



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0044921
(43) 공개일자 2020년04월29일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02P 25/22 (2006.01) F03D 7/02 (2006.01)
H02P 21/16 (2016.01) H02P 9/30 (2006.01)
(52) CPC특허분류
H02P 25/22 (2013.01)
F03D 7/0272 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2020-7009043
(22) 출원일자(국제) 2018년08월27일
심사청구일자 2020년03월27일
(85) 번역문제출일자 2020년03월27일
(86) 국제출원번호 PCT/EP2018/072980
(87) 국제공개번호 WO 2019/042919
국제공개일자 2019년03월07일
(30) 우선권주장
10 2017 119 743.5 2017년08월29일 독일(DE)

(71) 출원인
보벤 프로퍼티즈 게엠베하
독일 26607 아우리히 보르지그슈트라쎄 26
(72) 발명자
로쏜 로베르토
독일 26605 아우리히 힐젠부쉬 28아
카솔리 자이르
독일 26603 아우리히 라일슈트라쎄 5
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김태홍, 김진희

전체 청구항 수 : 총 17 항

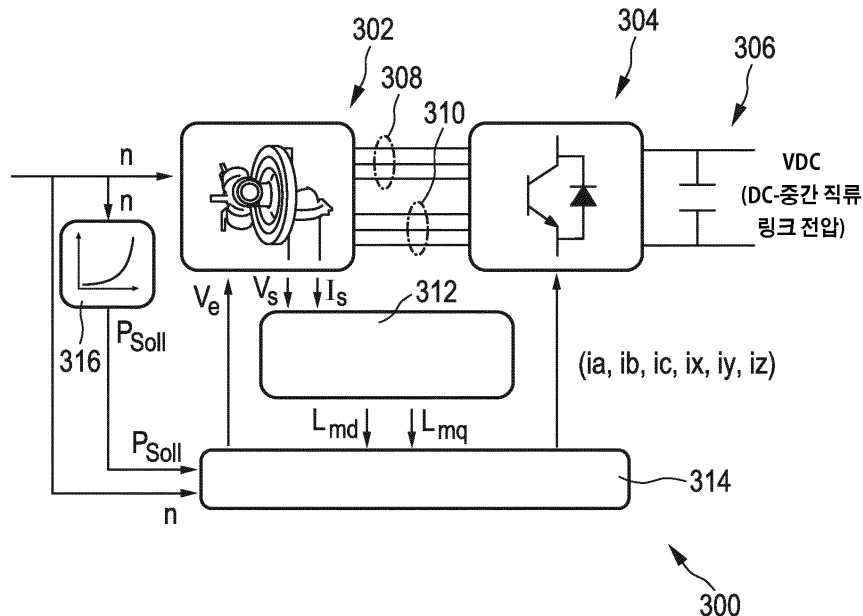
(54) 발명의 명칭 풍력 발전 설비의 다상 타여자 동기식 발전기를 제어하기 위한 방법

(57) 요약

본 발명은 풍력 발전 설비(100)의 다상(multi-phase) 타여자(separately excited) 동기식 발전기(302)를 제어하기 위한 방법에 관한 것으로서, 여기서 동기식 발전기(302)는 고정자(322) 및 회전자(324)를 포함하고, 회전자(324)는 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 입력하기 위한 여자 입력부(326)를 포함하고, 여자 입력부(326)

(뒷면에 계속)

대표도 - 도3



에는 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 입력하기 위해 여자 제어기(320)가 연결되고, 고정자(322)는 고정자 전류를 출력하기 위한 고정자 출력부(328)를 포함하고, 고정자(322)의 고정자 출력부(328)에는 정류기(304)가 연결되어, 고정자 전류를 정류하고 이를 정류기(304)에 연결된 중간 직류 링크(306)로 제공하며, 그리고 정류기(304)는 고정자 전류를 제어하도록 제어될 수 있고, 상기 방법은 다음 단계들: 풍력 발전 설비(100)의 회전자(324) 또는 공기 역학적 로터의 회전 속도(n)를 검출하는 단계; 검출된 회전 속도(n)의 함수로서, 동기식 발전기(302) 또는 풍력 발전 설비에 의해 출력되는 목표 전력(P_{soll})을 결정하는 단계; 검출된 회전 속도(n) 및 결정된 목표 전력(P_{soll})의 함수로서 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 결정하는 단계; 이렇게 결정된 여자 전류(i_{err}) 또는 이렇게 결정된 여자 전압(v_{err})을 여자 제어기(330)에 의해 여자 입력부(326)에 입력하는 단계; 검출된 회전 속도(n) 및 결정된 목표 전력(P_{soll})의 함수로서, 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 단계; 및 고정자 출력부(328)에서 출력되는 결정된 고정자 전류를 고정자 목표 전류로 조정하도록 정류기(304)를 제어하는 단계를 포함하고, 여기서 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 결정하는 단계 및 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 단계 중 적어도 하나의 단계는 적응성 제어 장치(314)에 의해 수행되고, 여기서 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err}) 또는 출력되는 고정자 전류는 제어 장치(314)의 제어 변수를 형성한다.

(52) CPC특허분류

H02P 21/16 (2016.02)

H02P 9/30 (2013.01)

F05B 2270/327 (2013.01)

(72) 발명자

엔젤켄 원케

독일 28209 브레멘 호헨로헤슈트라쎄 5

엘다이크 암가트

독일 26605 아우리히 드레에캄프 5

명세서

청구범위

청구항 1

풍력 발전 설비(100)의 다상(multi-phase) 타여자(separately excited) 동기식 발전기(302)를 제어하기 위한 제어 방법으로서,

- 상기 동기식 발전기(302)는 고정자(322) 및 회전자(324)를 포함하고,
- 상기 회전자(324)는 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 입력하기 위한 여자 입력부(326)를 포함하고,
- 상기 여자 입력부(326)에는, 상기 여자 전류(i_{err}) 또는 상기 여자 전압(v_{err})을 입력하기 위해 여자 제어기(320)가 연결되고,
- 상기 고정자(322)는 고정자 전류를 출력하기 위한 고정자 출력부(328)를 포함하고,
- 상기 고정자(322)의 상기 고정자 출력부(328)에는 정류기(304)가 연결되어, 상기 고정자 전류를 정류하고 이를 상기 정류기(304)에 연결된 중간 직류 링크(306)로 제공하며,
- 상기 정류기(304)는 상기 고정자 전류를 제어하도록 제어될 수 있고,

상기 제어 방법은

- 상기 풍력 발전 설비(100)의 상기 회전자(324) 또는 공기 역학적 로터의 회전 속도(n)를 검출하는 단계,
- 상기 검출된 회전 속도(n)의 함수로서, 상기 동기식 발전기(302) 또는 상기 풍력 발전 설비에 의해 출력되는 목표 전력(P_{soll})을 결정하는 단계,
- 상기 검출된 회전 속도(n) 및 상기 결정된 목표 전력(P_{soll})의 함수로서 여자 전류(i_{err}) 또는 여자 전압(v_{err})을 결정하는 단계,
- 이렇게 결정된 상기 여자 전류(i_{err}) 또는 이렇게 결정된 상기 여자 전압(v_{err})을 상기 여자 제어기(330)에 의해 상기 여자 입력부(326)에 입력하는 단계,
- 상기 검출된 회전 속도(n) 및 상기 결정된 목표 전력(P_{soll})의 함수로서, 상기 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 단계, 및
- 상기 고정자 출력부(328)에서 출력되는 상기 결정된 고정자 전류를 상기 고정자 목표 전류로 조정하도록 상기 정류기(304)를 제어하는 단계

를 포함하고,

- 상기 여자 전류(i_{err}) 또는 상기 여자 전압(v_{err})을 결정하는 상기 단계 및
- 상기 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 상기 단계

중 적어도 하나의 단계는 적응성 제어 장치(314)에 의해 수행되고,

상기 여자 전류(i_{err}) 또는 상기 여자 전압(v_{err}) 또는 상기 출력되는 고정자 전류는 상기 제어 장치(314)의 제어 변수를 형성하는, 제어 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

- 상기 동기식 발전기의 파라미터, 특히 자화 인덕턴스 및/또는 고정자 저항 및/또는 여자 저항은 추정 장치(312)에 의해 상기 동기식 발전기의 추정 변수로서 추정되고,

- 상기 적응성 제어 장치는 제어 변수를 결정하기 위해 상기 추정 변수를 고려하는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 3

제1항 또는 제2항에 있어서,

상기 적응성 제어 장치는 제어 변수를 결정하기 위해 상기 동기식 발전기의 모델을 고려하고, 상기 모델 또는 이로부터 도출된 관계를 상기 동기식 발전기의 추정된 변수 또는 상기 동기식 발전기의 상기 추정 변수의 함수로서 적응시키는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 4

제1항 내지 제3항 중 어느 한 항에 있어서,

- 상기 풍력 발전 설비는 기어리스형(gearless) 풍력 발전 설비로서 형성되고,
- 추가적으로 또는 대안적으로 상기 동기식 발전기는 링 발전기로서 형성되고,
- 추가적으로 또는 대안적으로 상기 고정자에는 적어도 2개의 3상 시스템이 마련되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 5

제1항 내지 제4항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 동기식 발전기의 적어도 하나의 인덕턴스는 포화 범위에서 작동되고, 상기 포화로 인해 변경된 적어도 하나의 파라미터가 추정 장치 또는 상기 추정 장치에 의해 검출되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 6

제1항 내지 제5항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 동기식 발전기의 파라미터를 추정하기 위한 추정 장치 또는 상기 추정 장치는

- 적어도 하나의 고정자 전압, 특히 복수의 3상 고정자 시스템 중 하나의 3개의 고정자 전압, 및 추가적으로 또는 대안적으로
- 적어도 하나의 고정자 전류, 특히 상기 동일한 3상 고정자 시스템 또는 복수의 3상 고정자 시스템 중 하나의 3개의 고정자 전류를 상기 파라미터를 추정하기 위한 입력 변수로서 고려하는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 7

제1항 내지 제6항 중 어느 한 항에 있어서,

추정 장치 또는 상기 추정 장치는 상기 동기식 발전기의 자화 인덕턴스의 d/q -성분을 추정 변수로서 추정하는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 8

제1항 내지 제7항 중 어느 한 항에 있어서,

- 상기 적응성 제어 장치는 상기 고정자 목표 전류를 d/q -좌표로 결정하고,
- 상기 출력되는 결정된 고정자 전류를 상기 고정자 목표 전류로 조정하도록 상기 정류기를 제어하기 위해 상기 고정자 목표 전류는, 상마다 전류값을 갖는 3상 표현으로 다시 변환되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 9

제1항 내지 제8항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 중간 직류 링크는 인버터에 연결되고, 상기 인버터는 상기 중간 직류 링크의 에너지를 전기 공급 네트워크로 공급하기 위한 3상 전류로 변환하는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 10

제1항 내지 제9항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 목표 전력은 상기 검출된 회전 속도의 함수로서, 그리고 상기 발전기 또는 상기 풍력 발전 설비의 검출된 출력 전력의 함수로서 결정되어, 특히

- 상기 검출된 회전 속도로부터 중간 전력이 결정되고,
- 목표값으로서의 상기 중간 전력 및 실제값으로서의 상기 검출된 출력 전력으로부터, 목표 실제값 비교를 통해 조절 편차가 결정되고,
- 상기 조절 편차는 조절기, 특히 PI-조절기에 제공되어, 이를 통해 상기 목표 전력이 결정될 수 있는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 11

제1항 내지 제10항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 적응성 제어 장치는 상기 발전기의 효율이 최대화되도록 제어되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 12

제1항 내지 제11항 중 어느 한 항에 있어서,

- 적어도 하나의 자화 인덕턴스를 추정하거나 또는 결정하기 위해, 각각 인덕턴스 특성 곡선이 사용되고, 상기 인덕턴스 특성 곡선은 자화 전류의 함수로서 상기 각각의 자화 인덕턴스의 값을 사전 설정하고,
- 상기 인덕턴스 특성 곡선의 값들은 초기 특성 곡선에서 시작하여 점차로 프로세스의 진행 중에 추정 또는 상기 추정에 의해 적응되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 13

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서,

상기 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})을 결정하기 위해,

- 상기 고정자 목표 전류들의 각각의 고정자 목표 전류에 대해 각각 고정자 목표 전류 특성 곡선이 사용되고,
- 상기 고정자 목표 전류 특성 곡선은 상기 출력되는 목표 전력과 상기 각각의 결정되는 고정자 목표 전류 사이의 관계를 각각 나타내고,
- 상기 각각의 고정자 목표 전류 특성 곡선에 따라, 상기 출력되는 목표 전력의 함수로서 상기 고정자 목표 전류들의 각각의 고정자 목표 전류가 결정되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 14

제13항에 있어서,

- 상기 고정자 전류 특성 곡선 중 적어도 하나, 특히 상기 고정자 전류 특성 곡선의 각각은 변화된 조건에 대해 반복적인 루틴으로 적응되고,
- 상기 적어도 하나의 고정자 전류 특성 곡선은
- 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$),
- 추정된 고정자 저항($\hat{R}_{stator}$) 및
- 추정된 여자 저항($\hat{R}_{err}$)

을 포함하는 리스트로부터의 하나의, 복수의 또는 모든 변수의 함수로서 적응되고,

- 상기 반복적인 루틴은, 상기 각각의 고정자 목표 전류 특성 곡선에 따라 상기 출력되는 목표 전력의 함수로서

상기 고정자 목표 전류들 중 하나가 각각 결정되는 것보다 덜 빈번하게 실행되고, 특히 상기 반복적인 루틴은 0.01 Hz 내지 10 Hz 범위의 주파수로 반복되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 15

제1항 내지 제12항 중 어느 한 항에 있어서,

- 상기 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})은 온라인으로 상기 목표 전력(P_{set})에 따라, 그리고 적어도
- 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$)
- 추정된 고정자 저항($\hat{R}_{stator}$) 및
- 추정된 여자 저항($\hat{R}_{err}$)

을 포함하는 리스트 중 하나의, 복수의 또는 모든 변수에 따라 결정되는 것을 특징으로 하는 제어 방법.

