하여 발전기속도 비선형 파라미터를 off-line으로 구현하였다.

[0082] 도 9는 off-line으로 계산하기 위한 발전기속도 비선형 파라미터 값을 설명한 도면으로, 순람표의 입력이 되는 풍속이 0.5m/s의 간격으로 4.5~9m/s일 때 발전기속도 비선형 파라미터를 각각의 포인트를 찍어 off-line 계산에 이용하였다.

[0083] 도 10은 최적모드게인을 이용한 토크제어방법에 추가적인 토크를 공급 해주기 위해서 추정된 공력토크를 이용하여 on-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 게인으로 사용한 토크제어방법의 블록선도이다. 등가의 공력토크를 추정하기 위해서 발전기 토크와 발전기 회전속도를 입력 신호로 되먹임 받아 사용하였다. 추정된 등가의 공력토크($\hat{T}_{ea}$)는 기어비(N_{gb})를 곱하여 공력토크($\hat{T}_r$)로 계산할 수 있다. 추정된 공력토크는 최적모드게인을 이용한 토크제어 방법의 수학식 5로 부터 발전기 회전속도 기준입력(Ω_{ref})을 만들 수 있다. 발전기 회전속도 기준입력으로부터 주속비 수학식 3을 이용하면 풍속의 정보를 추정할 수 있다. 추정된 풍속과 되먹임된 발전기 회전속도로부터 로터속도 비선형 파라미터를 on-line으로 계산하기 위해서 이용된다. 발전기 회전속도와 발전기 회전속도 기준입력의 오차가 발생될 때, On-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 게인으로 사용하여 발전기의 추가적인 토크를 공급해주는 방법이다. 게인상수(α_g)를 양의값을 사용하면 발전기 응답을 더 가속화 하여 출력파워의 응답특성을 향상시키는 효과를 갖는다.

[0084] 도 11은 최적모드게인을 이용한 토크제어방법에 추가적인 토크를 공급 해주기 위해서 추정된 공력토크를 이용하여 off-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 게인으로 사용한 토크제어방법의 블록선도이다. 등가의 공력토크를 추정하기 위해서 발전기 토크와 발전기 회전속도를 입력 신호로 되먹임 받아 사용하였다. 추정된 공력토크는 최적모드게인을 이용한 토크제어 방법의 수학식 5로부터 발전기 회전속도 기준입력을 만들 수 있다. 발전기 회전속도 기준입력으로부터 주속비 수학식 3을 이용하면 풍속의 정보를 추정할 수 있다. 추정된 풍속과 되먹임된 발전기 회전속도로부터 로터속도 비선형 파라미터를 off-line으로 계산하기 위해서 이용된다. 발전기 회전속도와 발전기 회전속도 기준입력의 오차가 발생될 때, Off-line으로 계산된 로터속도 비선형 파라미터를 게인으로 사용하여 발전기의 추가적인 토크를 공급해주는 방법이다. 게인상수(α_g)를 양의 값을 사용하면 발전기 응답을 더 가속화 하여 출력파워의 응답특성을 향상시키는 효과를 갖는다.

[0085] 도 12는 풍속 추정을 위해 평균풍속 7m/s이고 난류강도가 10% 풍속을 구형한 도면으로, 공력토크 및 풍속정보를 추정하는데 이용한 풍속을 나타내는 도면이다. 실제의 풍속과 유사한 성질을 갖고 있는 난류풍속을 구현함으로써 상태 관측기의 성능평가를 할 수 있다.

[0086] 도 13은 공력토크 추정을 위하여 관측기를 설계하고 실제의 등가의 공력토크와 추정된 등가의 공력토크의 결과를 비교한 도면이다. 전체적인 주파수 성분을 좌우하는 저주파 성분은 추정 잘 됨을 확인하였다. 최대 등가의 공력토크의 오차는 약 0.8kNm의 오차가 발생되었다. 관측기의 게인을 높이면 고주파성분이 추정됨을 확인해 볼 수 있었지만 센서의 노이즈 민감성을 고려하여 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

[0087] 도 14는 공력토크 관측기를 이용하여 실제의 풍속 추정된 풍속을 나타낸 도면이다. 전체적인 주파수 성분을 좌우하는 저주파 성분은 추정 잘 됨을 확인하였다. 최대 풍속의 오차가 약 0.9m/s의 오차가 발생되었다. 관측기 게인을 높이면 고주파성분이 추정됨을 확인해 볼 수 있었지만 센서의 노이즈 민감성을 고려하여 다음과 같은 결과를 도출 하였다.

