



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2017년05월29일
(11) 등록번호 10-1741268
(24) 등록일자 2017년05월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
F03D 7/02 (2006.01) F03D 7/04 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2011-7028081
(22) 출원일자(국제) 2010년04월26일
심사청구일자 2015년04월23일
(85) 번역문제출일자 2011년11월24일
(65) 공개번호 10-2016-0133578
(43) 공개일자 2016년11월23일
(86) 국제출원번호 PCT/GB2010/000836
(87) 국제공개번호 WO 2010/122316
국제공개일자 2010년10월28일
(30) 우선권주장
0907132.5 2009년04월24일 영국(GB)
(56) 선행기술조사문헌
JP2003070296 A*
KR1020060120627 A*
GB2378679 A
GB2442719 A
*는 심사관에 의하여 인용된 문헌

(73) 특허권자
하이원드 에이에스
노르웨이 스타방게르 엔-4035 포루스빈 50
(72) 발명자
스카레 뵤른
노르웨이 엔-7619 스크군 포스트박스 177
(74) 대리인
김진희, 김태홍

전체 청구항 수 : 총 27 항

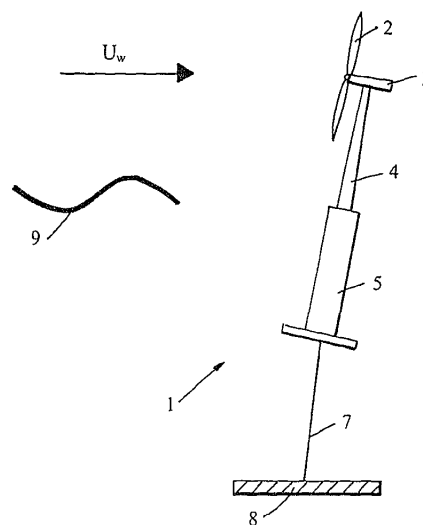
심사관 : 김희영

(54) 발명의 명칭 풍력 터빈 설비의 파도 에너지 추출

(57) 요약

부유식 풍력 터빈용 제어기가 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 구성된다. 제어기는 파랑 운동에 응답하여 로터 속도가 변하도록 로터에 인가되는 하중 토크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도를 제어한다.

대표도 - 도15



명세서

청구범위

청구항 1

부유식 풍력 터빈용 제어기로서,

풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출할 수 있도록 하며,

로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변하도록 로터에 인가되는 하중체의 토오크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도를 제어하고,

상기 토오크를 터빈의 타워 속도에 기초하여 제어하는 것인 제어기.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 파랑 진동 중에 터빈이 제어되는 동안 터빈의 블레이드 피치가 최소 설정 값으로 유지될 수 있도록 배치되는 것인 제어기.

청구항 3

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 터빈 구조물이 파랑 진동으로 이동함에 따라 터빈의 로터 속도가 최적의 날개 끝 속도 비를 유지할 수 있도록 배치되는 것인 제어기.

청구항 4

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 토오크가 터빈의 운동을 지시하는 입력 값에 기초하여 제어되는 것인 제어기.

청구항 5

제 4 항에 있어서, 입력 신호는 구조물의 타워 상부 속도에 기초하는 것인 제어기.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 타워 속도에 기초한 신호는, 기준 날개 끝 속도 비에 기초하여 타워의 파랑 운동으로 인한 기준 로터 속도의 성분을 결정하는 데에 사용되는 것인 제어기.

청구항 7

제 6 항에 있어서, 기준 로터 속도가 정상 상태 바람 성분과 파랑 성분의 총계로서 정의되며, 기준 속도는 기준 토오크를 산출하는 데에 사용되는 것인 제어기.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 상기 제어기는 필요한 토오크의 두 개의 구성 성분을 산출하며, 하나의 성분은 저역 통과 여파 로터 속도 바람 성분에 기초하며 하나의 성분은 파랑 로터 속도 성분에 기초하고, 두 개의 성분의 총계가 획득되어 기준 토오크 값을 생성하는 것인 제어기.

청구항 9

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 제 1 및 제 2 분기부를 구비한 제어 루프를 포함하며,

상기 제 1 분기부는 입력 값으로서 터빈의 로터 속도를 갖고, 저역 통과 여파기가 제 1 분기부에 적용되고, 기준 토오크의 개개의 성분이 여파 값을 사용하여 획득되며;

상기 제 2 분기부는 입력 값으로서 로터 속도와 기준 로터 속도 사이의 차이를 갖고, 비례 또는 비례 미분 제어를 사용하여 기준 토오크의 개개의 성분을 산출하도록 배치되고;

두 개의 분기부의 출력 값의 총계가 획득되어 기준 토오크 값을 결정하는 것인 제어기.

청구항 10

제 1 항 또는 제 2 항에 있어서, 측정 타워 속도 및 추정 평균 풍속을 나타내는 신호에 대한 입력 값을 갖는 것인 제어기.

청구항 11

제 10 항에 있어서, 실제 로터 속도 값이 기준 로터 속도와 비교되는 신호 제어 루프를 포함하며, 상기 기준 로터 속도는 타워 속도와 평균 풍속에 기초하며, 상기 비교에 따른 차이가 비례 또는 비례 미분 제어기를 사용하여 기준 토크 값을 결정하는 데에 사용되는 것인 제어기.

청구항 12

제 1 항 또는 제 2 항에 따른 제어기를 포함하는 것인 풍력 터빈.

청구항 13

부유식 풍력 터빈 구조물로서,

풍력 터빈이 장착되는 부력 타워와 제어기를 포함하며,

상기 풍력 터빈은 풍력 터빈에 토크를 인가하는 하중체를 구동하도록 배치되고 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 구성되며,

상기 제어기는 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변하도록 하중체의 토크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도를 제어하고,

상기 토크가 터빈의 타워 속도에 기초하여 제어되는 것인 부유식 풍력 터빈 구조물.

청구항 14

부유식 풍력 터빈 제어 방법으로서,

풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 부유식 풍력 터빈을 제어하며,

터빈의 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변하도록 로터에 인가되는 하중체의 토크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도가 제어되고,

상기 토크가 터빈의 타워 속도에 기초하여 제어되는 것인 제어 방법.

청구항 15

제 14 항에 있어서, 파랑 진동 중에 터빈이 제어되는 동안 터빈의 블레이드 피치가 최소 설정 값으로 유지되는 것인 제어 방법.

청구항 16

제 14 항 또는 제 15 항에 있어서, 터빈 구조물이 파랑 진동으로 이동함에 따라 상기 터빈의 로터 속도가 최적의 날개 끝 속도 비로 유지될 수 있는 것인 제어 방법.

청구항 17

제 14 항 또는 제 15 항에 있어서, 상기 토크가 터빈의 운동을 지시하는 입력 값에 기초하여 제어되는 것인 제어 방법.

청구항 18

제 17 항에 있어서, 입력 신호는 구조물의 타워 상부 속도에 기초하는 것인 제어 방법.

청구항 19

제 18 항에 있어서, 타워 속도에 기초한 신호는, 기준 날개 끝 속도 비에 기초하여 타워의 파랑 운동으로 인한 기준 로터 속도의 성분을 결정하는 데에 사용되는 것인 제어 방법.

청구항 20

제 19 항에 있어서, 기준 로터 속도가 파랑 성분과 정상 상태 바람 성분의 총계로서 정의되며, 기준 속도가 기준 토오크를 산출하도록 사용되는 것인 제어 방법.

청구항 21

제 20 항에 있어서, 필요한 토오크의 두 개의 성분을 산출하는 단계를 포함하며, 하나의 성분은 저역 통과 여과 로터 속도 바람 성분에 기초하며 하나의 성분은 파랑 로터 속도 성분에 기초하고, 두 개의 성분의 총계가 획득되어 기준 토오크 값을 생성하는 것인 제어 방법.

청구항 22

제 14 항 또는 제 15 항에 있어서,

제 1 및 제 2 분기부를 구비한 제어 루프를 마련하는 단계와;

제 1 분기부에 터빈의 로터 속도를 입력하여, 저역 통과 여과기를 제 1 분기부에 적용함으로써, 여과 값을 사용하여 기준 토오크의 개개의 성분을 획득하는 단계와;

제 2 분기부에 로터 속도와 기준 로터 속도 사이의 차이를 입력하여, 비례 또는 비례 미분 제어기를 사용하여 기준 토오크의 개개의 성분을 산출하는 단계; 그리고

기준 토오크 값을 결정하도록 두 개의 분기부의 출력 값의 총합을 획득하는 단계를 포함하는 것인 제어 방법.

청구항 23

제 14 항 또는 제 15 항에 있어서, 측정 타워 속도와 추정 평균 풍속을 나타내는 신호를 입력하는 단계를 포함하는 것인 제어 방법.

청구항 24

제 23 항에 있어서,

실제 로터 속도 값이 타워 속도와 평균 풍속에 기초하는 기준 로터 속도와 비교되는 단일 제어 루프를 제공하는 단계; 그리고,

비례 또는 비례 미분 제어기를 사용하여 기준 토오크 값을 결정하도록 상기 비교에 따른 차이를 사용하는 단계를 포함하는 것인 제어 방법.

청구항 25

컴퓨터 판독 가능한 기록 매체로서,

프로세서에 의한 실행시 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 상기 프로세서가 부유식 풍력 터빈 구조물을 제어하도록 하는 지시를 포함하는 소프트웨어 제품을 구비하고,

로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 터빈의 로터 속도가 로터에 인가되는 하중체 토오크를 제어함으로써 제어되고,

상기 토오크가 터빈의 타워 속도에 기초하여 제어되는 것인 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체.

청구항 26

제 25 항에 있어서, 상기 소프트웨어 제품은 물리적 데이터 캐리어인 것인 컴퓨터 판독 가능한 기록 매체.