청구항 16

다상 타여자 동기식 발전기를 구비하는 풍력 발전 설비로서,

- 상기 동기식 발전기는 고정자 및 회전자를 포함하고,
- 상기 회전자는 여자 전류 또는 여자 전압을 입력하기 위한 여자 입력부를 포함하고,
- 상기 여자 입력부에는, 상기 여자 전류 또는 상기 여자 전압을 입력하기 위해 여자 제어기가 연결되고,
- 상기 고정자는 고정자 전류를 출력하기 위한 고정자 출력부를 포함하고,
- 상기 고정자의 상기 출력부에는 정류기가 연결되어, 상기 고정자 전류를 정류하고 이를 상기 정류기에 연결된 중간 직류 링크로 제공하며,
- 상기 정류기는 상기 고정자 전류를 제어하도록 제어될 수 있고,

상기 동기식 발전기를 제어하기 위해,

- 상기 회전자 또는 공기 역학적 로터의 회전 속도를 검출하기 위한 회전 속도 검출기가 제공되고,
- 제어 장치가 제공되어,
- 상기 검출된 회전 속도에 따라 상기 동기식 발전기 또는 상기 풍력 에너지로부터 출력되는 목표 전력을 결정하도록, 그리고
- 상기 검출된 회전 속도 및 상기 결정된 목표 전력에 따라 여자 전류 또는 여자 전압을 결정하도록 준비되고,

- 상기 여자 제어기는 이렇게 결정된 상기 여자 전류 또는 이렇게 결정된 상기 여자 전압을 상기 여자 입력부에 입력하도록 준비되고,

- 상기 제어 장치는

- 상기 검출된 회전 속도 및 상기 결정된 목표 전력에 따라, 상기 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하도록, 그리고
- 상기 고정자 출력부에서 출력되는 상기 결정된 고정자 전류를 상기 고정자 목표 전류로 조정하기 위해 상기 정류기를 제어하도록

준비되고,

- 상기 여자 전류 또는 상기 여자 전압을 결정하는 상기 단계, 및
 - 상기 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 상기 단계
- 중 적어도 하나의 단계를 위해

- 상기 제어 장치는 적응성 제어 장치로서 제공되고, 상기 제어 장치는 상기 여자 전류 또는 상기 여자 전압 또는 상기 출력되는 고정자 전류가 상기 제어 장치의 제어 변수를 형성하도록 구성되는, 풍력 발전 설비.

청구항 17

제16항에 있어서,

상기 풍력 발전 설비, 특히 상기 제어 장치는 제1항 내지 제15항 중 어느 한 항에 따른 방법을 수행하도록 준비되는 것을 특징으로 하는 풍력 발전 설비.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 풍력 발전 설비의 다상(multi-phase) 타여자(separately excited) 동기식 발전기를 제어하기 위한 방법에 관한 것이고, 본 발명은 또한 대응하는 풍력 발전 설비에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 풍력 발전 설비는 공지되어 있으며, 풍력 발전 설비는 공기 역학적 로터 및 이와 결합된 전기 발전기에 의해 바람 에너지를 전기 에너지로 변환한다. 여기서, 상이한 발전기 개념들이 존재한다. 오늘날에는 특히 이중 공급 비동기식 기계, 일정한 여자, 즉 균일한 자기장을 갖는 동기식 발전기, 및 타여자 동기식 발전기가 일반적이다. 본 발명은 여기서 언급된 이중 공급 비동기식 발전기 또는 언급된 영구 여자 동기식 발전기에 관한 것은 아니며, 본 발명은 타여자 동기식 발전기에 관한 것이다.

[0003] 이중 공급 비동기식 기계와의 차이점은 다양하므로, 발전기 및 발전기 제어기와 관련하여 이중 공급 비동기식 기계는 다른 유형인 것으로 간주될 수 있다.

[0004] 영구 여자 동기식 발전기와의 차이점은, 특히 본 발명에 따라 고려되는 타여자 동기식 발전기가 여자를 통해 또한 제어될 수 있다는 것이다. 이와 관련하여, 타여자 동기식 발전기라 함은, 또한 동기식 발전기의 회전자에 여자 전류 또는 여자 전압을 통해 여자되는 것으로 이해되어야 한다. 이에 대응하여, 여자 전류 또는 여자 전압의 조정을 통해 작동점에 영향을 줄 수 있다. 회전자라는 용어는 여기서 특히 풍력 발전 설비의 공기 역학적 로터, 즉 바람에 의해 움직이는 로터 블레이드를 포함하는 로터와의 혼동을 방지하기 위해 사용된다.

[0005] 그 외에도, 기본적으로 기어리스형(gearless) 및 기어형(g geared) 풍력 발전 설비 사이에도 또한 구별된다. 본 발명에 특히 관련되는 기어리스형 풍력 발전 설비에서, 발전기의 회전자는 공기 역학적 로터에 기계적으로 직접 결합되어, 회전자와 공기 역학적 로터는 작동 중에 동일한 회전 속도를 갖는다.

[0006] 타여자 동기식 발전기는 특히, 한편으로는 여자 전류 또는 여자 전압이 조정됨으로써 제어되고, 다른 한편으로는 전력 추출을 제어함으로써, 여기서 - 간단히 말하면 - 동기식 발전기의 고정자에 대한 전기 부하가 제어됨으로써 제어될 수 있다.

[0007] 이러한 제어는 실질적으로 풍력 발전 설비의 작동점에 의존하여 수행되는데, 이것은 종종 우세한 풍속에 의존하여 이루어진다는 것을 또한 의미한다. 그러나, 예를 들어 풍력 발전 설비가 전력을 공급하는 전기 공급 네트워크의 네트워크 작동자로부터의 대응하는 직접 또는 간접적인 요구와 같이, 작동점을 변경하기 위한 다른 이유도 또한 존재할 수 있다. 또한, 안전 또는 환경 보호와 관련된 상황 또는 사전 설정 조건이 작동점의 변경을 필요로 할 수도 있다.

[0008] 또한 실질적으로, 부분 부하 작동과 완전 부하 작동 사이가 구별된다. 부분 부하 작동 동안, 적어도 일부 조절 개념에 따르면, 풍력 발전 설비의 회전 속도 및 전력은 우세한 풍속에 따라 조정된다. 한편, 완전 부하 작동에서는, 풍력 발전 설비가 공칭 전력 및 공칭 회전 속도로 제한되고, 이에 따라 어떠한 경우에도, 고정된 작동점에서 작동된다. 이 경우, 공칭 회전 속도 및 공칭 전력으로 제한하는 것은 특히 로터 블레이드의 조절을 통해 달성되는데, 즉 바람이 증가함에도 불구하고 바람으로부터 더 이상 전력이 추출되지 않도록, 바람이 증가함에 따라 이러한 로터 블레이드가 바람으로부터 회전됨으로써 달성된다.

[0009] 이 경우, 부분 부하 작동에서 작동점의 조정은, 일반적으로 공기 역학적으로 최적으로 가정되는 일정한 블레이드 각도가 로터 블레이드에 대해 조정되는 방식으로 수행된다. 그런 다음, 로터 블레이드는 바람에 의해 구동되고, 회전 속도가 조정된다. 이러한 회전 속도에 의존하여, 풍력 발전 설비 및 이에 따라 결과적으로 발전기

의 출력 전력이 조정된다. 이러한 발전기 전력이 바람으로부터 취출되는 전력에 대응하는 경우, 회전 속도 및 전력에 대해, 대응하는 안정적인 동작점이 조정된다. 그렇지 않으면, 회전 속도가 변경되고, 안정적인 작동점이 발견될 때까지 새로운 회전 속도에 대응하여 새로운 전력값이 조정된다.

[0010] 발전기에서의 전력의 조정은 마찬가지로 특성 곡선 또는 테이블, 즉 소위 록업 테이블에 기초하여 수행될 수도 있다. 여기에 조정될 여자 전력, 즉 조정될 조절 전류 또는 여자 전압이 또한 저장될 수 있다.

[0011] 이와 관련하여, 풍력 발전 설비는 또한 기본적으로 신뢰성 있고, 효율적으로 제어될 수 있다. 그러나, 특성 곡선 또는 저장된 테이블은 부정확하거나 또는 적어도 개선이 필요한 것으로 입증될 수 있는데, 왜냐하면 예를 들어 동적 과정이 양호하지 않게 맵핑될 수 있기 때문이다. 또한, 예를 들어 열적 영향과 같은 일시적인 변경도 테이블에 양호하지 않게 맵핑될 수 있거나 또는 다른 테이블 수준 또는 테이블 차원을 필요로 할 수 있다. 노화 과정으로 인해 발생할 수 있는 영구적인 편차의 경우에도 또한 마찬가지이다. 또한, 예를 들어 이미 언급된 온도와 같은 다른 영향 변수와 함께, 비선형성도 테이블에서 양호하지 않게 맵핑될 수 있다.

[0012] 최적이지 아닌 테이블을 사용함으로써, 테이블이 단지 일시적으로만 최적이지 아닌 경우에도, 성능이 저하될 수 있다. 적어도 풍력 발전 설비가 최적의 성능으로 동작하지 않을 수 있다.

[0013] 테이블 엔트리의 지속적인 재계산에 의해 해결될 수 있지만, 그러나 이러한 계산에 필요한 입력 변수를 알지 못하거나, 또는 확인하기 어려운 경우, 이것은 매우 소모적이고, 특히 어렵거나 또는 전혀 가능하지 않을 수도 있다.

[0014] 독일 특허 및 상표청은 본 출원에 대한 우선권 출원에서 다음과 같은 종래 기술들을 조사하였다: C. D. Nguyen 및 W. Hofmann: "타여자 동기식 모터의 자체 조정 적응성 구리-손실 최소화 제어(Self-tuning adaptive copper-losses minimization control of externally excited synchronous motors)", 2014 전기 기계 국제 회의(ICEM), 베를린, 2014년, 페이지 897-902 (출원인), DE 10 2010 043 492 A1호, DE 11 2016 000 455 T5호, EP 2 672 624 A1호, DE 10 2011 006 670 A1호 및 DE 10 2016 106 590 A1호.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0015] 따라서, 본 발명의 과제는 상기 언급된 문제점들 중 적어도 하나를 해결하는 것이다. 특히, 다상 타여자 동기식 발전기의 제어를 개선하여, 특히 전력 수율이 적어도 증가하고, 가능한 한 최적화되는 해결 방안이 제안되어야 한다. 적어도 지금까지 공지된 해결 방안에 대한 대안이 제안되어야 한다.

과제의 해결 수단

[0016] 본 발명에 따르면, 청구항 제1항에 따른 방법이 제안된다.

[0017] 따라서, 풍력 발전 설비의 동기식 발전기가 제어된다. 이러한 발전기는 다상이며, 바람직하게는 하나의 3상 시스템뿐만 아니라, 복수의 3상 시스템을 포함한다. 이에 대응하여, 동기식 발전기는 또한 다극성 동기식 발전기, 특히 기어리스형 풍력 발전 설비의 저속 작동되는 링 발전기이다.

[0018] 또한, 동기식 발전기는 타여자되는데, 즉 외부로부터, 즉 여자 제어기에 의해 대응하는 여자 전력을 입력함으로써 여자를 획득한다. 고정자 및 회전자를 포함하는 동기식 발전기는 따라서, 여자 전류 또는 여자 전압을 통해 여자 전력을 입력하기 위해 회전자에 여자 입력부를 갖는다. 이를 위해, 여자 입력부에 여자 제어기가 연결되는데, 이 여자 제어기는 예를 들어 전류 제어기로서 형성될 수 있고, 회전자를 여자시키기 위해 대응하는 직류를 여자 전류로서 입력할 수 있다. 여자 제어기, 즉 예를 들어 언급된 직류 제어기를 통해, 이러한 예시를 유지하는 경우, 여자 전류가 직류 제어기를 통해 이에 대응하여 조정됨으로써, 여자 전력의 진폭이 또한 조정될 수 있다.