[0088] 도 15는 제어 성능 평가를 위한 평균풍속 6m/s이고 난류강도 26.97%인 난류풍속을 구현한 도면이며, IEC(International Electrotechnical Commission) 61400-1에서 규정하고 있는 Class A급에 적용하는 평균풍속이 6m/s이고 난류강도가 26.97%인 난류 풍속을 구현 하였다. 구현된 난류 풍속은 실제의 풍속과 유사한 주파수 성질을 갖고 있는 난류풍속을 구현함으로써 추정된 공력토크를 이용한로터속도 비선형 파라미터를 On-line 또는 Off-line으로 계산하고, 이를 제어 게인으로 사용하는 토크제어 방법의 성능평가를 할 수 있다.

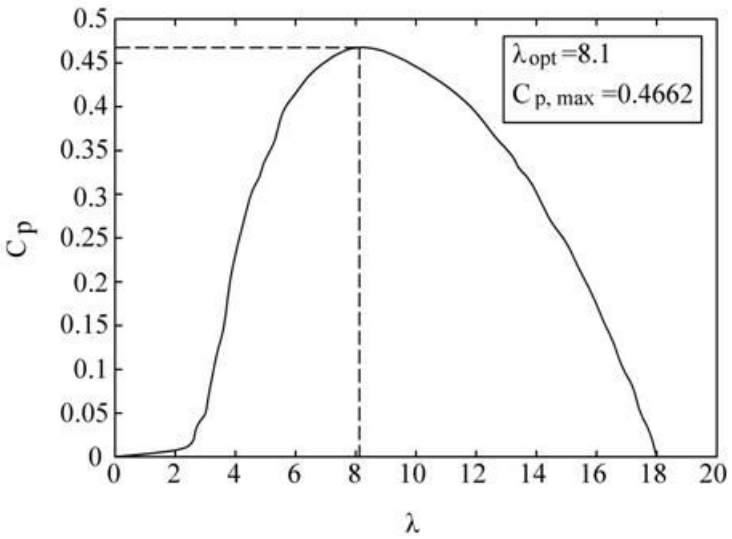
[0089] 도 16은 평균풍속 6m/s이고 난류강도가 26.97%인 난류 풍속일때의 결과로 추정된 공력토크를 이용하고 off-line

으로 로터속도 비선형 파라미터를 계산하고 게인상수 2를 사용한 토크제어에 대한 발전기 회전속도, 발전기 토크, 출력파워를 나타낸 도면으로서, 평균풍속이 6m/s이고 난류강도가 26.97%인 풍속을 입력신호로 하고 게인상수(α_g)의 2를 사용하였을 때의 결과이다. 추가적인 토크의 공급으로 발전기 회전속도와 토크의 과도 상태 응답이 향상시킴을 확인해 볼 수 있다. 정량적인 값으로 확인해 보면 게인상수 2를 사용하였을 때 약 1.22%의 평균값을 향상 시켰고, 게인상수 4를 사용하였을 때 1.77%의 출력파워 향상시킴을 확인하였다.

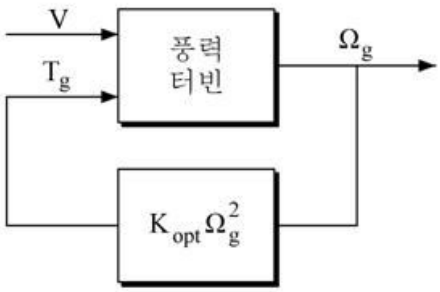
[0090] 이상의 설명은 본 발명의 기술 사상을 예시적으로 설명한 것에 불과한 것으로서, 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위 내에서 다양한 수정, 변경 및 치환이 가능할 것이다. 따라서, 본 발명에 개시된 실시예 및 첨부된 도면들은 본 발명의 기술 사상을 한정하기 위한 것이 아니라 설명하기 위한 것이고, 이러한 실시예 및 첨부된 도면에 의하여 본 발명의 기술 사상의 범위가 한정되는 것은 아니다. 본 발명의 보호 범위는 아래의 청구범위에 의하여 해석되어야 하며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 기술 사상은 본 발명의 권리범위에 포함되는 것으로 해석되어야 할 것이다.