청구항 27

물리적 캐리어 형태의 소프트웨어 제품을 제조하기 위한 방법으로서,

프로세서에 의한 실행시 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 상기 프로세서가 부유식 풍력 터빈 구조물을 제어하도록 하는 데이터 캐리어 지시를 저장하는 단계를 포함하며,

로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화도록 터빈의 로터 속도가 로터에 인가되는 하중체의 토오크를 제어함으로써 제어되고,

상기 토오크가 터빈의 타워 속도에 기초하여 제어되는 것을 특징으로 하는 제조 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 부유식 풍력 터빈 분야에 관한 것이다. 특히, 본 발명은 파랑 운동으로부터 얻어지는 에너지를 최대한화하는 부유식 풍력 터빈 설비용 제어 시스템에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 풍력 터빈 설비는 보통, 세장형 타워를 포함하는 지지 구조물로 형성되며, 지지 구조물의 상단에 나셀(nacelle)과 로터가 부착되어 있다. 발전기와 관련 전자 장비는, 지지 구조물의 베이스와 같은 다른 장소에 배치될 수도 있지만, 보통 나셀에 배치된다.

[0003] 육지나 해저에 고정되는 베이스 고정형 풍력 터빈에 대해서는 잘 알려져 있다. 그러나, 최근 부유식 풍력 터빈의 개발이 요구되어 왔으며 다양한 구조물이 제안되어 왔다. 종래 기술의 풍력 터빈의 일 예로서, 플랫폼이나 부잔교 형태 구조물과 같은 부력 베이스 상에 장착되는 풍력 터빈 설비가 있다. 다른 제안 구조물로는 "원주 부표(spar buoy)" 유형 구조물이 있다. 이러한 구조물은 로터가 상부에 장착되는 세장형 부력 지지 구조물로 형성된다. 지지 구조물은 단일 구조물일 수도 있으며, 또는 상부에 표준 타워가 장착되는 세장형 서브-구조물(종래 기술의 원주 부표와 유사)일 수도 있다.

[0004] 부유식 풍력 터빈 설비는, 예를 들어, 원하는 설치 장소에 유지될 수 있도록, 닻을 이용하여 하나 이상의 계류(mooring) 라인을 통해 해저에 정박될 수도 있으며, 또는 하나 이상의 관절식(힌지형) 레그를 이용하여 해저에 부착될 수도 있다.

[0005] 종래 기술의 풍력 터빈에 있어서, 로터 속도를 제어하여 출력 동력이 조절된다. 로터 속도 제어 방식은 풍속이 이른바 터빈의 정격 풍속보다 높은지 또는 낮은지에 좌우된다. 풍력 터빈과 풍속이 주어지는 경우, 공기 역학은 터빈의 동력 계수(C_p)에 좌우된다. 공기 역학은 블레이드 피치 각(β)과 날개 끝 속도 비(λ)의 함수이다. 속도 비는 로터 블레이드 외측 끝단의 이동 속도를 풍속으로 나눈 속도로서 정의된다. 어느 터빈이나 보통 8 내지 10의 특징적인 최적의 날개 끝 속도 비(C_p 가 최대 값을 갖는 경우)를 갖추고 있다.

[0006] 터빈의 정격 풍속은 최대 동력이 발생될 수 있는 최저 풍속이다. 정격 풍속 아래의 바람으로 작동하는 경우, 제어 목적은 출력 동력을 최대화하는 것으로 따라서 동력 계수가 최대화되어야 한다. 이 최대 동력 계수가 날개 끝 속도 비 최적 값에 해당한다. 이러한 작동 체제가 최대 동력 체제로 알려져 있다.

[0007] 날개 끝 속도 비는 블레이드 피치 각을 조절하여 터빈에 의해 생성되는 공기 역학 토오크를 변경하는 방식으로, 또는 로터에 인가되는 발전기 하중 토오크를 조절하는 방식으로 최적화될 수도 있다. 전자의 방식을 이용하는 장치가 바람직한데, 그 이유는 블레이드 피치를 최소($\beta=0$) 피치 각(즉, 가장 하치 각)에 설정하는 것을 가능하게 하여, 동력 계수(C_p)를 최대화하기 때문이다. 블레이드 피치 각이 주어지는 경우, 동력 계수를 최대화하기 위해 터빈에 인가되는 토오크는 로터 각 속도의 제곱에 비례함을 알 수 있다.

[0008] 반대로, 정격 풍속을 초과하여 작동하는 경우, 풍속 변화와 상관없이 일정한 동력 출력 값을 생성할 목적으로 블레이드 피치가 조절됨으로써, 발전기 및/또는 관련 전자 장비에 손상을 줄 수 있는 과도하게 높은 동력 출력 값을 방지하게 된다. 이러한 일정한 동력을 풍력 터빈의 정격 동력이라 한다. 따라서, 공기 역학 토오크를 줄이기 위하여, 또한, 일정한 동력을 유지하기 위하여, 풍속이 증가함에 따라, 블레이드 피치가 증가되며, 즉, 풍향에 보다 평행한 형태로 된다. 발전기의 토오크가 가변적인 경우, 토오크가 증가될 수 있어 터빈이 의도한 최대 속도에 도달하는 경우에도 출력 동력이 증가하도록 할 수 있다. 사실, 원활한 발전기 동력 생산을 달성하기 위하여 정격 풍속을 초과하는 발전기 토오크와 피치를 변경할 수 있으며 이러한 변경은 매우 일반적으로 이루어지고 있다. 또한, 발전기 토오크(T_G)는 통상적으로 $T_G = P_{Gmax} / \omega_G$ 에 따라 제어되며, 여기서, P_{Gmax} 는 최대(또는 정

격) 발전기 동력이며, ω_g 는 발전기 속도이다.

- [0009] 부유식 풍력 터빈은 터빈에 작용하는 흐름, 바람 및 파도의 영향으로 불가피하게 상당히 이동하게 된다. 특히, 파도로 인해 타워가 대략 0.05 Hz 내지 0.2 Hz의 주파수에서 진동하게 된다. 이러한 진동은 강제 운동이다(수직력이 결합된 측방 서지력에 의해 발생하지만 주로 수직력에 의해서 발생). 보통, 이러한 진동의 크기는 부유식 풍력 터빈의 기하학적 형상 및 중량 분포를 변경함으로써 최소화된다.
- [0010] 그러나, 풍력 터빈에 의해 파도로부터 에너지가 추출될 수 있는 것으로 인식되어 왔다. 제 WO 2005/021961 호에 개시된 바와 같이, 터빈은 파랑 운동용 감쇄 기구로서 작용할 수 있으며, 따라서, 파도로부터 에너지를 추출할 수 있다. 파도로부터 추출되는 에너지의 양은 풍력 터빈의 블레이드를 순간 풍속과 로터 블레이드와의 상대적인 관계에 따라 어떻게 제어하는지에 달려 있다. 특히, 상대 풍속이 증가할수록 추력과 동력 계수가 증가하도록 블레이드 피치를 타워의 운동에 응답하여 제어하는 방식이 제안되고 있다(추력 계수가 증가할 경우 로터 영역에 작용하는 추력이 증가되도록 한다). 상기 출원은 또한, 시스템이 파도에 응답하여 진동하는 경우 최대 에너지가 추출되는 점을 지적하고 있다.
- [0011] 이러한 방식으로 파도 에너지를 추출하는 것은 정격 풍속(최대 동력 체제) 아래에서 작동하는 경우에만 유용함을 알 수 있을 것이다. 풍속이 정격 풍속보다 높은 경우, 최대 출력 동력은 단지 풍력 에너지로부터만 얻어질 수 있다.
- [0012] 통상의 터빈 제어와 관련하여 전술한 바와 같이, 이러한 영역에서는, 최적의 날개 끝 속도를 유지하도록(즉, 동력 계수를 최대화하도록) 블레이드 피치가 아닌 발전기 토오크가 조절되는 것이 바람직하다. 최적의 토오크 값은 로터 속도의 함수이므로, 종래 기술의 제어를 사용하여 정상 상태에서 획득될 수 있다. 그러나, 종래 기술의 제어의 경우, 상대 풍속 변화와 토오크 조절 사이에 상당한 지연 시간이 존재한다. 이것은 공지되어 있는 제어 시스템 본연의 문제로서, 풍속 변화로부터 해당 로터의 속도(측정 속도) 변경까지 상당히 큰 시정수가 존재하기 때문이다. 첫째, 풍속 변화와 이에 의해 유발되는 공기 역학 토오크 변경 사이에 지연 시간이 존재하며, 둘째, 로터의 관성 모멘트가 크기 때문에, 공기 역학 토오크 변화와 로터 속도 변경 사이에 지연 시간이 존재한다.
- [0013] 종래 기술의 풍력 터빈 제어에 있어서 이러한 시정수는 심각한 결함은 아닌데, 그 이유는 풍속의 현저한 지속적인 변화는 보통 상당히 긴 시간 주기 동안 발생하기 때문이다. 그러나, 조합 시정수는 파랑 진동 주기보다 상당히 크기 때문에, 파랑 운동으로부터의 에너지 추출을 최대화하기 위해 종래 기술의 토오크 제어를 사용하는 것이 불가능하다. 실제로, 이러한 종래 기술의 제어 시스템을 사용한 결과 유효 파도 에너지의 거의 절반이 소실되는 것을 알 수 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0014] 본 발명의 목적은 파랑 운동으로부터 얻어지는 에너지를 최대화하는 부유식 풍력 터빈의 제어를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0015] 본 발명에 따르면, 부유식 풍력 터빈용 제어기로서, 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출할 수 있도록 하며, 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 로터에 인가되는 하중체 토오크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도를 제어하는 것을 특징으로 하는 제어기가 제공된다.
- [0016] 본 발명의 제어기가 하중체의 토오크를 제어하는 방식으로 터빈을 제어하므로, 블레이드 피치가 최적의 값에 설정될 수 있도록 함으로써, 블레이드 피치가 상대 풍속의 파랑 변화에 응답하여 변화여만 하는 종래 기술의 시스템에서보다 높은 동력 출력을 달성할 수 있다. 따라서, 본 발명은, 놀랍게도, 본 내용에 적당한 구성의 토오크 제어기가 사용될 수 있다는 인식에 기초한다. 결과적으로, 파랑을 근원으로 하는 에너지의 양의 상당한 증가를 달성할 수 있다.
- [0017] 블레이드 피치의 최적 값은 통상, 최소 피치 각(본 발명에서 0°)이며, 보통 터빈의 동력 계수(C_p)의 최대 값에 해당한다. 따라서, 본 발명의 바람직한 일 형태에 있어서, 블레이드 피치(β)는 최소 값 또는 대략적인 값으로 설정된다. 그러나, 일부 실시예에 있어서, 동력 출력을 최대화하기 위하여 및/또는 원활한 제어를 촉진하기 위

하여 블레이드 피치의 일부(통상 적은 규모의) 조절이 유용할 수도 있다.