[0019] 생성된 전력을 출력하기 위해, 고정자는 고정자 전류가 출력되는 고정자 출력부를 포함한다. 이 경우, 동기식 발전기의 다상성은 특히 고정자 전류와 관련된다. 따라서, 본 명세서에서 바람직한 변형예로서 제안되는 2개의 3상 시스템을 갖는 동기식 발전기는 상이한 상의 6개의 고정자 전류를 출력하거나 또는 6상 고정자 전류를 출력한다.

[0020] 고정자 출력부에는 정류기가 연결되어, 고정자 전류를 정류하고 이를 정류기에 연결된 중간 직류 링크로 제공한다. 따라서, 상기 예시를 유지하는 경우, 고정자 전류의 모든 상, 즉 예를 들어 6상이 정류되고, 중간 직류 링

크에 제공된다. 따라서, 출력되는 발전기 전력이 중간 직류 링크에 제공된다. 중간 직류 링크로부터, 이와 같이 제공되는 전력은 예를 들어 전기 공급 네트워크로 공급하기 위해, 인버터에 의해 인버팅될 수 있고, 전기 공급 네트워크의 요구에 적응될 수 있다.

[0021] 또한, 정류기는 고정자 전류를 제어하도록 제어될 수도 있다. 따라서, 정류기의 역할은 중간 직류 링크에서 발전기에 의해 출력된 전력을 제공하는 것뿐만 아니라, 정류기가 고정자 전류의 제어를 통해 발전기의 제어도 또한 담당하는 것이다. 따라서, 고정자 전류를 제어함으로써 발전기의 작동점이 조정될 수 있거나 또는 영향을 받을 수 있다.

[0022] 따라서, 본 명세서에서 제안되는, 그리고 또한 추가의 단계에 기초하는 동기식 발전기의 시스템은 적어도 여자 전력의 제어를 통해, 발전기, 특히 그 작동점의 제어를 가능하게 하고, 고정자 전류의 제어는 발전기, 특히 그 작동점의 추가 제어를 가능하게 한다. 따라서, 발전기의 작동점은 적어도 이러한 2개의 개입 가능성을 통해 제어될 수 있다.

[0023] 이러한 시스템에 대해, 제어를 위한 또는 제어의 준비를 위한 다음의 단계들이 제안된다.

[0024] 우선, 회전자의 회전 속도가 검출된다. 이러한 회전 속도는 측정될 수 있거나, 또는 제어기에 이미 존재하는 회전 속도의 값이 종종 사용될 수 있다. 회전 속도를 검출하는 단계 및 이하에서 더 설명될 추가의 단계들은 기본적으로 지속적으로, 반복적인 루틴으로 수행된다. 특히, 검출의 방법 단계는 또한 동시에 수행될 수도 있다.

[0025] 또한, 동기식 발전기 또는 풍력 발전 설비에 의해 출력되는 전력이 결정되고, 따라서 목표 전력을 형성한다. 이것은 회전 속도의 함수로서 수행된다. 특히, 회전 속도와 전력 간의 관계를 사전 설정하는 회전 속도-전력 특성 곡선을 여기서 사용할 수 있으며, 이에 대응하여 회전 속도에 의존하여 해당 전력값이 회전 속도-전력 특성 곡선으로부터 추출되고, 목표 전력으로서 사용된다. 그러나, 예를 들어 단지 2개의 예시만 언급하자면, 예를 들어 소음 감소를 위한 회전 속도 감소를 규정하는 외부 사전 설정 조건, 또는 다른 자연 보호 이유와 같은 다른 조건들이 또한 고려될 수도 있다.

[0026] 간단히 말해서, 이하에서는 또한 여자 전압을 대신하는 여자 전류가 선택되어, 목표 전력이 출력될 수 있다. 간단히 말해서, 목표 전력이 증가하면 여자 전류도 또한 증가하여, 발전기는 이러한 높은 전력을 출력할 수 있다. 그러나, 이것은 설명을 위한 예시일 뿐인데, 왜냐하면 기본적으로 회전 속도의 증가는 동일한 여자 전력 또는 동일한 여자 전류에서도 또한 동기식 발전기의 출력 전력을 증가시킬 수 있기 때문이다.

[0027] 어떠한 경우든, 이와 같이 결정된 여자 전류는 또한 발전기의 제어기에서 사용되고, 즉 회전자의 여자 입력부에 입력된다. 이미 설명된 바와 같이, 구현은 전류 제어기에 의해 수행될 수 있다.

[0028] 또한, 출력되는 고정자 전류는 검출된 회전 속도 및 결정된 목표 전력의 함수로서 또한 결정된다. 이 경우, 이와 같이 결정된 고정자 전류는 대응하는 고정자 목표 전류를 형성한다. 발전기의 출력되는 전력은 실질적으로 고정자 출력부에서 고정자 전류 및 해당 고정자 전압으로부터 생성된다. 그러나 이 경우, 발전기의 전체 균형을 위해 여자 전력을 추출해야 하며, 이는 예를 들어 언급된 전류 제어기에 의해 제공된다.

[0029] 또한, 고정자 출력부에서 출력되는 결정된 고정자 전류가 고정자 목표 전류로 조정되도록 정류기가 제어되는 것이 제안된다. 고정자 전류의 변수는 한편으로는 동기식 발전기, 즉 특히 조정된 여자 전력 및 회전자의 회전 속도로부터 생성된다. 다른 한편으로는, 고정자 전류는 또한 회로에 의존하며, 이는 여기서 실질적으로 제어된 정류기에 의해 형성된다. 기본적으로 고정자 출력부에 연결되는 필터도 또한 여기서 고려될 수 있다. 그러나, 이러한 필터는 또한 제어된 정류기에 의해 구현될 수 있다.

[0030] 따라서, 이제 제어기는 다음과 같이 동작한다. 회전자의 회전 속도가 검출되고, 이에 의존하여 목표 전력이 사전 설정되고, 이를 위해 여자 전류가 조정되고, 고정자 전류는 정류기를 통해 제어된다.

[0031] 또한, 여자 전류 또는 여자 전압을 결정하는 단계, 및 추가적으로 또는 대안적으로 출력되는 고정자 전류를 결정하는 단계, 즉 고정자 목표 전류를 결정하는 단계가 적응성 제어 장치에 의해 수행되는 것이 제안된다. 여자 전류 또는 여자 전압 및 출력되는 고정자 전류, 즉 고정자 목표 전류는 여기서 제어 장치의 제어 변수를 형성한다. 즉, 여자 전류 또는 여자 전압의 적어도 하나의 적응성 제어가 제안되고, 추가적으로 또는 대안적으로 고정자 전류의 적응성 제어가 제안된다.

[0032] 이 경우, 적응성 제어는 즉, 특정의 것에 적응되는 제어, 파라미터에 적응되지만, 그러나 제어 기술적 의미에서

상태 변수에는 적응되지 않는 이러한 제어이다.

- [0033] 이와 관련하여, 회전자의 검출된 회전 속도는 상태 변수이고, 또한 출력되는 전력, 즉 목표 전력도 마찬가지로 상태 변수이다.
- [0034] 파라미터, 즉 시스템 파라미터는 시스템의 특성, 즉 예를 들어 발전기의 내부 저항 또는 인덕턴스이다.
- [0035] 일 실시예에 따르면, 동기식 발전기의 파라미터는 추정 장치에 의해 동기식 발전기의 추정 변수로서 추정되고, 적응성 제어 장치는 제어 변수를 결정하기 위해 추정 변수를 고려하는 것이 제안된다. 따라서, 적응성 제어 장치는 여자 전류 또는 여자 전압 및 추가적으로 또는 대안적으로 출력되는 고정자 전류를 제어 변수로서 제어하는 장치이다. 이 경우, 이러한 제어 장치는 이러한 제어 변수를 결정하기 위해 추정 변수를 고려한다. 특히, 제어 장치는 이를 위해 가장 간단한 경우 증폭 계수 및/또는 적어도 하나의 시간 상수를 포함할 수 있는 적어도 하나의 제어 법칙을 포함한다. 이러한 제어 법칙은 추정 변수를 고려하여 조정될 수 있거나 또는 변경될 수 있다.
- [0036] 따라서, 여기서 파라미터의 추정이라 함은, 상태 추정이 아니라 특히 파라미터 식별인 것으로 이해된다.
- [0037] 예시적으로 표현하면, 예를 들어 한편으로는 검출된 회전 속도와 결정된 목표 전력 사이의 특성 맵 및 다른 한편으로는 여자 전류 또는 여자 전압 사이의 특성 맵을 통한 관계가 존재할 수 있다. 이러한 특성 맵은, 예를 들어 단순한 예를 언급하자면, 추정 변수의 함수로서, 적응을 통해 변경될 수 있는데, 예를 들어 시프트될 수 있다. 이 경우, 이것은 제어 장치의 적응에 대한 예시이다.
- [0038] 바람직하게는, 하나 이상의 자화 인덕턴스, 고정자 저항 및/또는 여자 저항이 동기식 발전기의 추정 변수로서 추정되고, 이 경우 적응성 제어 장치의 적응에 사용된다. 그런 다음, 적응성 제어 장치는 하나 이상의 추정된 자화 인덕턴스 및/또는 추정된 고정자 저항 및/또는 추정된 여자 저항에 의존한다.
- [0039] 여기서, 특히 언급된 3개의 변수들, 즉 자화 인덕턴스, 고정자 저항 및 여자 저항은 가변적일 수 있거나, 또는 부정확하게 알려질 수 있으며, 어떤 경우에는 일부 작동점에서 작동점 또는 작동점의 선택 또는 조정에 눈에 띄는 영향을 줄 수 있는 것으로 인식되었다. 추가적으로, 동기식 발전기의 하나 이상의 이러한 파라미터의 즉각적이거나 또는 직접적인 측정은 거의 가능하지 않거나, 적어도 어렵다는 것이 인식되었다. 이에 대응하여, 추정 방법이 제안된다. 바람직하게는, 추정 방법은 추정이 정상 작동 시 수행될 수 있도록, 즉 온라인으로 수행될 수 있는 방식으로 작동한다.
- [0040] 기본적으로, 파라미터 추정은 소모적일 수 있고, 컴퓨팅 용량 및/또는 컴퓨팅 시간을 요구할 수 있다. 그러나, 파라미터 추정은 여자 전류 또는 여자 전압 및 고정자 전류의 실제 조정보다 상당히 낮은 반복 속도로 수행될 수 있다는 것이 인식되었다. 따라서, 이러한 파라미터를 추정하기 위해, 비교적 느린 알고리즘이 제공될 수 있으며, 이는 또한 추정된 파라미터를 이에 대응하여 더 적은 빈도로 전송하는 것, 즉 낮은 전송율을 갖는 전송이 또한 수행될 수 있다는 이점을 갖는다. 이를 통해, 전송 채널의 부하가 또한 완화될 수 있거나, 또는 이러한 파라미터 추정을 도입함으로써 이러한 전송 시스템에 상당한 추가 부하가 발생할 필요가 없게 된다.
- [0041] 또한, 자화 인덕턴스는 특히 여자 전류에 영향을 주거나, 또는 특히 여자 전류의 변화에 영향을 주거나, 또는 자화 인덕턴스에 의존하여 여자 전류가 회전자에서 상이한 여자 전력을 발생시킨다는 것이 인식되었다. 이것은 이제, 제어 장치가 여기에 적응성으로 적응됨으로써 고려될 수 있다.
- [0042] 또한, 여자 저항은 여자 전류에 영향을 주거나, 또는 회전자에서 여자 전류의 영향을 변경할 수 있는데, 이러한 문제는 적응성 제어 장치에 의해 상쇄될 수 있다.
- [0043] 고정자 저항은 특히 고정자 전류 또는 다상 고정자 전류에 영향을 준다. 이 경우, 고정자 저항은 특히 발전기의 무효 전력 성분에도 또한 영향을 준다. 고정자 저항에 의해, 고정자 코일에서의 고정자 전류와 고정자 전압 사이의 상 위치는 고정자 출력부에서의 고정자 전류와 출력 전압 사이의 상 위치와 비교하여 차이가 발생된다. 또한, 이것은 고정자 저항이 추정될 때, 제안된 적응성 제어 장치에 의해 고려될 수도 있다.
- [0044] 일 실시예에 따르면, 적응성 제어 장치는 제어 변수를 결정하기 위해 동기식 발전기의 모델을 고려하고, 모델 또는 이로부터 도출된 관계를 동기식 발전기의 추정된 변수 또는 동기식 발전기의 추정 변수의 함수로서 적응시키는 것이 제안된다.
- [0045] 특히, 이러한 모델은 제어 장치 또는 관련 계산 규칙에 기초로 제공되거나 또는 저장된다. 이러한 모델에 기초하여, 여자 전류 및 고정자 전류의 언급된 변수는 특히 발전기의 원하는 거동이 조정되도록, 특히 검출된 회전

속도의 함수로서 결정된 목표 전력이 조정되는 방식으로 조정될 수 있다. 이 경우, 동기식 발전기의 모델을 고려하면, 최적의 작동점을 조정하는데 또한 도움이 될 수 있다. 동기식 발전기의 모델이 기본으로 사용되면, 가능한 한 가장 낮은 손실로 원하는 목표 전력이 또한 발견될 수도 있다. 다시 말하면, 관련된 전류, 특히 고정자 전류가 전력 최적의 방식으로 선택될 수 있고, 조정될 수 있다.