도면

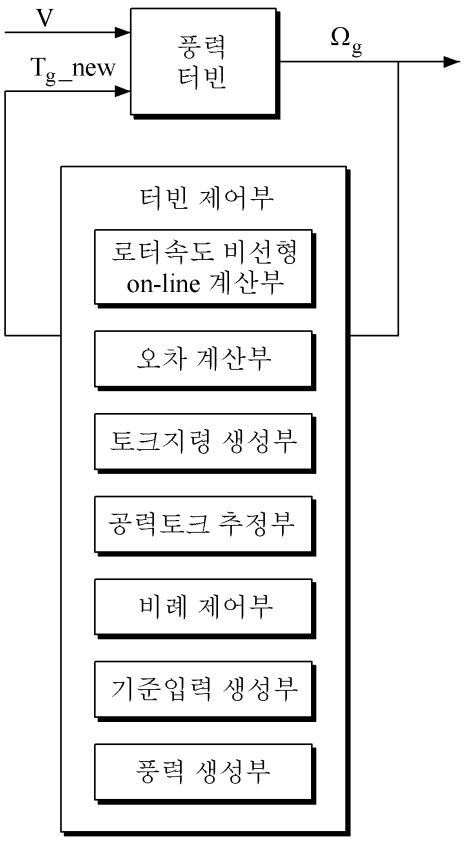
도면1



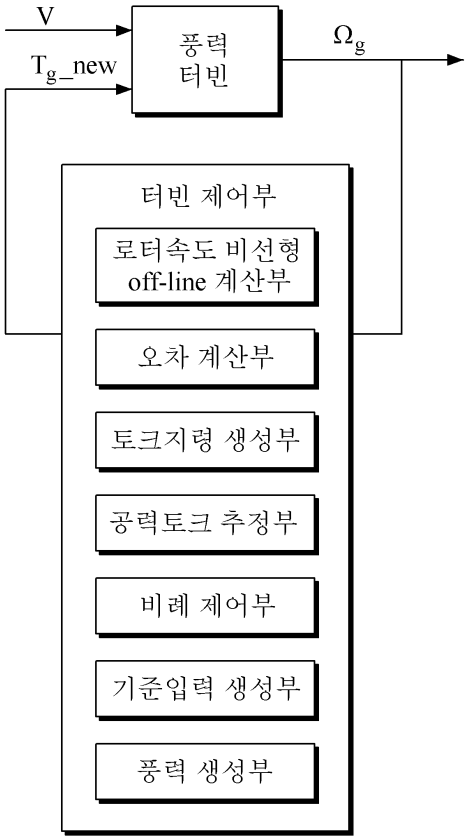
도면2



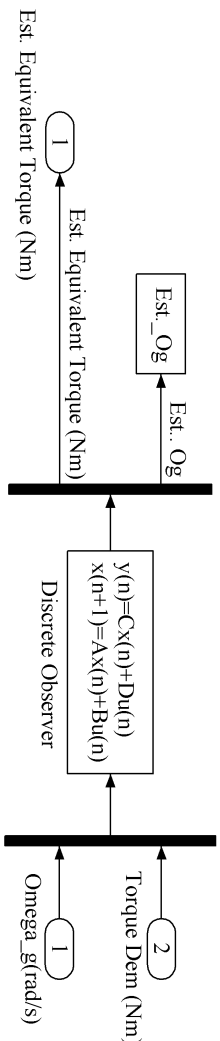
도면3


V
T_{g_new}
풍력
터빈
Ω_g
터빈 제어부
로터속도 비선형
on-line 계산부
오차 계산부
토크지령 생성부
공력토크 추정부
비례 제어부
기준입력 생성부
풍력 생성부