- [0018] 본 발명의 제어기는 터빈 구조물이 파랑 진동으로 이동함에 따라 로터 속도가 최적의 날개 끝 속도 비를 실질적으로 유지할 수도 있도록 배치된다. 따라서, 상기 날개 끝 속도 비를 제공하도록 소망하는 로터 속도 비(W_{ref})를 결정하는 것이 바람직하며, 이에 따라, 하중체의 토오크를 조절하는 것이 바람직하다. 블레이드 피치 각이 또한 최적의 값에 설정되는 동안 이러한 조절이 달성될 수도 있으므로, 터빈이 최적의 동력 계수로 작동할 수 있도록 함으로써 터빈의 출력 동력이 최대화될 수 있다.
- [0019] 제어기는 터빈의 (파랑) 운동을 지시하는 입력 값에 기초하여 토오크를 제어하는 것이 바람직하다. 이것은 구조물의 타워 상부 속도에 기초한 입력 신호를 제어기에 제공함으로써 달성될 수 있다. 이러한 방법이 직접적인 속도 측정($\dot{x}$)에 있어 가장 편리할 수도 있다. 이러한 방식으로, 발전기 토오크 결정 시 제어기는 타워의 운동을 고려할 수도 있다.
- [0020] 보다 바람직하게는, 타워 속도 신호가 타워의 파랑 운동으로 인한 소망하는 로터 속도의 성분(이하, "파도 성분"이라 한다)을 결정하도록 사용된다. 이러한 성분은, 예를 들어, 소망하는 날개 끝 속도 비에 기초하여 결정될 수 있다. 예를 들어, 로터 속도의 파도 성분은 로터 반경으로 나눈 타워 속도와 날개 끝 속도 비의 적분으로부터 산출될 수도 있다.
- [0021] 일 실시예에 있어서, 소망하는 또는 "기준" 로터 속도가 정상 상태(바람만 고려하는 상태) 성분("바람 성분")과 파도 성분의 총계로서 정의된다. 기준 속도는 소망하는 토오크를 산출하도록 사용될 수도 있다. 통상적으로, 필요한 토오크는 기준 로터 속도의 제곱에 비례하다.
- [0022] 바람 성분은 예를 들어, 저역 통과 또는 대역 통과 여과기를 사용하여 측정 로터 속도를 여과하여 파랑 운동과 연관된 성분을 제거하는 방식으로 획득되는 것이 바람직하다. 이후, 상기 여과된 성분은 예를 들어, 참조표 또는 적당한 공식을 사용하여 소망하는 토오크의 개개의 성분을 유도하도록 사용될 수도 있다.
- [0023] 통상적인 실시예에 있어서, 제어기는 필요한 토오크의 두 개의 구성 성분을 산출하며, 하나의 성분은 (여과) 정상 상태 로터 속도 성분에 기초하며 하나의 성분은 파랑 로터 속도 성분에 기초한다. 이후, 이들 두 개의 성분의 총계가 획득되어 소망하는 토오크 값을 생성한다. 구성 성분 중 전자는 종래 기술의 토오크 기반 제어기의 성분과 유사한 방식으로 획득될 수도 있음(즉, 일 성분은 파도 에너지를 최적화하도록 구성되지 않음)을 알 수 있다. 구성 성분 중 후자는 비례(P) 또는 비례 미분(PD) 제어기에 의해 결정되는 것이 바람직하다.
- [0024] 본 발명의 일 실시예에 있어서, 제어기는 소망하는 로터 토오크의 전술한 두 개의 구성 성분을 산출하도록 별개로 분리되는 제어 루프를 포함한다.
- [0025] 바람직하게는, 제 1 분기부는 입력 값이 터빈의 로터 속도이며, 저역 통과 여과기가 적용되고, 이후, 예를 들어, 여과 로터 속도의 제곱에 비례하는 소망하는 토오크에 기초하여 소망하는 토오크의 개개의 성분을 결정한다.
- [0026] 제 2 분기부는 입력 값이 로터 속도와 기준 로터 속도 사이의 차이(즉, 소망하는 로터 속도의 파도 성분의 측정값)이다. 제 2 분기부는 바람직하게는 비례 또는 비례 미분 제어를 사용하여 소망하는 토오크의 개개의 성분을 산출한다.
- [0027] 두 개의 분기부의 출력 값의 총계가 획득되는 경우, 소망하는 토오크 값이 생성되며, 필요한 제어 출력 값을 결정하기 위하여 토오크 제어기에 의해 토오크 실제 값과 비교될 수도 있다.
- [0028] 따라서, 제어기는 로터 속도와 타워 속도를 나타내는 신호에 대한 입력 값을 갖출 수도 있는 것으로 보인다.
- [0029] 일 변형예에 있어서, 측정 타워 속도에 추가하여, 추정 평균 풍속인 추가 입력 값이 사용된다. 이 경우, 로터 속도의 바람 성분은 예를 들어, 로터 반경으로 나눈 추정 풍속과 최적의 날개 끝 속도 비의 적분으로서 추정 풍속으로부터 직접 결정될 수도 있다.
- [0030] 본 실시예에서, 토오크의 별개의 성분을 결정할 필요가 없으며, 제어기가 전술한 두 개의 분기부를 구비할 필요도 없다. 대신, 제어기가 단일 제어 루프를 구비할 수도 있으며, 이 경우, 실제 로터 속도 값이 기준 로터 속도와 비교되며, 예를 들어, 전술한 바와 같은 비례 또는 비례 미분 제어를 사용하여 소망하는 토오크 값을 결정하도록 전술한 바와 같은 차이가 사용된다.
- [0031] 본 발명의 바람직한 형태에서, 터빈이 동력 그리드(grid)에 연결되어, 타워의 진동 사이클의 소정 부분 동안 전

류를 인출할 수 있게 된다. 일부 실시예에 있어서는, 만족스러운 로터 속도 추적을 달성하기 위하여 이러한 전류 인출이 필요할 수도 있다.

- [0032] 종래 기술의 시스템에서와 같이, 본 발명은 터빈의 정격 풍속 아래의 풍속에서 유용함을 알 수 있다. 풍속이 정격 풍속을 초과하자마자, 파도로부터 거의 에너지를 획득할 수 없다. 따라서, 제어기는 당 업계에 잘 알려진 방식으로 터빈이 일정한 동력 체제로 작동할 수 있도록 하는 제어기와 함께 또는 제어기의 일부를 구성하도록 사용될 수도 있다. 따라서, 본 발명의 제어기는 주어진 풍속(예를 들어, 정격 풍속 또는 이에 가까운 값)에서 전술한(파도 관련) 기능성을 불가능하게 만들도록 구성될 수도 있다.
- [0033] 본 발명은 또한, 전술한 바와 같은 제어기를 포함하는 풍력 터빈 구조물로 확장된다.
- [0034] 따라서, 본 발명의 다른 태양에 따르면, 부유식 풍력 터빈 구조물로서, 풍력 터빈이 장착되는 부력 타워와 제어기를 포함하며, 상기 풍력 터빈은 풍력 터빈에 토오크를 인가하는 하중체를 구동하도록 배치되고 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 구성되며, 상기 제어기는 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 하중체의 토오크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도를 제어하는 것을 특징으로 하는 부유식 풍력 터빈 구조물이 제공된다.
- [0035] "부유식"은 구조물의 특성과 관련된 용어로서, 즉, 구조물이 실제로 부유식인지와 상관없이 수면에 부유하도록 구성되는 구조물을 일컫는 용어임을 이해하여야 한다.
- [0036] 구조물이 공지된 어느 형태를 취할 수도 있지만, 특히, 전술한 세장형 부력 지지체를 구비한 유형인 것이 바람직하다.
- [0037] 하중체는 예를 들어, 유압 장치일 수도 있지만, 전기 발전기인 것이 가장 일반적일 수도 있다. 터빈과 하중체의 사이에 소정 부류의 기어 장치가 보통 제공된다. 바람직하게는, 하중체는 가변 토크 발전기이다.
- [0038] 제어기는 전술한 바와 같이 구성되는 것이 바람직하다.
- [0039] 본 발명은 또한, 대응하는 제어 방법으로 확장된다. 따라서, 또 다른 태양으로부터 알 수 있는 바와 같이, 본 발명은 부유식 풍력 터빈 제어 방법으로서, 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 부유식 풍력 터빈을 제어하며, 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 로터에 인가되는 하중체의 토오크를 제어함으로써 터빈의 로터 속도가 제어되는 것을 특징으로 하는 방법이 제공된다.
- [0040] 상기 방법은 바람직하게는 전술한 바와 같은 제어기의 제어 단계 및/또는 사용을 포함한다.
- [0041] 당 업계의 숙련자라면 알 수 있는 바와 같이, 제어기는 보통 소프트웨어 형태로 제공된다. 따라서, 제어기는 이 소프트웨어를 작동시키기 위한 프로세서를 포함한다. 프로세서는, 예를 들어, 마이크로프로세서일 수 있다.
- [0042] 본 발명은 또한, 프로세서에 의한 실행시 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 상기 프로세서가 부유식 풍력 터빈 구조물을 제어하도록 하는 지시를 포함하며, 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 터빈의 로터 속도가 로터에 인가되는 하중체 토오크를 제어함으로써 제어되는 것을 특징으로 하는 소프트웨어 제품에 관한 것이다.
- [0043] 바람직하게는, 소프트웨어 제품은 물리적 데이터 캐리어이다. 예를 들어, CD 또는 플로피 디스크이다.
- [0044] 선택적으로 또는 추가적으로, 소프트웨어 제품은 예를 들어, 인터넷을 통해 다운로드 가능한 바와 같은 네트워크를 통해 전달되는 지시 형태로 제공될 수 있다.
- [0045] 본 발명은 또한, 물리적 캐리어 형태의 소프트웨어 제품을 제조하기 위한 방법으로서, 프로세서에 의한 실행시 풍력 터빈이 터빈의 파랑 운동으로부터 에너지를 추출하도록 상기 프로세서가 부유식 풍력 터빈 구조물을 제어하도록 하는 데이터 캐리어 지시를 저장하는 단계를 포함하며, 로터 속도가 파랑 운동에 응답하여 변화하도록 터빈의 로터 속도가 로터에 인가되는 하중체의 토오크를 제어함으로써 제어되는 것을 특징으로 하는 방법에 관한 것이다.
- [0046] 이하에 보다 상세히 논의되는 바와 같이, 일정 풍속과 진폭이 2m이며 주기가 9초인 정규파를 가정한 본 발명의 일 실시예에 기초한 시뮬레이션(시모(Simo)-리플렉스(Riflex)-Hawc2) 결과, 종래 기술의 제어와 비교하여 2.46%으로부터 6.69%로 파도 추출 에너지가 증가하는 것으로 확인되었다.