[0046] 제안된 적응 및 여기서 동기식 발전기의 추정된 변수에 기초하여 본 실시예에서 제안된 모델의 적응에 의해, 이러한 모델은 또한 모델에서 고려된 동기식 발전기의 변수의 실제 변화가 추적되는 것이 달성될 수 있다. 특히 이를 통해, 제어 장치가 여자 전류 및/또는 고정자 전류를 잘못된 모델에 기초하여 결정하거나 또는 사전 설정하는 것이 방지된다. 맵핑하려는 모델이 실제 시스템과 크게 상이한 경우에, 특히 모델의 사용은 문제가 될 수 있다. 이러한 문제는 동기식 발전기의 추정 변수에 기초하여 제안된 적응에 의해 방지되고, 적어도 감소된다.

[0047] 다른 실시예에 따르면, 풍력 발전 설비는 기어리스형 풍력 발전 설비로서 형성되고, 추가적으로 또는 대안적으로, 동기식 발전기는 링 발전기로서 형성되는 것이 제안된다. 즉, 본 방법은 이러한 특수 풍력 발전 설비에 적용된다. 기어리스형 풍력 발전 설비는 발전기의 회전자가 풍력 발전 설비의 공기 역학적 로터에 직접 기계적으로 결합된다. 이것은 특히, 회전자가 매우 저속으로, 즉 공기 역학적 로터의 회전 속도에 의해 회전된다는 것을 의미한다. 공기 역학적 로터의 공칭 회전 속도는 대략 5 내지 10 rpm의 범위에 있다. 적어도, 여기서 바람직하게는 이러한 풍력 발전 설비인 것으로 가정된다. 이 경우, 이것은 공칭 작동 시 발전기 또는 로터의 회전 속도에 대응하고, 부분 부하 작동 시 회전 속도는 그 이하이다.

[0048] 따라서, 이러한 실시예에 따르면, 제안된 방법은 저속으로 작동하는 발전기에 관한 것이다. 이러한 발전기를 제어하는 것은 특히 1500 또는 3000 rpm의 공칭 회전 속도를 포함하는 표준 발전기를 제어하는 것과는 크게 상이할 수 있다. 기어리스형 풍력 발전 설비의 이러한 발전기는 종종 풍력 발전 설비를 위해 각각 제조되고, 이러한 제조는 일반적으로 높은 수동 부분을 포함하기 때문에, 어느 정도 독특하다.

[0049] 이는 제안된 링 발전기에도 유사하게 적용되는데, 이러한 제안된 링 발전기는 특히 적어도 48개, 특히 적어도 96개 및 특히 192개의 매우 많은 극 쌍을 특징으로 한다. 링 발전기는 에어 갭 영역의 링에만 자기 유효 영역을 포함한다. 특히, 링 발전기는 에어 갭 직경의 0 내지 적어도 50 %의 직경의 회전 축 주위의 내부 영역에 자기 유효 물질이 없거나 또는 자기 유효 영역을 포함하지 않는 것을 특징으로 한다. 다시 말하면, 이러한 내부 영역에는, 만일 존재한다면, 지지 구조 또는 경우에 따라서는 환기 지지 구조 등이 존재한다. 또한, 이러한 링 발전기는 1500 또는 3000 rpm의 회전 속도로 설계된 기존의 발전기와는 매우 다르게 거동된다.

[0050] 추가적으로 또는 대안적으로, 고정자에는 적어도 2개의 3상 시스템이 존재한다. 그러나, 예를 들어 4개의 3상 시스템도 또한 고려될 수 있다. 여기서 각각의 3상 시스템은 실질적으로 독립적인 고정자 시스템을 형성하고, 여기서 공통 로터가 사용된다. 고정자 내의 2개의 3상 시스템의 경우, 이들은 바람직하게는 30도 정도 서로에 대해 상이 시프트된다. 따라서, 발전기의 양호한 이용이 달성될 수 있으며, 특히 이러한 6개의 상의 정류 시 높은 수준의 평활화도 또한 달성될 수 있다. 그럼에도 불구하고, 모델에 의존하여 고려할 때, 더 많은 노력이 필요할 수 있다.

[0051] 그럼에도 불구하고, 제안된 적응성 제어 장치 및 특히 파라미터의 추정에 의해 높은 품질이 달성될 수 있는 것이 인식되었다. 동시에, 이러한 적어도 2배의 3상 고정자 시스템을 통해, 또한 개별 고정자 전류, 즉 총 고정자 전류의 상이 특히 작은 전류값을 포함할 수 있는 것이 달성될 수 있다. 또한, 적어도 부분적인 장애 방지가 또한 제공된다. 적어도 2개의 3상 고정자 시스템 중 하나가 고장인 경우, 발전기가 만일의 경우 공칭 전력을 더 이상 제공할 수 없는 경우에도 또한 나머지 시스템은 여전히 작동될 수 있다.

[0052] 특히, 동기식 발전기의 기본 모델이 고정자에서 적어도 이러한 2개의 3상 시스템을 맵핑하는 것, 즉 적어도 2개의 3상 고정자 시스템을 맵핑하는 것이 제안된다.

[0053] 바람직하게는, 동기식 발전기의 적어도 하나의 인덕턴스는 포화 범위에서 작동되고, 이러한 포화로 인해 변경된 적어도 하나의 파라미터가 추정 장치에 의해 검출된다. 인덕턴스의 포화는 자계 강도의 추가적인 증가에도 불구하고, 자속 밀도가 더 이상 증가하지 않거나 또는 적어도 크게 증가하지는 않는 것을 의미한다. 이것은 일반적으로, 관련된 구성 요소가 그 거동이 옴 저항에 접근하는 것으로 이어질 수 있다. 따라서, 포화가 비교적 어렵게 추정될 수 있는 경우에도, 이러한 파라미터 변화는 추정 장치에 의해 검출될 수 있다. 따라서, 바람직한 구현으로서, 사용된 모델은 이에 대응하여 적응될 수 있다.

[0054] 바람직하게는, 동기식 발전기의 거동을 이에 대응하여 조정하기 위해, 적어도 하나의 인덕턴스가 포화 범위에서 작동되는 작동점이 의도적으로 선택된다. 특히, 이는 커플링 인덕턴스와 관련이 있으며, 이 경우 변환된 인덕

턴스와도 또한 관련될 수 있다. 포화는 동기식 발전기의 스테이터와 로터 모두에서 물리적으로 조정될 수 있다. 이 경우, 작동점은 특히 자화 인덕턴스가 포화 모드에서 작동되도록 선택된다.

- [0055] 일 실시예에 따르면, 동기식 발전기의 파라미터를 추정하기 위한 추정 장치는 적어도 하나의 고정자 전압, 및 추가적으로 또는 대안적으로 적어도 하나의 고정자 전류를 파라미터를 추정하기 위한 입력 변수로서 고려하는 것이 제안된다. 특히, 고정자 전압 및/또는 고정자 전류로부터 동기식 발전기의 관련 파라미터가 추정될 수 있다. 이와 관련하여, 고정자 전압 및/또는 고정자 전류를 통해 관련 파라미터가 추정될 수 있는 것이 인식되었다.
- [0056] 바람직하게는, 복수의 3상 고정자 시스템 중 하나의 시스템의 3개의 전압 모두가 파라미터 추정을 위해 사용된다. 추가적으로 또는 대안적으로, 하나의 또는 동일한 3상 고정자 시스템의 3개의 전류가 모두 추정을 위해 사용된다.
- [0057] 여기서, 특히 대응하는 고정자 전압 또는 고정자 전류를 사용하여, 고정자의 3상 시스템이 동기식 발전기의 관련 파라미터를 추정하기 위해 사용될 수 있고, 특히 충분하다는 것이 인식되었다. 즉, 복수의 3상 고정자 시스템이 존재하는 경우에도 또한 충분하다는 것이 인식되었다. 이러한 복수의 3상 고정자 시스템이 기본적으로 서로 독립적으로 동작하더라도, 이들의 파라미터는 구조적 근접성으로 인해 충분히 유사하다. 마찬가지로, 회전자의 하나의 파라미터 또는 복수의 파라미터가 추정되는 경우, 추정을 위한 복수의 3상 고정자 시스템 중 하나의 시스템의 사용도 또한 충분할 수 있다는 것이 인식되었다.
- [0058] 이러한 지식에 관계없이, 바람직하게는 특히 중복을 목적으로, 그러나 단지 이를 위해서만은 아니지만, 추정을 위해 3상 고정자 시스템 중 복수 개, 특히 2개 초과인 경우, 모든 3상 고정자 시스템이 사용되는 것이 제안될 수 있다. 이를 위해, 또한 고정자 전압 및/또는 고정자 전류가 각각 검출되고, 추정을 위해 평가된다.
- [0059] 일 실시예에 따르면, 추정 장치는 동기식 발전기의 자화 인덕턴스의 d/q-성분을 추정 변수로서 추정하는 것이 제안된다. 3상 시스템은 공지된 방식으로, 소위 d/q-변환에 의해 d/q-성분으로 변환될 수 있다. 이 경우, 이러한 성분은 d-및 q-성분이라는 2개의 성분이 있는 기본 3상 시스템을 재현하고, 이는 회전자 또는 로터와 함께 회전되는 회전 시스템과 관련된다. 이러한 성분은 이에 대응하여, 동기식 발전기, 특히 고정자의 유도성 거동에 의해 또한 영향을 받는다. d/q-성분을 고려할 때, 동기식 발전기의 관련된 유도성 거동은 또한 d-성분과 q-성분으로 나눌 수 있는데, 즉 이것은 회전자의 회전과 관련될 수 있다. 이러한 성분들은 발전기의 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})로도 또한 지칭된다. 이를 위해, 따라서 자화 인덕턴스의 d/q-성분을 형성하는 이러한 2개의 자화 인덕턴스가 추정되는 것이 제안된다. 이 경우 바람직하게는, 이와 같이 추정된 자화 인덕턴스의 d/q-성분은 동기식 발전기의 모델의 일부로서 또한 사용된다. 예시적인 계산의 세부 사항은 방정식을 사용하여 이하에서 더 설명되고, 추가적으로 자화 인덕턴스, 즉 d-성분과 여자 전류 사이에 관계가 존재하는 것을 또한 알 수 있는데, 왜냐하면 d/q-변환은 변환된 3상 시스템의 d-성분이 자기 여자의 자속 밀도를 맵핑하는 방식으로 구성되기 때문이다. 이와 관련하여, 여자 전류는 d-성분으로 또한 간주될 수 있으며, 여기서 이러한 성분은 기본적으로 여자 전류에 대응하며, 이는 또한 직류로서 입력된다. 경우에 따라서는, 실제로 입력되는 여자 전류로부터 여자 전류의 이러한 d-성분으로의 변환이 또한 필요하다.
- [0060] 풍력 발전 설비의 공기 역학적 로터와의 혼동을 피하기 위해, 회전자라는 용어가 발전기의 로터를 지칭하기 위해 사용된다는 점에 유의해야 한다. 그러나, 전자 기술적으로 일반적으로 사용되는 명칭은 로터이고, 따라서 여기서 때때로 발전기와 관련하여 로터로도 또한 언급되는데, 이는 회전자라는 용어와 동의어로 이해되어야 한다. 따라서 특히, 로터 또는 회전자와 관련된 변수는 로터 변수, 예를 들어 로터와 관련된 필드를 나타내는 로터 필드 또는 로터의 필드를 나타내는 로터 변수로도 또한 지칭된다. 따라서, 일부 변수들은 또한 로터라는 용어 또는 그 축약어를 색인으로 사용한다.
- [0061] 동기식 발전기의 토크는 고정자 전류의 d/q-성분, 자화 인덕턴스의 d/q-성분 및 여자 전류 또는 고정자로 변환된 여자 전류(I'_{fd})에 바로 의존한다는 것이 특히 인식되었다. 이하에서 방정식(1)에서 또한 더 특정되는 이러한 관계에 대한 지식에 따라, 고정자 전류 또는 복수의 고정자 전류 및 여자 전류는 특히 손실이 최소화되는 방식으로 결정될 수 있다. 여기서, 다음의 방정식(1)이 2개의 3상 고정자 시스템에 대해 특정되는 바와 같이, 각각의 3상 고정자 전류는 자체 d-성분 및 자체 q-성분을 포함하는 복수의 3상 고정자 전류가 고려될 수 있는 점에 유의해야 한다. 따라서, 토크는 발전기의 모든 3상 고정자 전류의 모든 d-성분 및 q-성분에 의존한다.
- [0062] 다른 실시예에 따르면, 적응성 제어 장치는 고정자 목표 전류를 d/q-좌표로 결정하고, 출력되는 결정된 고정자 전류를 고정자 목표 전류로 더 잘 조정하도록 정류기를 제어하기 위해 고정자 목표 전류는, 상마다 전류값을 갖

는 3상 표현으로 다시 변환되는 것이 제안된다. 따라서, 계산은 d/q-좌표로 수행되는 반면, 개별 상 전류는 각각 이러한 고정자 전류를 조정하기 위해 목표 전류, 즉 상 목표 전류로 사전 설정된다.