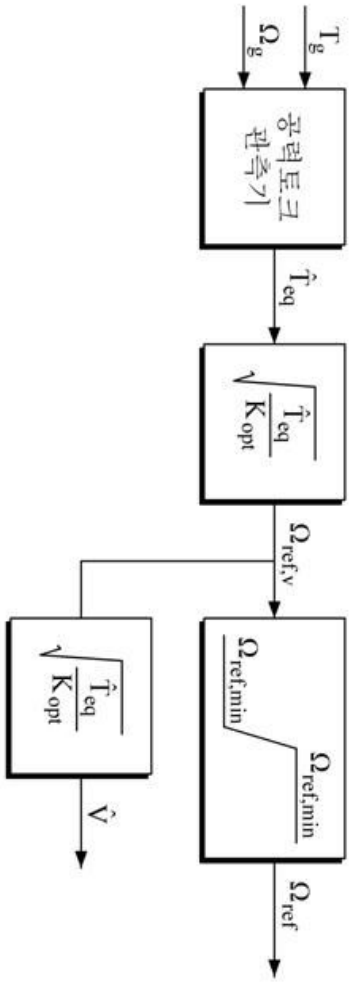
도면4


V
T_{g_new}
풍력
터빈
Ω_g
터빈 제어부
로터속도 비선형
off-line 계산부
오차 계산부
토크지령 생성부
공력토크 추정부
비례 제어부
기준입력 생성부
풍력 생성부

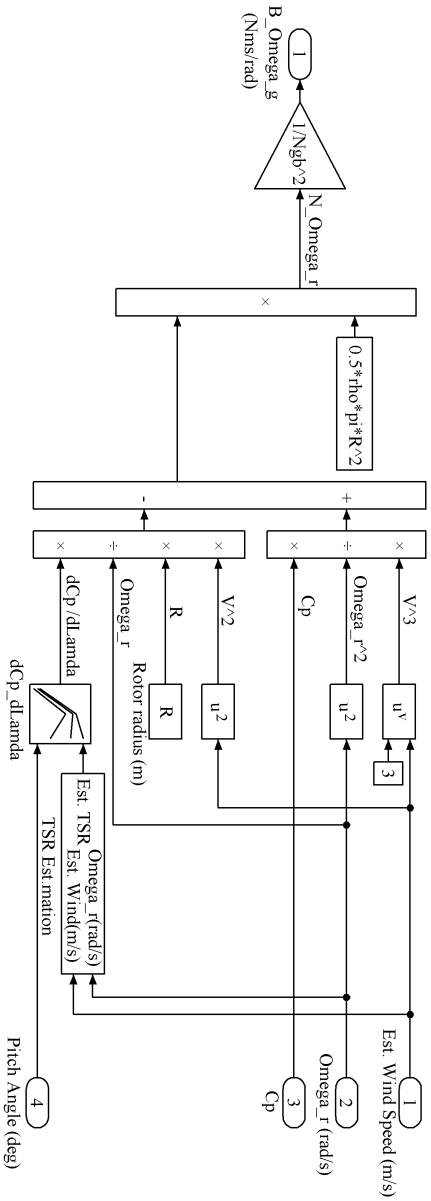
도면5


Est. Equivalent Torque (Nm)
1
Est. Equivalent Torque (Nm)
Est_Og
Est.. Og
y(n)=Cx(n)+Du(n)
x(n+1)=Ax(n)+Bu(n)
Discrete Observer
Omega_g(rad/s)
1
Torque Dem (Nm)
2

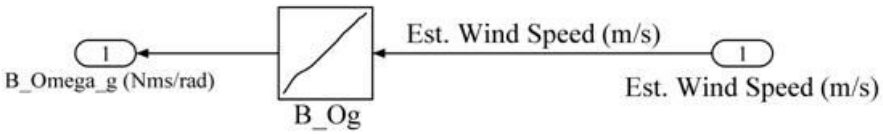
도면6


Tg
Ωg
공력토크 관측기
T̂eq
√(T̂eq / Kopt)
Ωref,v
Ωref,min
Ωref,min
Ωref
√(T̂eq / Kopt)
V̂