발명의 효과

[0047] 본 발명에 따른 풍력 터빈 설비는 파랑 운동으로부터의 에너지 추출을 최대화하는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0048] 본 발명의 소정의 실시예가 첨부 도면을 참조하여 단지 일 예로서 아래에 설명된다:

도 1은 시간 함수로서의 통상적인 풍력 터빈용 풍속(100), 공기 역학 토크(101) 및 로터 속도(102)의 무차원 값을 도시한 그래프;

도 2는 HAWC2에서 실시되는 바와 같은 통상적인 풍력 터빈용 실제 곡선(104)과 최적의 날개 끝 속도 비(103)에 의해 작동하는 풍력 터빈용 풍속 함수로 나타내어진 로터 속도를 도시한 그래프;

도 3은 HAWC2에서 실시되는 바와 같은 통상적인 풍력 터빈용 실제 곡선(104)과 최적의 날개 끝 속도 비(103)에 의해 작동하는 풍력 터빈용 풍속 함수로 나타내어진 기준 공기 역학 동력을 도시한 그래프;

도 4는 HAWC2에서 실시되는 바와 같은 통상적인 풍력 터빈용 실제 곡선(104)과 최적의 날개 끝 속도 비(103)에 의해 작동하는 풍력 터빈용 로터 속도 함수로서 나타내어진 공기 역학 동력을 도시한 그래프;

도 5는 통상적인 풍력 터빈의 블레이드 피치 각이 0° 인 경우의 날개 끝 속도 비의 함수로 나타내어진 동력 계수를 도시한 그래프;

도 6은 6 m/s의 일정 풍속을 이용한 시뮬레이션 동안의 시간 함수로서 나타내어진 공기 역학 동력과 속도 진폭이 1.18 m/s이며 주기가 9초인 사인파 타워 운동을 도시한 그래프;

도 7은 6 m/s의 일정 풍속을 이용한 시뮬레이션 동안의 상대 풍속 함수로서 나타내어진 공기 역학 동력과 속도 진폭이 1.18 m/s이며 주기가 9초인 사인파 타워 운동을 도시한 그래프;

도 8은 종래 기술의 토크 제어기의 선도;

도 9a는 본 발명의 일 실시예에 따른 토크 제어기의 선도;

도 10은 실시예에 사용될 수도 있는 페루프 로터 속도 P-제어기용 보드(Bode) 선도;

도 11은 종래 기술의 제어(블루) 및 최적의 로터 속도 제어(레드)를 이용한 부유식 풍력 터빈의 시뮬레이션 동안의 타워 상부 속도의 스냅샷 그래프;

도 12는 최적의 로터 속도 기준 신호(107)와 함께 종래 기술의 제어(105)와 최적의 로터 속도 제어(106)를 이용한 부유식 풍력 터빈의 시뮬레이션 동안의 로터 속도의 스냅샷 그래프;

도 13은 종래 기술의 제어(105)와 최적의 로터 속도 제어(106)를 이용한 부유식 풍력 터빈의 시뮬레이션 동안의 공기 역학 동력의 스냅샷 그래프;

도 14는 종래 기술의 제어(105)와 최적의 로터 속도 제어(106)를 이용한 부유식 풍력 터빈의 시뮬레이션 동안의 발전기 동력의 스냅샷 그래프; 그리고

도 15는 본 발명의 일 실시예에 따른 제어기를 장착한 풍력 터빈을 도시한 도면.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0049] 우선, 도 15를 참조하면, 부유식 풍력 터빈 조립체가 도시되어 있다. 도시된 부유식 풍력 터빈 조립체는 나셀(3)에 장착된 터빈 로터(2)를 포함한다. 나셀은 다시 구조물의 상부에 장착되며, 구조물은 일반적으로 원주 부표의 형태로 형성되는 부유체(5)의 상부에 고정된 타워(4)를 포함한다. 부유체는 하나 이상의 닻줄(단 하나만 도시됨)에 의해 해저에 고정된다. 나셀에는 전기 발전기가 수용되어 있으며, 전기 발전기는 통상적인 방식으로 감속 기어박스를 사용하여 터빈 로터에 연결된다(이들 품목은 도시하지 않음). 선택적으로, 조립체는 직접 구동식 발전기를 포함할 수 있다. 나셀에는 또한, 제어 유닛이 수용되어 있다.

[0050] 로터가 바람에 의해 회전되면, 회전 로터에 의해 발전기가 잘 알려진 방식으로 전력을 발생시키게 된다. 로터는 가변 피치 블레이드를 포함하며, 이들 블레이드의 피치 각(β)은 제어 유닛에 의해 조절될 수도 있다. 블레이드의 설정 최소 피치는 0° 의 위치로서 정의된다. 다른 설정 값은 양의 각도로 나타내어진다. 동력 계수에 관한 최적의 설정 피치 각은 0° 로, 이 값을 기준으로 약간의 편차를 나타낸다.

[0051] 제어기는 또한, 터빈 로터(2)에 인가되는 하중으로서의, 발전기에 의해 제공되는 토크를 변경하도록

작동한다. 따라서, 로터 속도가 주어지면, 바람으로부터 얻어지는 에너지, 결과적으로, 발전기에 의해 발생되는 출력 동력이 변경될 수 있다.

[0052] 터빈이 터빈 로터 속도 및 출력 동력 제한치 이내에서 작동하는 것을 보장하도록 블레이드 피치 및/또는 토오크를 변화시키는 방법이 사용된다. 최대 동력이 얻어질 수 있는 최저 풍속을 터빈의 정격 풍속이라 한다.

[0053] 터빈 조립체(1)가 바다(또는 물 위의 다른 대형 동체)에 떠 있기 때문에, 터빈 조립체는 파랑 운동을 수행한다(수면의 파도(9)가 개략적으로 도시되어 있음). 터빈 조립체(1)가 파 여기(wave excitation)로 인해 바람에 대해 전후로 이동함에 따라, 터빈의 정격 풍속 아래에서의 작동 하에 파도 에너지를 추출할 수 있다(정격 풍속을 초과하는 상태에서의 작동에서는 유용하지 않다). 정상풍(steady wind)과 부유식 풍력 터빈의 조화 운동을 전제로, 바람과 터빈 사이의 상대 속도가 아래와 같이 나타내어질 수 있다.

수학식 1

$$U_r = U_w - U_A \cos(\omega t + \theta)$$

[0054]

[0055] 여기서, U_r 은 상대 풍속이며, U_w 는 유입 풍속이고, U_A 는 부유식 풍력 터빈의 조화 운동의 속도 진폭이며, ω 는 조화 운동의 주파수이고, t 는 시간이며, θ 는 위상 각이다. 일정 동력 계수(C_p)를 전제로, 터빈에 의해 운반되는 공기 역학 동력이 아래와 같이 나타내어질 수 있다.

수학식 2

$$P = \frac{1}{2} \rho_a A C_p U_r^3$$

[0056]

[0057] 여기서, P 는 터빈으로부터 발생하는 공기 역학 동력이며, ρ_a 는 공기 밀도이고, A 는 로터 통과 면적이다. (1)을 (2)에 대입함으로써, 한 사이클의 진동에 걸친 에너지 생성을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

수학식 3

$$E = \int_0^T P(t) dt = \frac{1}{2} T C_p \rho_a A U_w^3 \left(1 + \frac{3 U_A^2}{2 U_w^2}\right),$$

[0058]

[0059] 여기서, $T = 2\pi / \omega$ 는 한 사이클의 진동 주기이다. 상기 수학식은 최대 획득 가능한 에너지 값, 즉, 동력 계수(C_p)가 일정하게 유지되는 경우의 최대 값을 제공한다. C_p 는 블레이드 피치(β)와 날개 끝 속도 비(λ)(로터 날개 끝 속도를 풍속으로 나눈 값, 즉, $\lambda = r\omega / U_r$, 여기서, r 은 로터 반경임)의 함수이므로, 이에 따라, 날개 끝 속도 비(λ)를 일정한 최적의 값에 유지하기 위해서는 로터의 속도가 조화 운동에 따라 변경될 필요가 있다. 다시 말해, 최대 에너지 값을 달성하기 위해서는, 로터 속도가 각각의 진동 사이클 동안 상대 풍속 변화에 따라 변경되어야 한다.

[0060] 우선은 상대 풍속 하에서의 파랑 변화 문제는 보류하고, 풍력 터빈은 터빈이 정격 속도 아래로 작동하는 경우 풍속 변화에 응답하여 날개 끝 속도 비를 최적의 값(또는 적어도 가능한 한 최적의 값에 가까운 값)에 유지하도록 배치된다. 이를 위해, 전술한 바와 같은 가변 속도 풍력 터빈용 발전기 토오크가 공지된 방식으로 제어될 수 있다(대체의 경우 이러한 작동 체제를 최대 동력 체제라 한다).

[0061] 터빈의 이상적인 작동 지점은 블레이드 피치 값(β)이 최소(즉, $\beta = 0$)인 도 5에 도시된 동력 계수 곡선을 나타

내는 포물선의 정점부인 것으로 보이며, 본 발명의 실시예에 있어서 이 지점이 설정 지점으로 사용되고 있다. 그러나, 변형예에 있어서는, 작동을 추가로 최적화하기 위하여 최대 동력 체제에서의 작동 동안 상기 설정 지점의 약간의 변경이 이루어질 수도 있다.