[0063] 바람직하게는, 중간 직류 링크는 인버터에 연결되고, 인버터는 중간 직류 링크의 에너지 또는 전력을 전기 공급 네트워크로 공급하기 위한 3상 전류로 변환한다. 이를 통해 특히, 제어된 정류기 및 동기식 발전기의 여자 전류의 제어를 통해 가능한 한 최적으로 작동되는 것이 달성될 수 있으며, 동시에 전력 또는 전기 에너지를 전기 공급 네트워크로 독립적으로 공급하는 것이 수행될 수 있다. 특히, 인버터는 발전기가 작동점에 대해 각각 어떻게 작동되는지에 관계없이, 공급할 3상 전류의 주파수와 상을 자유롭게 사전 설정할 수 있다. 이 경우 궁극적으로, 발전기는 실질적으로 발전기가 생성하는 만큼의 양의 전력만이 지속적으로 공급될 수 있기 때문에, 공급될 전력만을 사전 설정한다.

[0064] 다른 실시예에 따르면, 목표 전력은 검출된 회전 속도의 함수로서, 그리고 발전기 또는 풍력 발전 설비의 검출된 출력 전력의 함수로서 전체적으로 결정되는 것이 제안된다. 따라서, 회전 속도뿐만 아니라, 현재 전력도 또한 고려된다.

[0065] 특히, 이것은 검출된 회전 속도로부터 중간 전력이 결정되는 방식으로 수행된다. 이러한 중간 전력은 이론적 목표 전력으로도 또한 지칭될 수 있다. 이와 관련하여 목표값으로 설정되는 이러한 중간 전력, 및 이와 관련하여 실제값을 형성하는 검출된 출력 전력으로부터, 목표 실제값 비교를 통해 조절 편차가 결정된다. 이 경우, 이러한 조절 편차는 조절기, 특히 PI-조절기에 제공되어, 이를 통해 목표 전력을 결정할 수 있다. 이와 관련하여, 이러한 결정되는 목표 전력은 조정될 전력이다.

[0066] 예를 들어 회전 속도가 상승하여 중간 전력이 증가하게 되면, 우선 조절 편차가 조정되고, 명확하게 설명하자면, 그 후 보정된다. 특히 PI-조절기를 사용하는 이러한 보정을 통해, 조정되어야 할 전력과 실제 전력 사이의 차이가 보상될 수 있다. 또한, 이러한 조절기를 통해, 전력 추적의 동적 거동에도 또한 더 잘 영향을 받을 수 있다. 바람직하게는, 이러한 조절기, 특히 언급된 PI-조절기는 동기식 발전기의 동적 거동에 맞춰지고, 특히 발전기의 런업 시간 상수에 맞춰지는데, 즉 이러한 런업 시간 상수의 함수로서 선택되거나 또는 파라미터화된다.

[0067] 특히, 적응성 제어 장치는 발전기의 효율이 최대화되도록 제어되는 것이 제안된다. 적응성 제어 장치와 함께 사용되는 제어된 정류기를 사용하는 경우, 발전기를 더 잘 제어하고, 특히 발전기의 변형도 또한 고려할 수 있는 가능성이 생성된다. 특히, 고정자 전류는 목표대로 그리고 가능한 한 정확하게 제어될 수 있고, 여자 전류 및 고정자 전류를 전체적으로 고려하고, 최적의 전체 조합을 발견하는 것도 또한 가능하다. 이를 통해, 특히 원하는 전력, 즉 발전기 또는 풍력 발전 설비의 원하는 출력 전력이 조정되어, 언급된 전류가 전체적으로 추적되고, 가장 낮은 손실을 갖는 것이 달성될 수 있다. 이 경우, 이것은 그 순간에 출력되는 원하는 전력에 대한 발전기의 최대 효율에 해당한다.

[0068] 다른 실시예에 따르면, 적어도 하나의 자화 인덕턴스를 추정하거나 또는 결정하기 위해, 각각 인덕턴스 특성 곡선이 사용되는 것이 제안된다. 이 경우, 인덕턴스 특성 곡선은 자화 전류의 함수로서 각각의 자화 인덕턴스의 값을 사전 설정하며, 여기서 인덕턴스 특성 곡선의 값들은 초기 특성 곡선에서 시작하여 점차로 프로세스의 진행 중에 추정에 의해 적응된다.

[0069] 이 경우, 인덕턴스 특성 곡선은 또한 자화 인덕턴스의 값들이 저장되는 룩업 테이블로서 구현될 수 있으며, 여기서 룩업 테이블의 값들은 초기 값들로부터 시작하여 점차로 프로세스의 진행 중에 추정에 의해 적응되는데, 즉 개선된다.

[0070] 따라서 다른 말로 하면, 자화 인덕턴스의 초기 값들은 적응 제어기에 예를 들어 인덕턴스 특성 곡선 및/또는 룩업 테이블의 형태로 저장되고, 이러한 초기 값들은 추정된 값으로 연속적으로 업데이트되는 것이 제안된다. 여기서 추정된 값들은 관찰자, 추정 알고리즘에 의해 또는 계산을 통해 결정될 수 있다. 이는 작동 중 자화 인덕턴스가 변경될 수 있다는 지식을 기반으로 한다. 특히, 이러한 변화는 열적으로 발생할 수 있다. 자화 인덕턴스의 적응은 고정자 전류를 생성하기 위해 자화 인덕턴스에 보다 정확한 값이 고려되는 것을 가능하게 한다.

[0071] 바람직하게는, 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})을 결정하기 위해, 고정자 목표 전류들 중 각각 하나에 대해 각각 고정자 목표 전류 특성 곡선이 사용되는 것이 제안된다. 이 경우, 고정자 목표 전류 특성 곡선은 출력되는 목표 전력과 각각 결정되는 고정자 목표 전류 사이의 관계를 각각 나타낸다. 이 경우, 각각의 고정자 목표 전류 특성 곡선에 따라, 출력되는 목표 전력의 함수로서 고정자 목표 전류들 중 하나가 각각 결정된다.

- [0072] 따라서, 인덕턴스 특성 곡선 외에도, 다른 특성 곡선, 즉 고정자 목표 전류 특성 곡선이 적응 제어기에 저장될 수 있다. 고정자 목표 전류 특성 곡선은, 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})을 출력되는 목표 전력(P_{set})의 함수로서 생성할 수 있는 기능을 수행한다. 이를 위해, 복수의 고정자 목표 전류 특성 곡선이 각각 고정자 목표 전류에 대해 적응 제어기에 저장될 수 있고, 그런 다음, 각각의 고정자 목표 전류 특성 곡선에 따라, 고정자 목표 전류들 중 하나를 각각 출력되는 목표 전력의 함수로서 생성한다.
- [0073] 또한, 고정자 전류 특성 곡선 중 적어도 하나, 특히 고정자 전류 특성 곡선의 각각은 변화된 조건에 대해 반복적인 루틴으로 적응되는 것이 제안된다. 이 경우, 적어도 하나의 고정자 전류 특성 곡선은 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$), 추정된 고정자 저항($\hat{R}_{stator}$) 또는 추정된 여자 저항($\hat{R}_{err}$)과 같은 하나의, 복수의 또는 모든 변수의 함수로서 적응된다. 따라서, 변경된 조건은 특히 이전에 언급된 3개의 변수와 관련이 있으며, 이들 3개의 변수는 작동 중에 변화될 수 있다. 따라서, 저장된 고정자 전류 특성 곡선의 변경 또는 적응이 제안되고, 이는 변경된 변수에 적응된다. 이 경우, 언급된 추정된 변수는 추정 장치 또는 관찰자에 의해 수신되어, 이를 제공한다. 따라서, 인덕턴스 특성 곡선과 관련하여, 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$)는 또한 점차로 프로세스의 진행 중에 적응되는 인덕턴스 특성 곡선의 값들일 수 있다.
- [0074] 이 경우, 고정자 전류 특성 곡선의 적응을 위한 반복적인 루틴은, 각각의 고정자 목표 전류 특성 곡선에 따라 출력되는 목표 전력의 함수로서 고정자 목표 전류들 중 하나가 각각 결정되는 것보다 덜 빈번하게 실행된다. 예를 들어 반복적인 루틴은 0.01 Hz 내지 10 Hz 범위의 주파수로 반복되는 반면, 고정자 목표 전류는 1 kHz 내지 16 kHz의 계산 주파수로 계산될 수 있다. 따라서, 반복적인 루틴은 고정자 목표 전류 특성 곡선을 업데이트하는 프로세스와 관련이 있다. 이러한 루틴은 고정자 목표 전류의 결정보다 예를 들어 분 간격으로 더 느리게 수행된다. 이와 비교하여, 고정자 목표 전류는 변환기의 구동에 필요한, 예를 들어 kHz 범위일 수 있는 고 주파수로 생성된다.
- [0075] 다른 실시예에 따르면, 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})은 온라인으로 목표 전력(P_{set})의 함수로서 결정되고, 적어도 다음의 변수들 중 하나, 복수의 또는 모든 변수, 즉 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$), 추정된 고정자 저항($\hat{R}_{stator}$) 또는 추정된 여자 저항($\hat{R}_{err}$)의 함수로서 결정되는 것이 제안된다. 따라서, 특성 곡선을 통해 고정자 목표 전류를 결정하는 대신에, 이러한 결정에 대한 다른 대안은 온라인 계산을 수행하는 것이다. 이를 위해, 계산 알고리즘이 적응 제어기에 저장될 수 있으며, 이는 이전에 결정된 추정 변수($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$, $\hat{R}_{stator}$, $\hat{R}_{err}$)로부터 온라인으로 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})을 계산한다. 특정 실시예에서, 이러한 온라인 계산은 대략 5 Hz 내지 100 Hz의 주파수로 수행된다.
- [0076] 본 발명에 따르면, 다상 타여자 동기식 발전기를 구비하는 풍력 발전 설비가 또한 제안되며, 여기서
- [0077] - 동기식 발전기는 고정자 및 회전자를 포함하고,
- [0078] - 회전자는 여자 전류 또는 여자 전압을 입력하기 위한 여자 입력부를 포함하고,
- [0079] - 여자 입력부에는, 여자 전류 또는 여자 전압을 입력하기 위해 여자 제어기가 연결되고,
- [0080] - 고정자는 고정자 전류를 출력하기 위한 고정자 출력부를 포함하고,
- [0081] - 고정자의 출력부에는 정류기가 연결되어, 고정자 전류를 정류하고 이를 정류기에 연결된 중간 직류 링크로 제공하며,
- [0082] - 정류기는 고정자 전류를 제어하도록 제어될 수 있고,
- [0083] 동기식 발전기를 제어하기 위해,
- [0084] - 회전자 또는 공기 역학적 로터의 회전 속도를 검출하기 위한 회전 속도 검출기가 제공되고,
- [0085] - 제어 장치가 제공되어,
- [0086] - 검출된 회전 속도의 함수로서 동기식 발전기 또는 풍력 에너지로부터 출력되는 목표 전력을 결정하도록, 그리고
- [0087] - 검출된 회전 속도 및 결정된 목표 전력의 함수로서 여자 전류 또는 여자 전압을 결정하도록