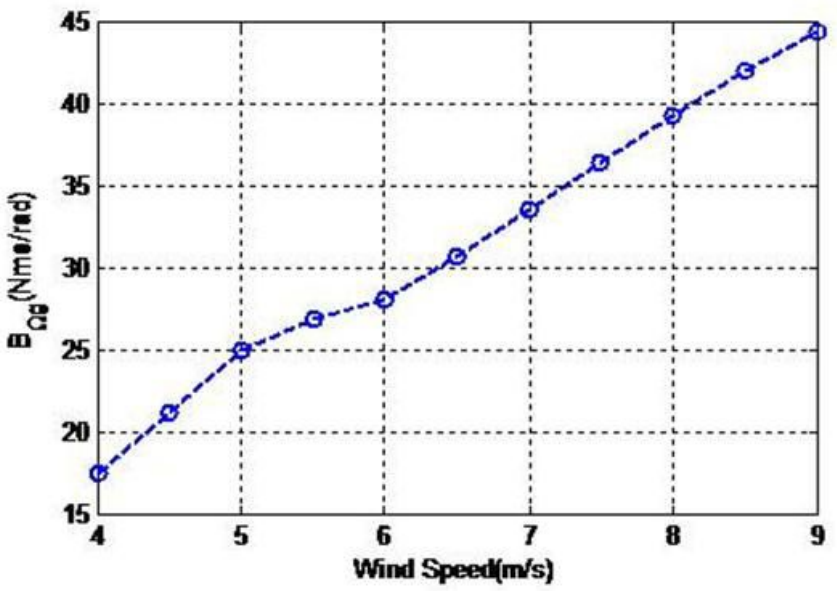
도면7


B_Omega_g (Nms/rad)
1
1/Ngb^2
N_Omega_r
×
0.5*rho*pi*R^2
-
+
×
÷
×
×
×
÷
×
dCp /dLamda
Omega_r
R
V^2
Cp
Omega_r^2
V^3
dCp_dLamda
Rotor radius (m)
R
u^2
u^2
u^v
3
Est. TSR Omega_r(rad/s)
Est. Wind(m/s)
TSR Est.mation
Pitch Angle (deg)
4
Cp
3
Omega_r (rad/s)
2
Est. Wind Speed (m/s)
1