[0062] 로터 속도의 함수로서 나타내어지는 최적의 발전기 토오크 곡선은 아래의 방식으로 확인될 수 있다:

[0063] 동력(P)이 각 속도와 토오크의 적분 값이므로, 동력은 $T_{EL}=P/\omega_t$ 으로 나타내어지며, 필요한 경우 또는 최적의 경우, 로터 속도의 함수로서 나타내어지는 기어의 저속 측으로 변환되는 발전기 토오크는 다음과 같이 주어진다.

수학식 4

$$\begin{aligned} T_{EL}(w_t) &= \frac{1}{2} \frac{1}{w_t} r C_p(l_{opt}, 0) p r^2 U_r^3 \\ &= \frac{1}{2} r C_p(l_{opt}, 0) p \frac{U_r^3}{w_t^3 r^3} r^5 w_t^2 \\ &= \frac{1}{2} r C_p(l_{opt}, 0) p \frac{1}{l_{opt}^3} r^5 w_t^2 \\ &= C_{EL} w_t^2, \end{aligned}$$

[0064]

[0065] 여기서, T_{EL} 은 손실이 없는 이상적인 기어를 전제로 기어의 저속 측으로 변환되는 발전기 토오크이며, ω_t 는 로터 속도이고, λ_{opt} 는 최적의 날개 끝 속도 비가며, r 은 로터 반경이고, 상수(C_{EL})는

$C_{EL} = \frac{1}{2} r C_p(l_{opt}, 0) p \frac{1}{l_{opt}^3} r^5$ 으로 주어진다. 이에 상응하여, 기어비가 $n:1$ 인 경우 발전기 토오크는 로터 토오크와 연관되어 있으므로($T_G=T_{EL}/n$ 및 $\omega_t=\omega_g/n$), 기어의 고속 측에 관한 발전기 속도의 함수로서 나타내어지는 최적의 발전기 토오크는 아래와 같이 나타내어질 수 있다.

수학식 5

$$T_G(\omega_g) = \frac{1}{n} T_{EL}\left(\frac{1}{n} \omega_g\right) = \frac{1}{n^3} C_{EL} \omega_g^2 = C_G \omega_g^2$$

[0066]

[0067] 여기서, ω_g 는 발전기 속도이며, n 은 기어 비이고, T_G 는 기어의 고속 측에서의 발전기 토오크이며, 상수(C_G)는

$$C_G = \frac{1}{n^3} C_{EL} = \frac{1}{n^3} C_{EL} = \frac{1}{2n^3} r C_p(l_{opt}, 0) p \frac{1}{l_{opt}^3} r^5$$

으로 주어진다.

[0068] 발전기 토오크 제어기가 수학식 4 및 수학식 5 만을 기반으로 하는 경우, 정상 상태에서만 최적의 날개 끝 속도 비에 도달한다는 점에 유의하는 것이 중요하다. 풍속 변경으로부터 대응하는 로터 속도 변경까지 소정의 시정수가 존재한다. 따라서, 최적의 날개 끝 속도 비는 대략적인 풍속 평균 값에서만 달성된다. 첫째, 풍속 변경으로부터 공기 역학 토오크 변경까지 시정수가 존재한다. 둘째, 로터의 관성 모멘트가 크기 때문에 공기 역학 토오크 변경으로부터 로터 속도 변경까지 시정수가 존재한다.

[0069] 전술한 바에 대해서는 도 1에 도시되어 있으며, 도 1에는 시간 함수로서의 풍속, 공기 역학 토오크 및 로터 속도의 무차원 과도기 값이 풍속이 6 m/s 내지 7 m/s인 단계에서의 시간 함수로서 그려져 있다. 모든 변수는 시정수의 비교를 단순화하기 위하여 0 내지 1의 값을 취하도록 변환되어 왔다. 공기 역학 토오크는 1.5초 이내에

정상 상태 값에 도달하는 반면, 로터 속도는 85초 후 정상 상태 값에 도달하며, 이 값은 파랑 운동의 통상적인 주기보다 상당히 큰 값이다.

- [0070] 본 발명의 실시예에 사용되는 터빈은 통상적인 2.3 MW 터빈이다. 도 2 내지 도 5에는 이러한 터빈과 대응하는 최적의 곡선에 대한 동력 계수, 날개 끝 속도 비, 공기 역학 동력, 로터 속도 및 풍속 사이의 관계가 도시되어 있다.
- [0071] 로터 속도는 도 2에 터빈의 실제 곡선과 최적의 날개 끝 속도 비에서 작동하는 터빈의 풍속 함수로서 도시되어 있다. 대략 8 m/s를 초과하는 큰 풍속 차의 원인은, 이러한 특정 터빈의 경우, 1.78 rad/s에 맞먹는 터빈의 최대 허용 가능한 로터 속도가 제한되어 있기 때문이다.
- [0072] 도 2에 도시된 로터 속도 제한으로 인해 터빈을 최적으로 작동시킬 수 없음에 따른 영향이 도 3의 대응 동력 곡선으로 도시되어 있다. 도시된 바와 같이, 실제 동력 곡선은 대략 8 m/s의 풍속으로부터 터빈의 정격 풍속까지의 최적의 동력 곡선 아래에 있다.
- [0073] 로터 속도 함수로서 나타내어진 공기 역학 동력 곡선이 도 4에 도시되어 있으며, 이 곡선은 수학적 4로 주어진 바와 같은 공기 역학 토오크와 로터 속도 사이의 관계에 해당한다. 날개 끝 속도 비의 함수로서 나타내어진 동력 계수가 도 5에 도시되어 있으며, 도시된 바에 따르면, 최적의 날개 끝 속도 비는 대략 9인 것으로 보인다.
- [0074] 종래 기술의 제어기와 대조적으로, 정격 풍속 아래에서 증가된 파도 에너지 추출을 달성하기 위하여, 제 1 실시예의 제어 유닛은 상기 수학적 4 및 수학적 5에 설명된 바와 같은 종래 기술의 토오크 제어기 뿐만 아니라 신규 로터 속도 제어기 부분을 갖춘 발전기 토오크 제어기를 채용한다. 상기 추가 부분은 타워 속도에 기초한 추가 입력 값을 갖추고 있으며 이에 대해서는 이하에 보다 상세히 설명된다.
- [0075] 본 실시예의 발전기 토오크 제어기에 사용되는 기준 신호는 아래와 같다.

수학적 6

$$\omega_{ref} = -\frac{\lambda_{opt}}{R} \dot{x}_{top} + \omega_{lp}$$

[0076]

수학적 7

$$\dot{\omega}_{ref} = -\frac{\lambda_{opt}}{R} \ddot{x}_{top}$$

[0077]

- [0078] 여기서, ω_{lp} 는 측정 로터 속도(ω)로부터 유도되는 저역 통과 여파 신호이다. 나셀의 수평 운동의 양의 값의 방향이 양의 값의 풍향에 해당하므로, 터빈이 바람과 동일한 방향으로 이동하는 경우 로터 속도를 감소시키기에 최적인 것으로 추정된다.
- [0079] 수학적 6은 두 개의 속도의 총계임을 알 수 있다. 제 1 속도는 파랑 운동에 의한 로터 속도에 기여하여, 최적의 날개 끝 속도 비가 달성되도록 하는 것으로 추정된다. 제 2 속도는 바람이나 파도에 의해 유도되지 않는 부분이다. 수학적 7에서, ω_{lp} 가 충분히 일정한 것으로 가정하면, 그 도함수는 대략 제로 값이며, 다시 말해, 파랑 운동으로 인한 로터 속도의 변경률은 풍속 변화로 인한 변경률보다 상당히 크다.
- [0080] 우선, 도 8에 도시된 종래 기술의 제어기를 고려하면, (물리적) 시스템의 입력 값은 공기 역학 토오크이며, 시스템으로부터의 출력 값은 로터의 회전 속도(ω)로서, 다시 말해, 바람이 로터에 인가하는 힘인 공기 역학 토오크에 의해 로터가 속도(ω)로 작동하게 된다. 시스템에 의해 속도(ω)가 측정된다. 샤프트의 저속 측에서 확인되는 발전기 토오크는 T_G (전술한 T_L 에 해당)이며, 측정 로터 속도의 함수 $T_G(\omega)$ 의 함수로서 표시/산출될 수 있다. T_G 는 제어기로부터의 출력 값이다.
- [0081] 동역학적 공정에 있어서, 뉴턴의 제 2 법칙을 사용하는 한편 강성의 샤프트를 가정하면, 로터 가속도는

$\dot{\omega} = 1/J*(T_A - T_G)$ 로 주어지며, 여기서, J는 관성 모멘트이다.

- [0082] 제 1 실시예의 제어기는 전술한 종래 기술의 제어기의 수정안이라 할 수 있으며 도 9a에 도시되어 있다. 도시된 바로부터 알 수 있는 바와 같이, 통상의 기준 토크에 입력되는 로터 속도는 로터 속도의 저역 통과 여파 측정 값인 반면, 추가 로터 속도 제어 루프는 PD(비례 미분) 제어기와, 소망하는 날개 끝 속도 비를 달성하기 위하여 측정된 타워 상부 운동에 기초한 로터 속도 기준 궤도를 포함한다.
- [0083] 보다 구체적으로, 전술한 바와 같이, 물리적 시스템으로의 입력 값은 공기 역학 토크(T_A)이다. 로터 기준 속도(ω_{ref})는 상기 수학식 6에 의해 주어진다. 물리적 시스템으로부터의 출력 값은 로터(ω)의 회전 속도이다. 도시된 시스템에서는 로터 속도가 측정된다. 이에 추가하여, 나셀 속도가 측정되어 ω_{ref} 의 산출에 사용된다.
- [0084] 샤프트의 저속 측에서 확인되는 발전기 토크는 T_G 로서, 제어기로부터의 출력 값이다. 이 발전기 토크는 두 가지 추가 성분으로 이루어져 있다. 제 1 성분은 로터의 속도가 최적의 방식으로 나셀의 파랑 운동에 따라 변하도록 종래 기술의 제어기에 추가적인 기능을 제공하는 로터 속도 추적 제어기가다. 로터 속도 추적 제어기는 기준 속도(ω_{ref})와 측정 로터 속도(ω) 사이의 차이를 입력 값으로 취한다. 출력 값은 발전기 토크 신호이다. 제 2 성분은 도 8의 종래 기술의 토크 제어기와 같이 거동하는 토크 제어기가다. 이 제어기는 파도 주파수를 제거하는 저역 통과 여파기(또는 대역 통과 여파기)와 원래의 토크 제어기 함수($T_G(\omega)$)로 구성된다. 출력 값은 평균 값이 제로인 발전기 토크 신호이다. 로터 가속도($\dot{\omega}$)는 위에 주어진 바와 같다.
- [0085] 일 변형예가 도 9a에 도시되어 있다. 도시된 실시예에 있어서, 시스템의 입력 값은 (반복하여) 공기 역학 토크(T_A)이며, 로터 기준 속도(ω_{ref})는 아래와 같이 주어진다.