- [0088] 준비되고,
- [0089] - 여자 제어기는 이와 같이 결정된 여자 전류 또는 이와 같이 결정된 여자 전압을 여자 입력부에 입력하도록 준비되고,
- [0090] - 제어 장치는
- [0091] - 검출된 회전 속도 및 결정된 목표 전력의 함수로서, 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하도록, 그리고
- [0092] - 고정자 출력부에서 출력되는 결정된 고정자 전류를 고정자 목표 전류로 조정하도록 정류기를 제어하도록
- [0093] 준비되고,
- [0094] - 여자 전류 또는 여자 전압을 결정하는 단계, 및
- [0095] - 출력되는 고정자 전류를 고정자 목표 전류로서 결정하는 단계
- [0096] 중 적어도 하나의 단계에 대해
- [0097] - 제어 장치는 적응성 제어 장치로서 제공되고, 제어 장치는 여자 전류 또는 여자 전압 또는 출력되는 고정자 전류가 제어 장치의 제어 변수를 형성하도록 설계된다.
- [0098] 따라서, 특히 다상 타여자 동기식 발전기를 제어하기 위한 방법에 대해 전술한 바와 같이 실행되도록 작동하는 풍력 발전 설비가 제안된다. 또한, 이에 대해 설명된 동기식 발전기를 기반으로 한다.
- [0099] 특히, 회전 속도 검출기가 제공되지만, 그러나 이는 추가적인 측정 유닛으로 형성될 필요는 없고, 풍력 발전 설비에 의해 이미 다르게 검출된 회전 속도를 예를 들어 프로세스 컴퓨터에서 처리하여 전달할 수도 있다.
- [0100] 또한, 제어 장치는 특히 액추에이터와 관련하여 기존의 액추에이터를 사용할 수도 있다. 이것은 별도의 물리적 유닛으로서 제공될 수 있지만, 그러나 또한 기존의 제어 장치에서 구현될 수 있고 그리고/또는 통합될 수도 있다. 특히, 제어 장치는 대응하는 프로그램 코드로서 이미 존재하는 제어 컴퓨터에 저장될 수 있고, 특히 풍력 발전 설비의 일반적인 제어기에 내장될 수 있다.
- [0101] 여자 전류 또는 여자 전압 및/또는 출력되는 고정자 전류가 제어 장치의 제어 변수를 형성하도록 제어 장치를 설계한다는 것은, 특히 제어 장치가 이러한 개별 제어 변수를 위한 대응하는 제어 출력부를 포함한다는 것을 의미한다. 제어 장치가 물리적으로 고유한 물체로 제공되는 경우, 제어 변수를 위한 이러한 출력부는 예를 들어 연결 단자로서, 또는 데이터 버스 또는 다른 데이터 전송 장치를 위한 데이터 출력부로서 제공될 수 있다. 그러나, 이를 위해 제어 장치는 또한 물리적으로 독립적으로 제공되지 않은 경우, 제어 프로그램의 제어 변수를 대응하는 프로그램 변수로서 또한 출력할 수도 있다.
- [0102] 바람직하게는, 풍력 발전 설비는 이러한 방법의 전술된 적어도 하나의 실시예에 따라 다상 타여자 동기식 발전기를 제어하기 위한 방법을 사용하는 것이 제공된다. 따라서, 이에 대응하여 설명된 이점은, 이러한 풍력 발전 설비에 유리할 수 있고, 이에 대응하여 풍력 발전 설비는 개선될 수 있고, 가능한 한 최적으로 동작할 수 있다.
- [0103] 본 발명은 첨부된 도면을 참조하여 실시예에 기초하여 예시적으로 이하에서 보다 상세히 설명된다.

도면의 간단한 설명

- [0104] 도 1은 풍력 발전 설비를 사시도로 도시한다.
- 도 2는 자화 인덕턴스의 d/q-성분의 값들을 도시한다.
- 도 3a는 발전기의 연결 구조를 개략적으로 도시한다.
- 도 3은 제안된 조절 구조를 개략도로 도시한다.
- 도 4는 도 3의 조절 구조의 세부 사항을 도시한다.
- 도 4a는 도 4의 조절 구조의 세부 사항의 일 실시예를 도시한다.
- 도 4b는 도 4의 조절 구조의 세부 사항의 대안적인 실시예를 도시한다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0105] 도 1은 타워(102) 및 나셀(104)을 구비한 풍력 발전 설비(100)를 도시한다. 나셀(104) 상에는 3개의 로터 블레이드(108)와 스피너(110)를 갖는 로터(106)가 배치된다. 로터(106)는 작동 시 바람에 의해 회전 운동하고, 이에 의해 나셀(104) 내의 발전기를 구동시킨다.

[0106] 본 발명은 타워자 6상 동기식 발전기용 능동 정류기의 적응성 조절 방법에 관한 것이다. 이러한 시스템은 도 1에 따른 풍력 발전 설비의 부분으로서 제안된다. 그러나, 본 발명은 더 많은 상, 특히 시스템 분할을 곱한 상 개수를 갖는 동기식 발전기에도 또한 사용될 수 있다. 제안된 조절 방법은 온라인 파라미터 식별의 가능성 및 발전기의 전류 목표값들의 대응하는 적응을 제공한다. 이 경우, 전류 목표값들은 발전기의 효율이 작동 한계 내에서 각각의 동작점에 최적화되도록 선택된다.

[0107] 이하에서, 본 방법은 더 설명된다. 이를 위해, 전류 및 전압 변수는 주로 로터 필드 배향 d/q-좌표 시스템에서 지정된다. 고정자 배향, 단순히 정현파 시간 프로파일을, 로터 필드와 함께 회전하는 d/q-좌표 시스템으로 변환하는 것은 널리 공지되어 있고, 문헌에 설명되어 있다. 이러한 변환은 이하에서 가정된다.

[0108] 탭퍼 권선이 없는 6상 동기식 발전기의 토크(T_e)는 다음과 같이 설명될 수 있다:

$$T_e = \frac{3}{2} P \left(L_{md} (-i_{d1s} - i_{d2s} + i'_{fd}) (i_{q1s} + i_{q2s}) - L_{mq} (-i_{q1s} - i_{q2s}) (i_{d1s} + i_{d2s}) \right) \quad (1)$$

[0109]

[0110] 여기서 P는 기계의 극 쌍의 개수이며, i_{d1s} 및 i_{q1s} 는 제1 발전기 시스템의 고정자 전류의 d-및 q-성분이고, i_{d2s} 및 i_{q2s} 는 제2 발전기 시스템의 고정자 전류의 d-및 q-성분을 나타낸다. 제1 및 제2 발전기 시스템이라 함은, 여기서 특히 제1 및 제2 고정자 시스템인 것으로 이해되어야 한다. 또한, i'_{fd} 는 고정자에 관한 여자 전류를 나타내고, 다음과 같이 정의된다:

$$i'_{fd} = \frac{2}{3} \frac{i_{fd}}{N} \quad (2)$$

[0111]

[0112] 방정식(2)에서, N은 기계의 코일 개수를 나타내고, i_{fd} 는 변환되지 않은 여자 전류를 나타내고, 이는 i_e 또는 i_{err} 로도 또한 지칭될 수 있다. 방정식(1)의 L_{md} 및 L_{mq} 는 추정되어야 하는 발전기의 자화 인덕턴스이다. 이러한 인덕턴스는 포화에 의존적이고, 작동 시 자화 전류(i_m)의 함수로서 공칭값에서 크게 벗어날 수 있다. L_{md} 의 제1 추정은 다음 방정식에 따라 공회전 테스트에 의해 수행될 수 있다:

$$L_{md} = \sqrt{\frac{2}{3} \frac{V_{oc}}{\omega_e i'_{fd}}} \quad (3)$$

[0113]

[0114] 여기서 V_{oc} 는 RMS 라인-라인 공회전 전압을 나타내고, ω_e 는 기계의 전기적 공칭 주파수를 rad s^{-1} 로 나타낸다. 자화 전류(i_m)는 다음과 같이 정의된다:

$$i_m = \sqrt{\left((i_{q1s} + i_{q2s}) m \right)^2 + \left(-i_{d1s} - i_{d2s} + i'_{fd} \right)^2} \quad (4)$$

[0115]

[0116] 여기서 $m = \sqrt{\frac{L_{mq}}{L_{md}}}$ 이다. 공회전 테스트 동안 고정자에는 전류가 흐르지 않으므로, 따라서 $i_m = i'_{fd}$ 이다. 발전기의 기하학적 구조에 기초한 분석 계산 또는 유한 요소 시뮬레이션에 의해, i_m 의 함수로서 자화 인덕턴스의 d- 및 q-성분의 변화의 경향을 추정할 수 있다. 이것은 도 2에 도시된다.

[0117] 이 경우, 회전 속도 및 전력 목표값에 의해 정의된 결정된 발전기 동작점에 대해, 고정자 손실(P_{vstat}) 및 여자 손실(P_{vrot})을 최소화할 수 있는 고정자 전류(i_{d1} , i_{q1} , i_{d2} 및 i_{q2})와 여자 전류(i_{fd})의 최적의 조합을 발견하는 것이 가능해진다. 각각의 상이 동일한 저항(R_s)을 갖고, 2개의 고정자 시스템의 각각이 동일한 q- 및 d-전류

목표값(i_{qs} 및 i_{ds})을 수용한다는 것을 가정하면, 상기 언급된 손실은 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$P_{v_stat} = 6 R_s I_{srms}^2 \quad (5)$$

여기서 I_{srms} 에서 RMS는 상 전류이고, 이는 다음과 같이 정의된다:

$$I_{srms} = \frac{\sqrt{i_{qs}^2 + i_{ds}^2}}{\sqrt{2}} \quad (6)$$

여자 손실은 다음의 방정식에 의해 계산된다:

$$P_{v_rot} = V_{err} I_{err} \quad (7)$$

여기서 V_{err} 은 여자 전압이고, I_{err} 은 여자 전류를 나타낸다. 그러나, 단순히 중간 회로 전압으로도 또한 지칭될 수 있는 제한된 중간 직류 링크 전압으로 인해, 최적화된 손실을 갖는 모든 동작점에 도달할 수 있는 것은 아니다. 이것은 특히, 정류기가 승압 정류기로서 동작하고, 이에 따라 중간 직류 링크 전압이 항상 결정된 계수만큼 유효 고정자 전압보다 높아야 하는 경우에 적용된다.

다른 제한적인 계수는 정류기, 특히 반도체 스위치에서 전력 전자 요소의 최대 전류 용량이다. 따라서, 다음 경계 조건을 고려하는 것이 제안된다:

$$I_{err} \leq I_{err MAX} \quad (8)$$

$$\sqrt{I_{qs}^2 + I_{ds}^2} \leq I_s MAX \quad (9)$$

$$V_s \leq \frac{V_{DCLink}}{\sqrt{3}} \rightarrow \sqrt{V_{qs}^2 + V_{ds}^2} \leq \frac{V_{DCLink}}{\sqrt{3}} \quad (10)$$

여기서

$$V_{qs} = \omega_r \lambda_{ds} - R_s I_{qs} \quad (11)$$

$$V_{ds} = -\omega_r \lambda_{qs} - R_s I_{ds} \quad (12)$$

λ_{ds} 및 λ_{qs} 은 다음과 같이 정의된다:

$$\lambda_{ds} = L_{md}(-2 I_{ds} + i'_{fd}) - L_{ls} I_{ds} \quad (13)$$

$$\lambda_{qs} = L_{mq}(-2 I_{qs}) - L_{ls} I_{qs} \quad (14)$$

여기서 다시, ω_r 은 동작점의 전기적 회전 속도이고, L_{ls} 는 고정자의 누설 인덕턴스이다. 반복 알고리즘을 통해, 표시된 경계 조건을 충족하는 모든 가능한 고정자 및 여자 전류 목표값이 계산된다. 손실의 합을 최소화하는 조합이 선택된다. 공지된 구매 방법, 또는 최대값을 찾기 위한 다른 방법도 또한 사용될 수 있다.

발전기 파라미터는 이들의 변경을 고려하여 제어 또는 조절을 개선할 수 있을 정도로 변경될 수 있다는 것이 인

식되었다. 발전기 파라미터(R_s , L_{ls} , L_{md} 및 L_{mq})에 대한 지식은 가능한 한 양호하게 적용된 목표값을 계산하는데 도움이 된다. 고정자 저항은 온도 의존적이고, 다음 방정식을 사용하여 경험적으로 계산될 수 있다:

$$R_s(T) = R_{sT0}(1 + \alpha(T - T_0)) \quad (15)$$

여기서 R_{sT0} 은 예를 들어 20℃일 수 있는 결정된 온도(T_0)에 대한 옴 고정자 저항이며, 계수 α 와 함께 온도 변화의 함수로서 변경된다. 누설 인덕턴스(L_{ls})는 단락 테스트 또는 FEM 시뮬레이션에 의해 결정될 수 있다.