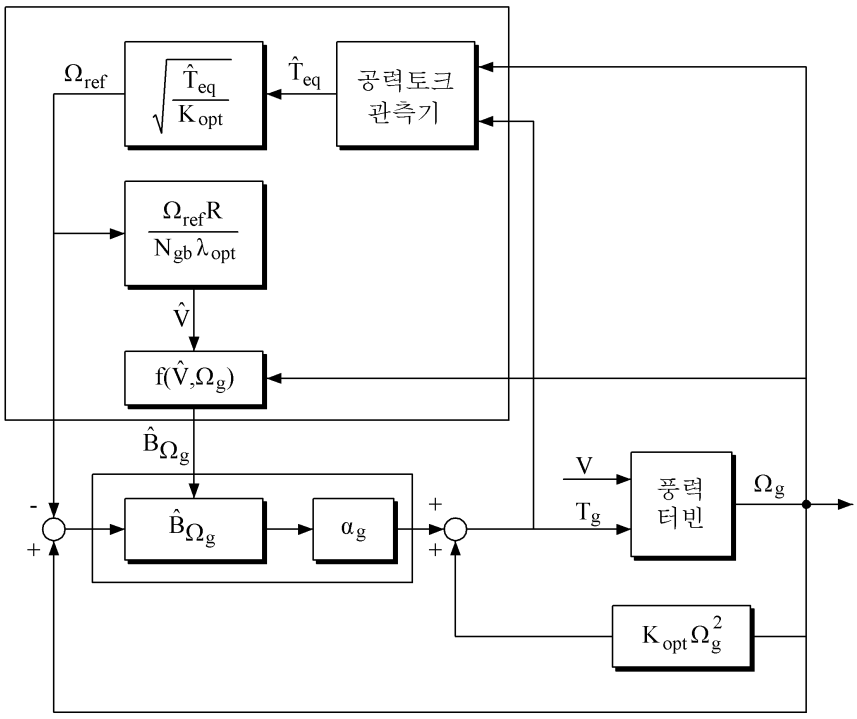
도면8


1
B_Omega_g (Nms/rad)
B_Og
Est. Wind Speed (m/s)
1
Est. Wind Speed (m/s)

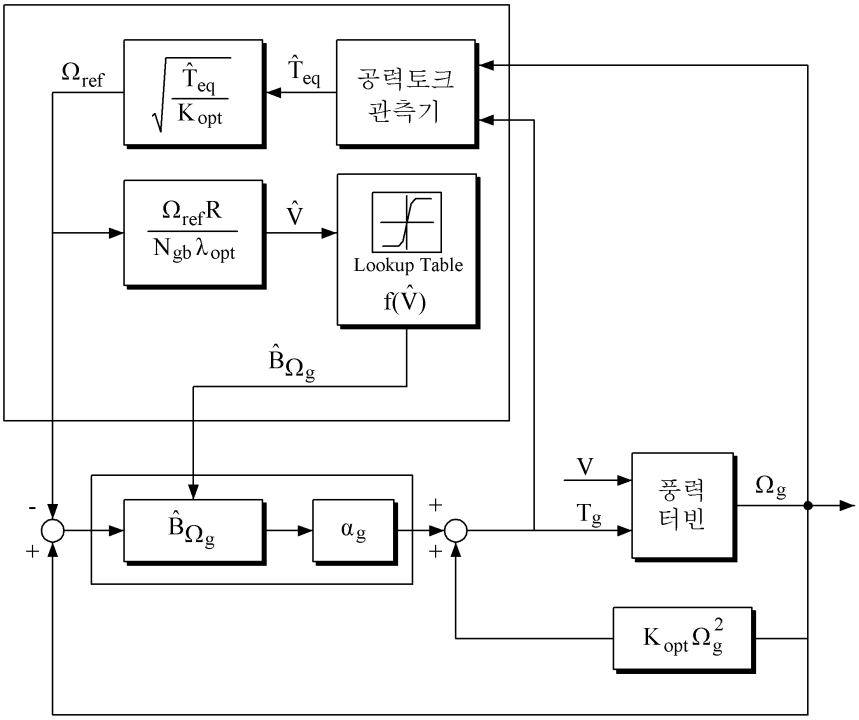
도면9


45
40
35
30
25
20
15
4
5
6
7
8
9
Wind Speed(m/s)

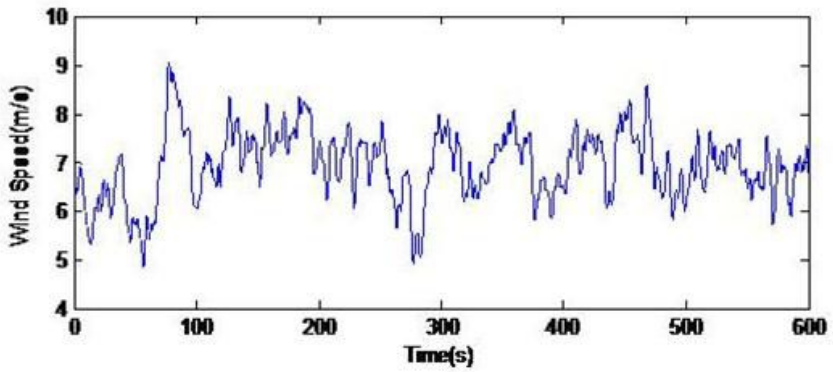
도면10


Ωref
T̂eq
공력토크
관측기
ΩrefR
NgbλOpt
V̂
f(V̂,Ωg)
B̂Ωg
V
Tg
풍력
터빈
Ωg
αg
KOptΩg2

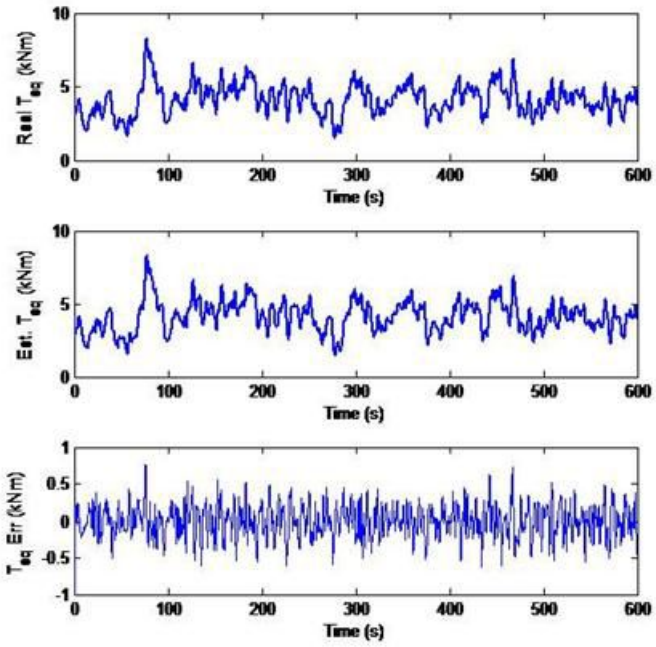
도면11


Ω_{ref}
$\sqrt{\frac{\hat{T}_{eq}}{K_{opt}}}$
$\hat{T}_{eq}$
공력토크
관측기
$\frac{\Omega_{ref}R}{N_{gb}\lambda_{opt}}$
$\hat{V}$
Lookup Table
$f(\hat{V})$
$\hat{B}_{\Omega_g}$
-
+
+
+
$\hat{B}_{\Omega_g}$
α_g
V
T_g
풍력
터빈
Ω_g
$K_{opt}\Omega_g^2$