수학식 8

$$\omega_{ref} = -\frac{\lambda_{opt}}{R} \dot{x}_{top} + \frac{\lambda_{opt}}{R} \hat{u}_{mean}$$

- [0086]
- [0087] 시스템으로부터의 출력 값은 로터의 회전 속도(ω)이다. 시스템에서는 반복하여 로터 속도가 측정된다. 이에 추가하여, 나셀 속도가 측정되어 평균 풍속이 추정됨으로써 상기 수학식 8에 따른 ω_{ref} 를 산출하도록 사용된다. 샤프트의 저속 측에서 확인되는 발전기 토크는 T_G 로서, 제어기로부터의 출력 값이다. 로터 속도 추적 제어기가 기준 속도와 측정 로터 속도의 차이를 입력 값으로서 취한다. 이 출력 값이 발전기 토크 신호이다.
- [0088] 전술한 실시예에 있어서, 발전기 원동력이 로터 원동력과 비교하여 빠른 것으로 가정되므로, 발전기 토크는 실제로 토크 제어기로부터의 출력 값인 명령 발전기 토크와 동일하다(이것이 일반적인 가정이다). 그러나, 수정 실시예에 있어서는, 발전기 원동력을 고려하여야 한다.
- [0089] 전술한 제어기의 성능 및 특히, 도 9a의 방안이 이하 설명된다. 도 9a의 종래 기술의 토크 제어기는 상이한 주파수 영역에서 작동하므로, 이들 두 개의 제어기는 속도 추적 제어기에 영향을 미치지 않는 것으로 추정된다. 종래 기술의 토크 제어기의 경우, 제어기가 파도 주파수 구역 아래의 필터 주파수를 갖춘 저역 통과 여파 로터 속도에 기초하므로, 이러한 토크 제어기의 기여는 느리게 변화하는 것으로 추정되는 반면, 로터 속도 추적 제어기는 소망하는 날개 끝 속도 비를 획득하기 위하여 파도 주파수 구역에서 작동하도록 고안된다. 이러한 이유로, 도 9a의 제어기의 종래 기술의 토크 제어기 부분은 저역 통과 여파 로터 속도를 중심으로 속도 추적 제어기를 고려하는 경우 아래의 논의에서는 무시된다.
- [0090] 도 9a의 PD 제어기는 전달 함수로 나타낼 수 있다.

수학식 9

$$h_{PD}(s) = K_P + K_D s$$

[0091]

[0092] 여기서, K_P 및 K_D 는 각각 비례 이득 및 유도 이득이다. 느리게 변화하는 효과를 무시함으로써, 도 9a의 폐쇄형 시스템의 원동력은 다음과 같이 전개될 수 있다.

수학식 10

$$\omega = \frac{1}{(J + K_D)s + K_P} T_{A_dyn} + \frac{K_D s + K_P}{(J + K_D)s + K_P} \omega_{ref}$$

[0093]

[0094] 여기서, J 는 로터와 발전기의 관성 모멘트이며, T_{A_dyn} 은 공기 역학 토오크의 동적 부분이다. 또한, 시스템의 동적 부분의 루프 전달 함수는 아래와 같이 주어진다.

수학식 11

$$h_0(s) = \frac{K_P + K_D s}{J_s} = \frac{K_P}{J} \frac{1 + \frac{K_D J}{K_P} s}{s}$$

[0095]

[0096] 기준 신호를 따르는 제어 시스템의 능력을 나타내는 전달 함수는 다음과 같은 반면,

수학식 12

$$M(s) = \frac{K_D s + K_P}{(J + K_D)s + K_P}$$

[0097]

[0098] 소망하는 기준 신호와 측정 값 사이의 오차를 나타내는 전달 함수는 다음과 같다.

수학식 13

$$N(s) = \frac{1}{(J + K_D)s + K_P}$$

[0099]

[0100] 전술한 바와 같은 실시예는 PD 제어기를 채용한다. 그러나, 수학식 11 및 수학식 12의 매개 변수(K_D)를 제로 값으로 설정함으로써 순수 비례 이득 제어기가 도입될 수 있어, 다음의 전달 함수가 얻어진다.

수학식 14

$$\omega = \frac{1}{J_s + K_P} T_{A-dyn} + \frac{K_P}{J_s + K_P} \omega_{ref}$$

[0101]

수학식 15

$$h_0(s) = \frac{K_P}{J_s}$$

[0102]

수학식 16

$$M(s) = \frac{K_P}{J_s + K_P}$$

[0103]

수학식 17

$$N(s) = \frac{1}{J_s + K_P}$$

[0104]

[0105] P-제어기를 구비한 시스템의 대역폭이 $\omega_{\text{dB}} = K_P/J$ 이며, 시스템용 보드 플롯은 도 10에 $K_P/J = \omega_{\text{dB}} = 8.49$ 인 것으로 도시되어 있다.

[0106] 본 발명의 장점이 파도 에너지 추출의 간단한 이론적 산출을 고려하여 보다 잘 이해될 수 있을 것이다. 이러한 장점은 도 4의 동력 계수 곡선과 함께 도 2의 실제 동력 곡선에 기초한다. 아래의 세 가지 경우가 고려된다:

[0107] ● 고정 : 6 m/s의 일정한 풍속에서의 작동 동안 고정형 기부를 갖춘 동력 터빈으로부터 추출되는 동력;

[0108] ● 실제 : 터빈이 6 m/s의 최적의 로터 속도에 대응하는 일정한 로터 속도로 작동한다는 가정 하에 진폭이 1.18 m/s이고 주기가 9초인 사인파 타워 상부 속도 및 6 m/s의 일정한 풍속에서의 작동 동안 부유식 풍속 터빈으로부터 추출되는 동력(이것은 시모-리플렉스-Hawc2 시뮬레이션의 파도 진폭이 2m이며 주기가 9초인 경우에 해당한다); 그리고

[0109] ● 최적 : 터빈이 도 2의 실제 동력 곡선에 해당하는 터빈의 소망하는 날개 끝 속도 비로 작동한다는 가정 하에 진폭이 1.18 m/s이고 주기가 9초인 사인파 타워 상부 속도 및 6 m/s의 일정한 풍속에서의 작동 동안 부유식 풍속 터빈으로부터 추출되는 동력.

[0110] 세 개의 상이한 경우에 대한 동력 산출 결과가 각각 도 5 및 도 6의 시간 및 상대 풍속 함수로서 도시되어 있으며 일부 핵심 값이 표 1에 열거되어 있다. 수학식 2의 사용을 통해, 아래의 표 1의 최적의 로터 속도 제어기를 갖춘 부유식 풍력 터빈을 이용한 산출 값에 해당하는, 1.18 m/s의 속도 진폭에 대해 5.80%의 공기 역학 에너지의 파도 추출 부분의 평가 값을 제공한다는 점에 주목하여야 한다.

[0111] 도 6에는 고정형 풍력 터빈(라인(108)), 최적의 날개 끝 속도 비(라인(109))에서 작동하는 부유식 풍력 터빈 그리고 평균 풍속(라인(110))에 대응하는 로터 속도로 작동하는 현실적인 부유식 풍력 터빈에 대한 공기 역학 동력이 도시되어 있다. 최적의 날개 끝 속도 비 및 보다 통상적인 날개 끝 속도 비로의 작동 동안 공기 역학 동

력 평균 값이 각각 라인(111, 112)으로 도시되어 있다.

[0112] 도 7에는 고정형 풍력 터빈(라인(108)), 최적의 날개 끝 속도 비(라인(109))에서 작동하는 부유식 풍력 터빈 그리고 평균 풍속(라인(110))에 대응하는 로터 속도로 작동하는 현실적인 부유식 풍력 터빈에 대한 공기 역학 동력이 도시되어 있다. 최적의 날개 끝 속도 비 및 보다 통상적인 날개 끝 속도 비로의 작동 동안 공기 역학 동력 평균 값이 각각 라인(111, 112)으로 도시되어 있다.

표 1

공기 역학 동력	평균[kW]	S.D.[kW]	증가 동력 생산[%]
고정형 기부를 갖춘 풍력 터빈	318	0	0
종래 기술의 제어를 이용한 부유식 풍력 터빈	328	134	3.03
최적의 로터 속도 제어를 이용한 부유식 풍력 터빈	337	135	5.80

[0114] 공기 역학 동력의 단순 산출

[0115] 시뮬레이션 연구

[0116] 본 섹션의 시뮬레이션은 콘크리트 선체 타워 구조물과 2.3 MW 터빈을 갖춘 결합 분석 툴 시모-리플렉스-Hawc2에 의해 수행된다.

[0117] 본 시뮬레이션의 환경 조건에는 6 m/s의 일정 풍속과, 진폭이 2m이며 주기가 9초인 정규파가 포함된다.

[0118] 본 섹션의 시뮬레이션은 도 10의 보드 선도의 플롯 작성을 위해 사용된 바와 동일한 매개 변수를 구비한 로터 속도 추적 제어기용 P-제어기를 이용하여 수행하였다.

[0119] 종래 기술의 토오크 제어기와 최적의 로터 속도 제어용 토오크 제어기를 갖춘 부유식 풍력 터빈에 대한 타워 상부 속도의 스냅샷이 도 11에 작성되어 있다. 터빈 운동은 제어기의 선택에 의해 상당히 영향을 받음을 알 수 있다.