로터 저항(R_e)은 측정된 변수들(V_{err} 및 I_{err})로부터 다음과 같이 간단하게 계산될 수 있다:

$$R_e = \frac{V_{err}}{I_{err}} \quad (16)$$

발전기가 정상 상태에 있을 때, 고정자 전압의 q- 및 d-성분은 방정식(11) 및 (12)에 의해 계산될 수 있다. 따라서, 정상 상태에서의 계산이 제안되는데, 왜냐하면 일시적인 상태에서는 각각의 플럭스의 도출이 두 방정식에서 모두 고려되어야 하기 때문인데, 이것은 계산을 보다 복잡하게 만든다. R_s 및 L_{ls} 가 알려져 있다고 가정하면, L_{md} 및 L_{mq} 는 다음과 같은 방정식에 의해 계산될 수 있다:

$$L_{mq} = \frac{v_{ds} + R_s i_{ds} - \omega_r L_{ls} i_{qs}}{2 \omega_r i_{qs}} \quad (17)$$

$$L_{md} = \frac{v_{qs} + R_s i_{qs} + \omega_r L_{ls} i_{ds}}{\omega_r (-2 i_{ds} + i'_{fd})} \quad (18)$$

여기서 v_{qs} , v_{ds} , i_{qs} , i_{ds} 는 대응하는 고정자 전압 및 전류의 순간값이다. 여기서 2개의 고정자 시스템 중 하나만 고려되어도 되는데, 왜냐하면 이러한 2개의 고정자 시스템은 동일한 것으로 가정될 수 있는 것으로 인식되었기 때문이다. 방정식(17) 및 (18)의 전류 및 전압은 많은 고조파를 포함하므로, 따라서 이를 필터링하는 것이 제안된다. 컨버터의 스위칭 주파수는 동작점에 의존한다. 따라서, 필터링을 위해 가능한 한 바람직하지 않은 동작점, 특히 낮은 스위칭 주파수가 존재하는 바람직하지 않은 동작점 및/또는 특히 높은 포화가 가정되는 높은 고조파 부하가 존재하는 동작점을 기초로 사용하고, 이에 기초하여 필요한 필터 시간 상수를 맞추는 것이 제안된다.

도 2는 여기서 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})를 자화 전류(I_m)의 함수로서 도시한다. 자화 인덕턴스(L_{md})의 값들은 L_{mq} 의 값보다 대략 50 % 내지 100 % 더 높다. 특히, 자화 인덕턴스의 값들이 자화 전류가 증가함에 따라 이미 초기에 감소하고, 초기 값들의 약 30 %의 값들로 감소된다는 점에 유의해야 한다. 이것은 실질적으로 포화 효과에 의해 야기된다. 그러나, 도시된 프로파일은 또한, 특히 온도 변동으로 인해 변경될 수도 있다.

도 3a는 발전기(320)의 연결 구조를 개략적으로 도시한다. 발전기(320)는 고정자(322)에서 회전 속도(n)로 회전하는 로터 또는 회전자(324)를 포함한다. 고정자(322)는 고정자 출력부(328)를 가지며, 이를 통해 고정자 전류, 즉 여기서 2개의 3상 고정자 전류가 능동 정류기(340)로 제공된다. 능동 정류기(340)는 3상 전류를 전기 공급 네트워크(334)로 공급하기 위해, 고정자 전류를 제어하고, 인버터(332)가 연결된 중간 직류 링크(360)에서 직류를 생성하는데, 이는 여기서 단지 예시를 위해 도시되어 있다. 중간 직류 링크(360)에는 또한 여자 제어기(330)가 연결되고, 이러한 여자 제어기는 여자 입력부(326)에서 회전자(324)에 입력하기 위해, 여자 전압(V_{err}) 또는 여자 전류(i_{err})를 생성한다. 이러한 구조는 또한 도 3에 기초하고, 발전기(320)는 기본적으로 도 3의 발전기(302)에 대응한다. 또한, 도 3a의 능동 정류기(340)도 기본적으로 도 3의 능동 정류기(304)에 대응한다.

도 3에는 제안된 조절 구조(300)의 개요가 도시된다. 알고리즘의 입력 신호는 회전 속도(n)와 전력 목표값(P_{sol1})이고, 이는 발전기의 전력 특성 곡선을 통해 회전 속도에 따라 변한다. 관측자로도 또한 지칭될 수 있는 관찰자는 고정자 전압 및 전류를 입력값으로서 수신하고, 방정식(17) 및 (18)에 따라 자화 인덕턴스의 d- 및 q-

성분을 계산한다.

- [0143] 도 3의 조절 구조(300)는 발전기(302) 및 중간 직류 링크(306)를 정류하는 능동 정류기(304)에 기초한다. 발전기(302)는 2개의 3상 고정자 시스템을 포함하고, 따라서 2개의 3상 출력 라인(308 또는 310)을 통해, 그 고정자 전류를 2배의 3상 고정자 전류로서 능동 정류기(304)에서 출력한다.
- [0144] 조절의 부품은 관찰자 또는 관측자로도 또한 지칭될 수 있는 추정 장치(312)를 형성하지만, 그러나 여기서 파라미터, 즉 2개의 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})를 추정한다. 이에 대해, 추정 장치(312)에 대한 입력 변수는 고정자 전압(V_s) 및 고정자 전류(I_s)이다. 추정 장치(312)는 발전기(302)로부터 값들을 수신한다. 이를 위해, 또한 이러한 변수들은 이미 다른 방식으로 검출되었고, 예를 들어 제어 컴퓨터에 존재하고, 거기서 추정 장치(312)가 이러한 변수들에 액세스할 수 있는 것이 고려된다. 추정 장치(312)는 따라서 발전기(302) 상에 자체 측정 수단을 반드시 제공할 필요가 없다.
- [0145] 추정 장치(312)의 결과는 2개의 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})이거나, 또는 자화 인덕턴스의 d- 및 q-성분으로서 또한 지칭될 수도 있다. 이러한 2개의 변수는 적응 조절기(314)에 입력된다.
- [0146] 적응 조절기(314)는 또한 현재 회전 속도(n) 및 현재 전력 목표값(P_{soll})을 입력 변수로서 수신한다. 현재 전력 목표값(P_{soll})은, 간단히 n-P-블록(316)으로 지칭되는 회전 속도 전력 특성 곡선 블록에 저장되는 회전 속도 전력 특성 곡선으로부터 발생된다. n-P-블록(316)에 저장된 회전 속도 전력 특성 곡선이 공기 역학에 맞춰지기 때문에, 회전 속도(n)는 공기 역학적 로터의 회전 속도를 나타낸다. 따라서, 이러한 회전 속도(n)는 발전기(302)에 상당한 영향을 주고, 이에 따라 발전기(302)에 대한 입력 변수로서 도출된다. 본 명세서에서 제안되는 기어리스형 풍력 발전 설비에서, 공기 역학적 로터의 회전 속도(n)는 발전기의 회전 속도, 즉 회전자 회전 속도에 대응한다.
- [0147] 적응 조절기(314)는 이제, 현재 회전 속도(n) 및 현재 사전 정의된 목표 전력(P_{soll})으로부터 여자 전압(V_e)을 계산하며, 타여자 발전기로서 설계된 발전기(302)에 여자 전력을 공급하기 위해 여자 제어기를 제공해야 한다. 또한, 적응 조절기(314)는 고정자 전류에 대한 목표값 또는 2배의 3상 고정자 전류의 개별 상 전류에 대한 목표값을 계산한다. 즉, 이는 제1 3상 고정자 전류에 대한 3상 전류(i_a , i_b 및 i_c)의 목표값 및 제2 3상 고정자 전류의 값(i_x , i_y 및 i_z)이 계산되거나 또는 사전 설정된다. 고정자 전류 또는 그 성분들에 대한 이러한 목표값의 구현은 능동 정류기(304)에 의해 수행된다.
- [0148] 이러한 계산 또는 사전 설정에서, 적응 조절기(314)는 추정 장치(312)로부터 수신하는 대응하는 d- 및 q-성분을 고려함으로써, 자화 인덕턴스의 변화를 고려한다.
- [0149] 따라서, 고정자 전류 또는 그 성분들 및 여자 전력 또는 이에 대한 여자 전압은 적응 조절기(314)에 의해 서로 최적으로 맞춰질 수 있다. 추가적으로, 여기서 발전기(302)의 특성의 변화가 고려될 수 있다.
- [0150] 도 4는 도 3의 적응 조절기에 대해 추가적인 세부 사항 또는 변형을 도시한다. 이 경우, 적응 블록(413)과 함께 도 3의 추정 장치(312)와 동일하게 설정될 수 있는 관찰자 블록(412)이 도시되어 있다. 관찰자 블록(412)은 고정자 전압(V_s), 고정자 전류(I_s) 및 여자 전류(I_e)를 입력 변수로서 수신하고, 이로부터 자화 인덕턴스의 두 성분(L_{md} 및 L_{mq}) 및 자화 전류(I_m)를 관찰하고, 이는 적응 블록(413)으로 전달된다. 그러나, 도 3의 적응 조절기(314)의 의미에서 적응 조절기의 일부일 수도 있는 적응 블록(413)은, 이 경우 적어도 무엇보다도 자화 인덕턴스의 값들을 적응시킨다. 적응 블록(413)은 자화 인덕턴스의 두 성분(L_{md} 및 L_{mq})의 프로파일의 변화를 상징적으로 도시한다. 상부 심볼 블록은 도 2의 다이어그램에 대응하지만, 그러나 4000A의 자화 전류까지만 대응한다. 따라서, 이러한 적응 블록(413)은 초기에 이러한 상위 관계로부터 진행한 다음, 현재 자화 전류(I_m)를 특징으로 하는 현재 작동점에 대해 각각 2개의 성분(L_{md} 및 L_{mq})에 대한 새로운 값들을 추정한다. 이것은 L_{md} 및 L_{mq} 에 대해 새롭게 추정된 2개의 값을 가리키는 2개의 화살표(e)에 의해, 적응 블록(413)에서 상부 표현으로 표시된다.
- [0151] 이에 대응하여, 자화 인덕턴스의 두 성분(L_{md} 및 L_{mq})의 특성 곡선은 적응 블록(413)의 하부 다이어그램에 도시된 바와 같이 변경된다. 따라서, 이러한 2개의 특성 곡선은 절곡부를 포함하지만, 그러나 최적으로는 특성 곡선의 추가의 값들이 점차로 적응될 수 있고, 특성 곡선이 전체적으로 변화될 수 있다.