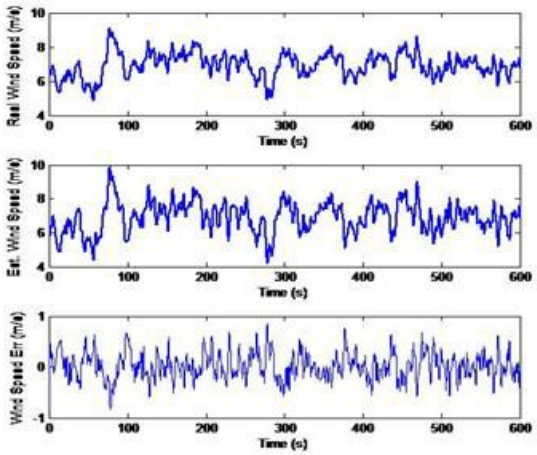
도면12


Wind Speed(m/s)
Time(s)
10
9
8
7
6
5
4
0
100
200
300
400
500
600

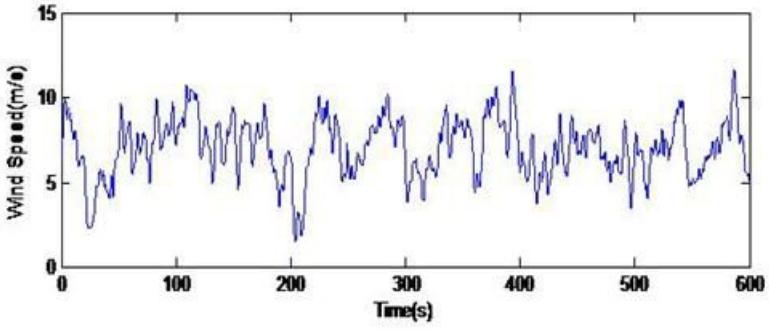
도면13



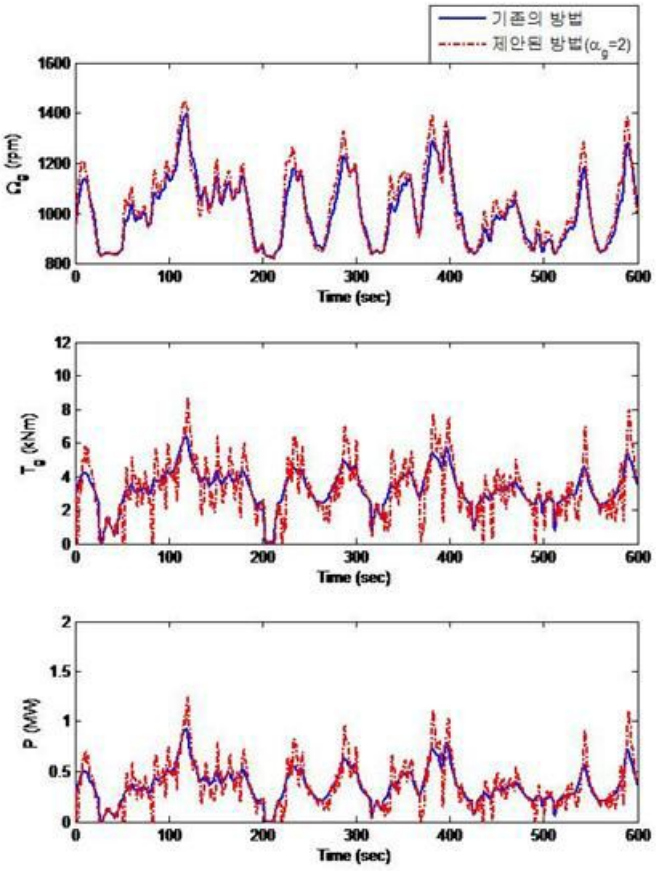
도면14



도면15



도면16


기존의 방법
제안된 방법(α_g=2)
Ω_g (rpm)
Time (sec)
T_g (KNm)
Time (sec)
P (MW)
Time (sec)