[0120] 대응 로터 속도가 최적의 로터 속도 기준 신호와 함께 도 12에 작성되어 있다. 종래 기술의 제어기를 사용할 경우 파랑 운동에 대해 단지 적은 수준으로만 반응하며 로터 속도가 최적의 로터 속도 기준 신호에 의해 위상이 달라짐을 알 수도 있다. 이러한 사실이 지시하는 바에 따르면, 단순 산출의 "실제" 곡선 뒤의 가정이 적당하다. 또한, 분명하게 알 수 있는 바와 같이, 최적의 로터 속도 추적 제어기가 사용되는 경우 로터 속도는 최적의 로터 속도 신호를 따른다.

[0121] 두 개의 제어기를 사용하는 공기 역학 동력의 스냅샷이 도 13에 도시되어 있는 반면, 고정 기초 풍력 터빈과 비교하여 발전기 동력에 관한 일부 핵심 데이터가 아래의 표 2에 도시되어 있다.

표 2

발전기 동력	평균[kW]	STD[kW]	증가 동력 생산[%]
고정형 기부를 갖춘 풍력 터빈	284	0	0
종래 기술의 제어를 이용한 부유식 풍력 터빈	291	13	2.46
최적의 로터 속도 제어를 이용한 부유식 풍력 터빈	302	1338	6.69

[0123] 시모-리플렉스-Hawc2 에서의 발전기 동력에 관한 핵심 데이터

[0124] 발전기 동력의 시뮬레이션 스냅샷이 도 14에 도시되어 있으며, 위의 표 2에 핵심 비교 데이터가 기재되어 있다. 요동 사이클의 일부에서 그리드(grid)로부터 에너지가 추출되도록 최적의 로터 속도 추적 제어기는 큰 토오크

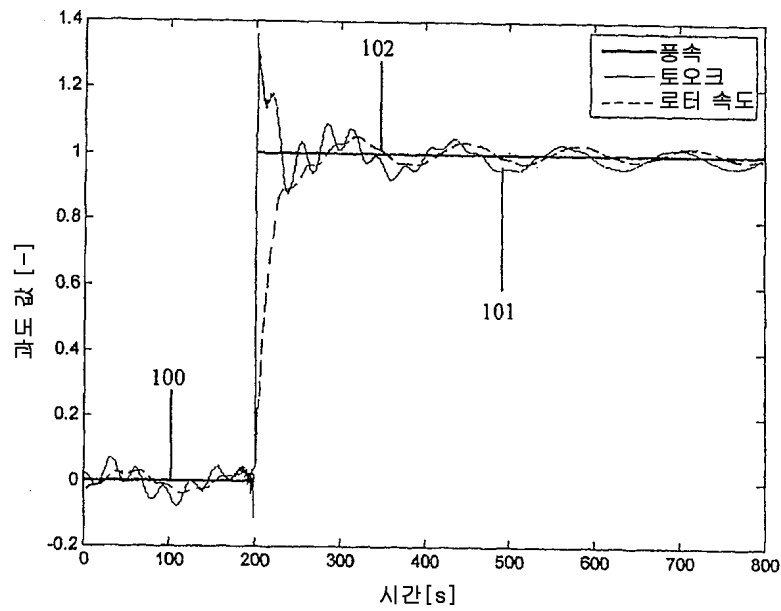
기여를 필요로 함을 알 수 있다. 표 1에 주어진 증가된 공기 역학 동력의 간단한 산출이 표 2의 시모-리플렉스-Hawc2의 사용을 이용한 수치 시뮬레이션에서 확인되는 증가된 산출 발전기 동력과 잘 일치함에 주목하여야 한다.

부호의 설명

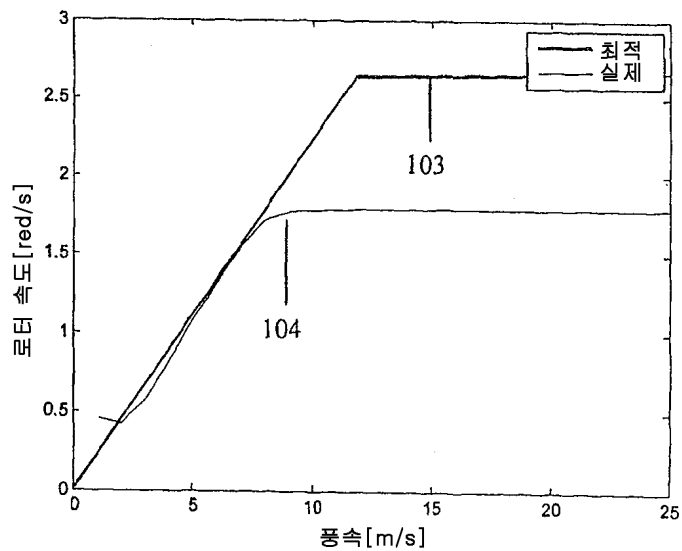
- [0125]
- | | |
|-------------------|-----------|
| 1 : 부유식 풍력 터빈 조립체 | 2 : 터빈 로터 |
| 3 : 나셀 | 4 : 타워 |
| 5 : 부유체 | 7 : 닻줄 |

도면

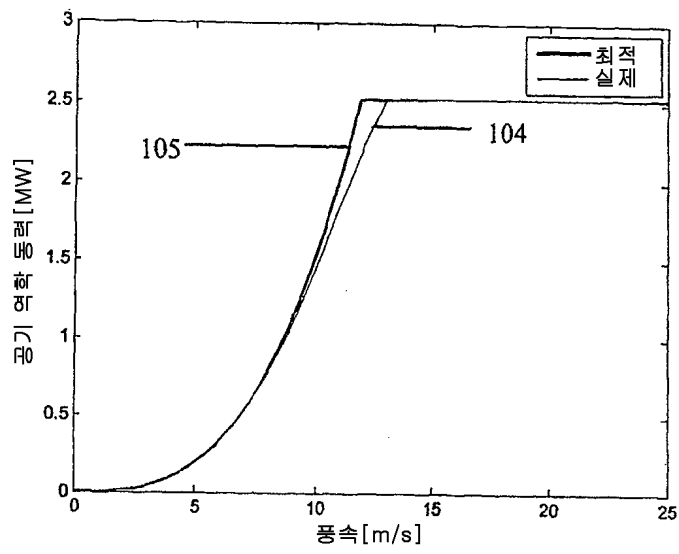
도면1



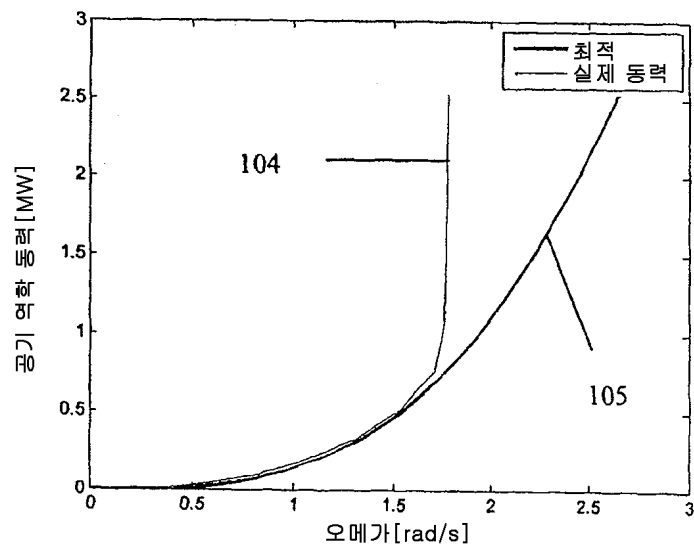
도면2



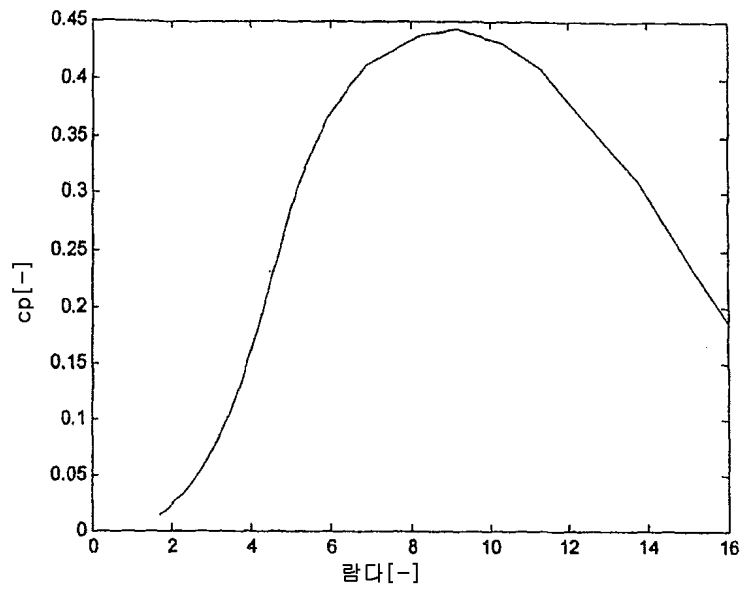
도면3



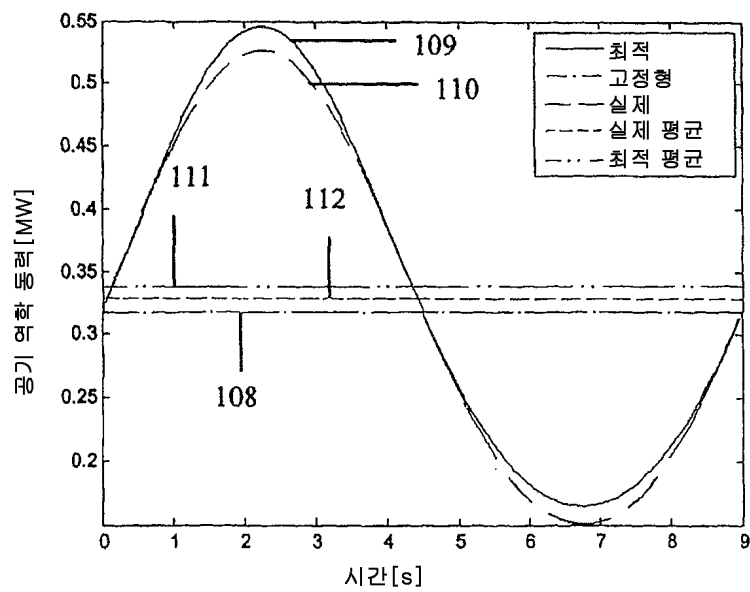
도면4



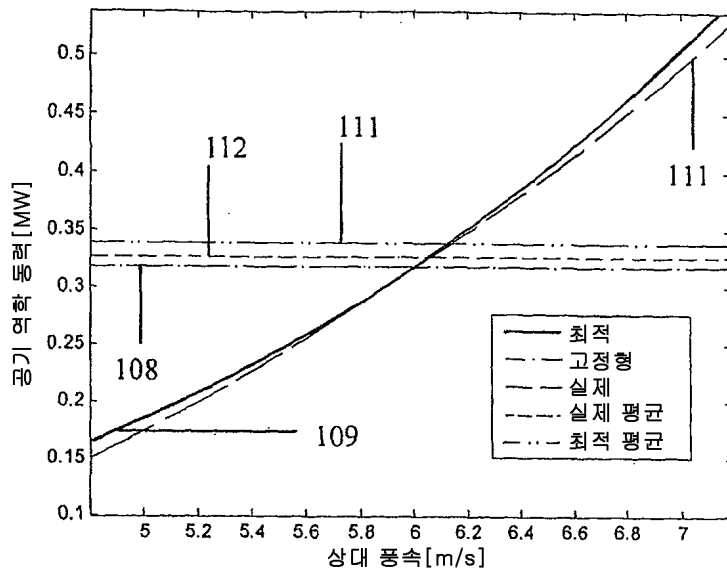
도면5



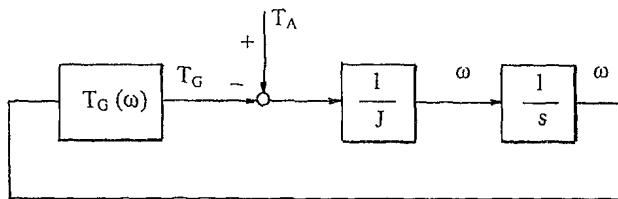
도면6



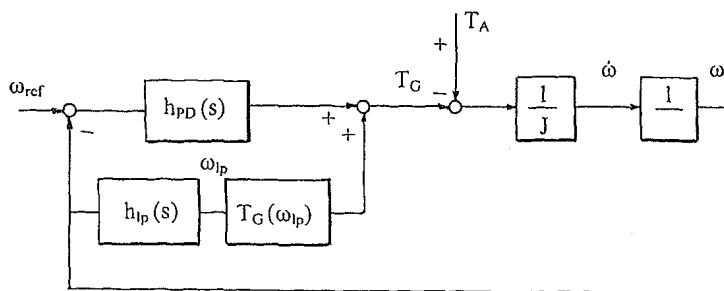
도면7



도면8



도면9a



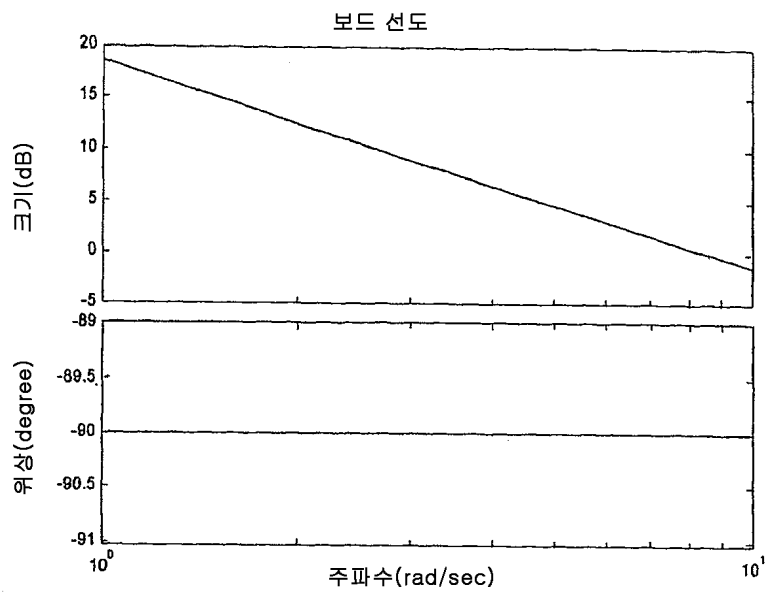
도면9b

삭제

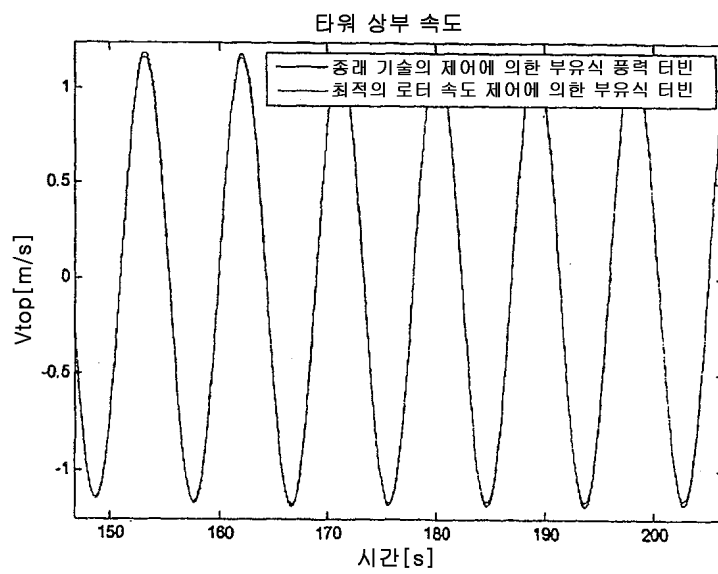
도면9c

삭제

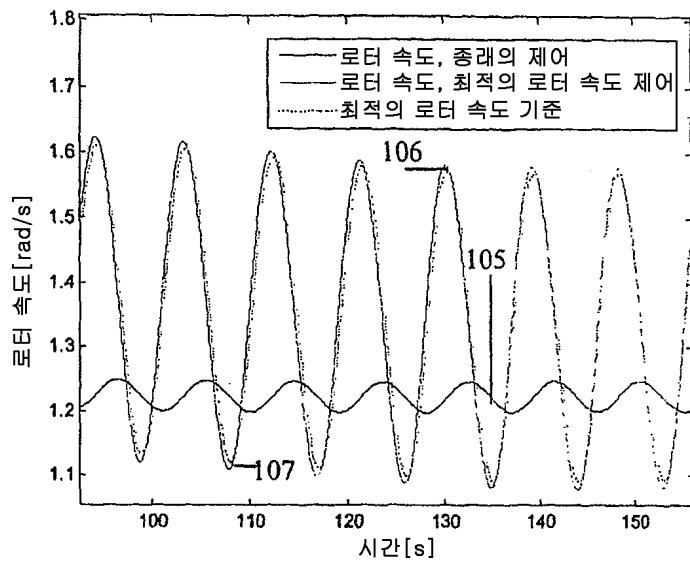
도면10



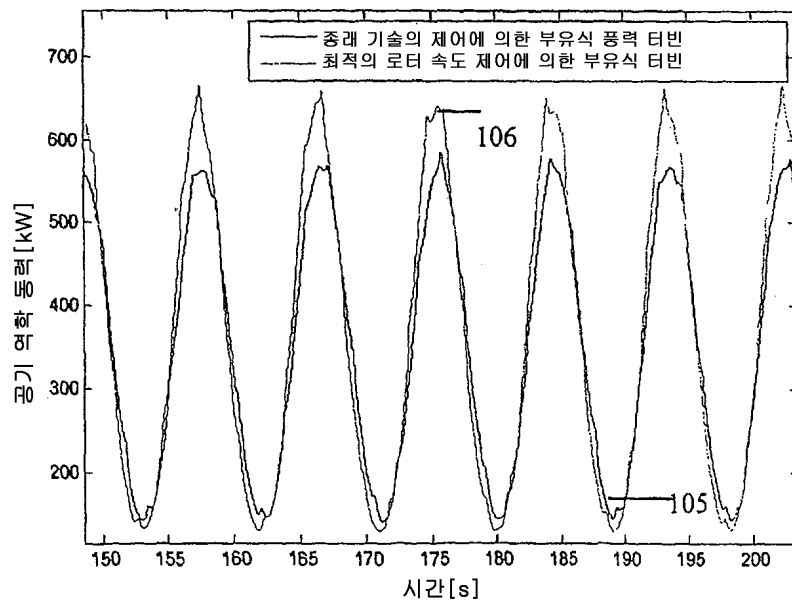
도면11



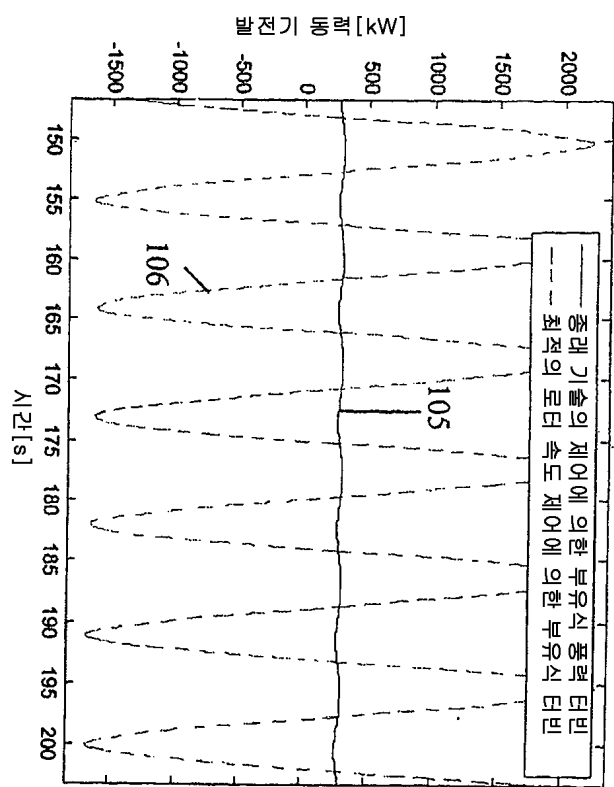
도면12



도면13



도면14



도면15