- [0152] 그런 다음, 결과가 최적화 블록(414)에 제공되고, 그 후 이에 의존하여 목표값을 생성할 수 있다. 적응 블록(413)으로부터 최적화 블록(414)으로 전달되는 파라미터는 도 4에 상세하게 도시되어 있지는 않지만, 어떠한 경우에도 자화 인덕턴스의 성분(L_{md} 및 L_{mq})의 현재값들이 전달된다. 그러나, 거기에는 자화 인덕턴스의 성분(L_{md} 및 L_{mq})의 프로파일의 완전히 변경된 특성 곡선도 또한 전달될 수 있다. 다른 한편으로는, 도 4의 블록 도면은 여기서도 또한 상징적인 것으로 이해되어야 하고, 모든 블록들은 단일 프로세스 컴퓨터에서 구현될 수 있으며, 이 경우 예를 들어 최적화 블록(414) 또는 이를 통해 상징화된 최적화 알고리즘은 필요한 값들로 액세스한다. 사이클 시간으로서는 0.01초가 선택되었다($T_s=1e-2$).
- [0153] 최적화 블록(414)은 또한 전력 목표값(P_{set})을 수신하는데, 이는 즉 발전기 또는 풍력 발전 설비에 의해 출력되는 출력 전력에 대해 현재 조정되는 전력값을 나타낸다.
- [0154] 이러한 구체적으로 조정되는 전력 목표값(P_{set})은 여기서 PI-조절기로서 형성된 전력 목표값 조절기(416)의 결과이다. 이러한 PI-조절기(416)는 원하는 출력 전력(P_{sol1}) 및 현재 출력 전력(P_m)의 실제값을 수신하며, 이는 이와 관련하여 측정된 전력을 또한 나타낸다. 이제 전력 목표값이 변경되면, 즉 P_{sol1} 이 변경되면, 이에 대응하여 만일의 갑작스러운 변경이 또한 최적화 블록에 제공되는 것은 바람직하지 않다. 이에 대응하여, 이러한 P-목표값 조절기(416)가 제공되고, 이는 실제로 조정될 현재 전력값(P_{set})이 동역학에 의해 사전 설정된 전력 목표값(P_{sol1})을 추적하게 한다.
- [0155] 이 경우, 최적화 블록(414)은 언급된 입력부에 기초하여, 고정자 전류 및 여자 전압을 계산한다. 여자 전압은 조정되는 여자 전압(V_e)으로서 직접 출력될 수 있다. 조정되는 고정자 전류는 초기에 각각의 고정자 서브 시스템에 대해 d/q-성분으로 출력된다. 이에 대응하여, 값들(I_{qs1} , I_{ds1} , I_{qs2} , I_{ds2})이 출력된다. 그러나, 이들은 우선 이러한 d/q-성분을 a, b, c 성분으로 변환하는 출력 블록(415) 상에 제공된다. 이 경우, 2배의 3상 고정자 시스템이 고려되는 경우 6개의 개별 순간값, 즉 i_a , i_b , i_c , i_x , i_y 및 i_z 가 발생한다. 이러한 6개의 전류값들은 도 3에 도시된 바와 같이, 순간 목표값으로서 능동 정류기(도 3의 304)에 제공될 수 있다. 그 외에는, 변환 블록(415)은 변환을 수행하기 위해, 즉 발전기의 로터, 즉 회전자에 현재 로터 각도(θ)를 필요로 한다.
- [0156] 따라서, 도 4에는 도 3의 적응 조절기(314)가 추가의 세부 사항과 함께 도시된다. 최적화 알고리즘(414)은 여자 전류 목표값(I_{err}) 또는 대응하는 여자 전압(V_{err})을 계산하고, 이는 도 4에서 V_e 로 지칭되고, 고정자 전류 목표값들(I_{qs} 및 I_{ds})을 계산한다. 두 고정자 시스템 사이의 대칭성을 가정하면, 전류 목표값은 두 시스템에서 동일하다.
- [0157] 6상 발전기의 6개의 고정자 전류는 원하는 전력(P_{set}) 및 이에 따른 여자 전압(V_e)의 함수로서 조정된다. 이를 위해, 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})에 대한 지식이 도움이 된다. d/q-성분의 관계는 특히 방정식(1)과 추가의 설명 및 방정식에서 제공된다. 방정식(1)에 기초하여, 예를 들어 귀납적인 해를 찾을 수 있다.
- [0158] 그러나, 자화 인덕턴스는 일정하지 않고, 발전기의 현재 작동점에 의존할 수 있다는 것이 인식되었다. 특히, 이들은 도 2에, 그리고 도 4의 블록(413)의 상반부에 도시된 바와 같이, 자화 전류에 의존한다. 그러나 또한, 자화 인덕턴스는 추가적으로 다른 변수에 의존할 수 있고, 특히 온도 의존적일 수 있다는 것이 인식되었다. 이것은 특히 도 2에 도시된 특성 곡선이 가변적인 것을 의미한다. 이것을 고려하는 것이 제안된다.
- [0159] 최적화 블록(414)은 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})가 각각의 현재값들을 사용함으로써, 가변적인 것을 고려한다. 이를 위해, 예를 들어 현재 동작점에 대해 각각 방정식(1)을 기반으로 귀납적인 해를 찾을 수 있으며, 이에 의존하여 d/q-좌표에서 고정자 전류들(I_{qs1} , I_{ds1} , I_{qs2} 및 I_{ds2})을 결정할 수 있다. 물론, 이러한 귀납적인 해 또는 다른 해들을 미리 결정하고, 이들을 작동 시 검색될 수 있는 테이블에 저장하는 것도 또한 고려된다. 중간값들은 보간될 수 있다.
- [0160] 따라서, 최적화 블록(414)은 적어도 사용된 자화 인덕턴스를 위해 조정되고 적응되는 고정자 전류를 사전 설정한다. 이 경우, 자화 인덕턴스는 파라미터이고, 이와 관련하여 최적화 블록(414)은 적응 제어기 또는 적응 제어기의 일부이다.
- [0161] 이를 위해, 최적화 블록(414)은 적응 블록(413)에 의해 이러한 자화 인덕턴스를 수신한다. 이 경우, 적응 블록(413)은 특히 자화 인덕턴스가 변화되고, 이러한 변화가 또한 고려되는 것을 도시하도록 의도된다. 이와 관련

하여, 최적화 블록(414)과 함께 적응 블록(413)도 또한 적응 제어기로서 이해될 수 있다.

- [0162] 실제로, 적응 블록(413)은 특히 가정된 변화를 예시하도록 사용된다. 이 경우, 우선, 즉 적응 블록(413)의 상부 다이어그램에 따르면, 자화 전류(I_m)와 자화 인덕턴스 사이의 오리지널 프로파일로서 저장된 관계가 가정된다.
- [0163] 그러나, 이에 대해 편차가 존재할 수 있는 것이 인식되었다. 이를 더 잘 고려하기 위해, 각각의 자화 전류(I_m)에 대해 자화 인덕턴스가 관찰자에 의해 관찰될 수 있으며, 이는 추정으로도 또한 지칭될 수 있다. 관찰자는 관찰자 블록(412)으로 도시되어 있다. 여자 전류(I_e), 고정자 전압(V_s) 및 고정자 전류(I_s)를 입력 변수로서 수신할 수 있고, 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq}) 및 자화 전류(I_m)를 관찰하거나 또는 추정하고 출력할 수 있다.
- [0164] 따라서, 관찰자 블록(412)은 언급된 입력 변수로부터 자화 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq}) 및 자화 전류(I_m)를 결정하는 능력을 갖는다.
- [0165] 이것은 특히 방정식(4), (17) 및 (18)에 의해 제공되는 바와 같은 시스템 설명에 기초하는 고전적인 관찰자에 의해 수행될 수 있다. 대안적으로, 관찰자 블록(412)은 추정 알고리즘 또는 계산에 의해 자화 인덕턴스(L_{md} , L_{mq}), 및 자화 전류(I_m)를 결정할 수 있다. 또한, 이것은 방정식(4), (17) 및 (18)에 기초하여 수행될 수도 있다. 방정식(4), (17) 및 (18)은 또한 현재 측정값들과 관련되므로, 이에 대해 실제의 영향, 특히 열에 의한 영향이 결정에 포함된다. 따라서, 방정식을 사용함으로써 온도 관련 변화가 인식되고 고려될 수 있다. 따라서, 도 2에 따른 특성 곡선이 이에 대응하여 개선될 수 있다.
- [0166] 이렇게 관찰된 L_{md} , L_{mq} 및 I_m 에 대한 값들은, 이어서 동작점에 대해 관찰자 블록(413)으로부터 결정된 후에, 적응 블록(413)에 입력된다.
- [0167] 이것은 2개의 화살표 "e"에 의해 상부 다이어그램에서 적응 블록(413)에 표시된다. 따라서, 화살표 "e"는 적응 블록(413)의 상부 다이어그램에서 결정된 동작점에서 관찰자 블록에 의해 결정된 L_{md} 및 L_{mq} 에 대한 2개의 값을 도시한다. L_{md} 및 L_{mq} 에 대한 이러한 동작점에 의존하는 값들은 적응 블록(413)의 하부 다이어그램에 전송되고, 2개의 도시된 절곡으로 이어진다. 즉, 적응 블록(413)에서 자화 인덕턴스에 대해 초기 값들이 예를 들어 특성 곡선 또는 록업 테이블의 형태로 저장되는데, 이 경우 관찰자 블록(413)으로부터 현재 값들로 연속적으로 업데이트된다. L_{md} , L_{mq} 및 I_m 에 대해 업데이트되거나 또는 적용된 값들은 이어서 고정자 전류를 결정하기 위해 업데이트된 값들을 고려하는 최적화 블록(414)으로 전송된다.
- [0168] 이와 관련하여, 적응 블록(413)은 특히 도 2와 비교하여, 이어서 고정자 전류를 계산하기 위해 최적화 블록(414)에서 고려될 수 있도록, 사용된 관찰자 블록(412)에 의해 자화 인덕턴스의 결정이 어떻게 수행되는지, 그리고 작동 시 변경되는 자화 인덕턴스가 어떻게 결정되는지를 도시한다.
- [0169] 도 4a 및 도 4b는 각각 도 4의 조절 구조의 실시예 또는 세부 사항, 즉 특히 고정자 목표 전류의 결정이 블록(414)에서 어떻게 구현되는지를 도시한다.
- [0170] 이를 위해, 도 4a는 특성 곡선 계산에 의해 고정자 목표 전류의 결정을 도시한다. 이를 위해, 3개의 고정자 목표 전류 특성 곡선(418)이 블록(414)에 저장된다. 이러한 3개의 고정자 목표 전류 특성 곡선의 각각은 출력되는 목표 전력(P_{set}), 즉 I_e 또는 V_e , I_{qs1} , I_{qs1} , i_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2} 의 함수로서 목표 전류값을 출력한다. 이들은 도 4에 도시된 바와 같이, 그러나 도 4a 및 도 4b에는 도시되지 않은 바와 같이, i_a , i_b , i_c 및 i_x , i_y , i_z 로 변환되어, 컨버터(304)에 목표 전류로서 사전 설정된다. 따라서, 고정자 목표 전류 특성 곡선은 출력되는 목표 전력과, 각각의 결정되는 고정자 목표 전류 사이의 관계를 나타낸다.
- [0171] 3개의 점선 업데이트 화살표(419) 및 블록(420)으로 도시된 도 4a의 다른 실시예에서, 고정자 목표 전류 특성 곡선(418)은 반복적인 루틴에서 변화된 조건에 적응된다. 이를 위해, 고정자 목표 전류 특성 곡선(418)이 적용되는 적응 제어기(414)에서, 즉 블록(420)에서 반복적인 루틴이 실행될 수 있다. 적응은 여기서 3개의 업데이트 화살표(419)를 통해 도시되어 있다. 이 경우, 반복적인 루틴(420)은 추정된 변수의 형태의, 즉 추정된 자화 인덕턴스($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$), 추정된 고정자 저항($\hat{R}_{stator}$) 및 추정된 여자 저항($\hat{R}_{err}$)으로서의 변경된 조건을 고려한다. 이러한 추정 변수들은 관찰자 블록(412)에 의해 또는 적응 블록(413)에 의해 제공되고, 여기서 적응 블록(413)

에는 인덕턴스 특성 곡선이 저장된다. 이 경우, 고정자 목표 전류 특성 곡선(418)의 적용은 고정자 목표 전류 특성 곡선으로부터의 고정자 목표 전류의 결정보다 더 느리게 수행되는데, 그 이유는 작동 중에 $\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$, $\hat{R}_{stator}$, 및 $\hat{R}_{err}$ 가 느리게 변화되기 때문이다.

[0172] 도 4b는 도 4a에 대한 대안적인 실시예를, 즉 온라인 결정 또는 계산에 의해 최적화 블록(414)에서의 고정자 목표 전류의 결정을 도시한다. 이를 위해, 고정자 목표 전류들(I_e , I_{qs1} , I_{qs2} , I_{ds1} , I_{ds2})은 목표 전력(P_{set})의 함수로서, 그리고 적어도 하나의, 복수의 또는 모든 변수($\hat{L}_{md}$, $\hat{L}_{mq}$, $\hat{R}_{stator}$, 및 $\hat{R}_{err}$)의 함수로서 온라인으로 결정된다. 여기서 온라인이라 함은, 풍력 발전 설비의 작동 중에 계산이 수행될 수 있다는 것을 의미한다. 이를 위해, 블록(414)에는 계산 알고리즘(422)이 저장되며, 이는 언급된 추정 변수들로부터 고정자 목표 전류를 계산한다. 이러한 알고리즘은 적응 제어기에 예를 들어 계산 규칙의 형태로 저장될 수 있고, 그리고/또는 프로세스 컴퓨터에서 실행될 수 있다. 이 경우, 언급된 추정 변수들은 도 4a와 유사하게 관찰자 블록(412)에 의해 또는 적응 블록(413)에 의해 제공된다.

[0173] 인덕턴스, 즉 특히 L_{md} 및 L_{mq} 에 대해, "룩업 테이블"로도 또한 지칭될 수 있는 하나 이상의 테이블로부터의 값들이 사용된다. 이러한 하나 이상의 테이블은 발전기 작동 중 자화 전류(i_m)의 함수로 업데이트되고, 그런 다음 정상 작동 상태가 존재할 때, 항상 각각 하나의 동작점에 대해 업데이트된다. 정상 상태에서 방정식(11) 및 (12)는 고정자 전압의 d- 및 q-성분을 나타내고, 따라서 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})는 방정식(17) 및 (18)에 의해 추정될 수 있고, 그 후에 값들이 업데이트된다.

[0174] 모델링 부정확도뿐만 아니라, 고려되지 않은 손실도 또한 보상하기 위해, PI-조절기는 조절기의 전력 목표값을 변경한다. 이러한 PI-조절기는 전력 목표값의 부근에서만 활성화되고, 원하는 출력 전력에 도달될 때까지 전류 목표값 생성의 기초로서 사용된다. 목표값과 큰 편차가 있는 경우, I-성분이 비활성화될 수 있다. 발전기의 다소 큰 시간 상수로 인해, 목표값은 예를 들어 100 Hz일 수 있는 저주파로 계산되며, 이는 10 KHz의 일반적인 마이크로 컨트롤러의 최대 클록 주파수에 비해 비교적 낮은 값이다.

[0175] 따라서, 최적화된 기계 효율을 갖는 타여자 동기식 발전기에 대한 능동 정류기의 조절이 제안된다. 타여자 동기식 기계는 타여자 동기식 발전기로도 또한 지칭될 수 있다. 특히, 2개의 발전기 시스템이 있는 동기식 기계에 대한 조절이 설명되었다. 그러나, 본 방법은 또한 상이한 개수의 발전기 시스템 또는 고정자 시스템에 적용될 수도 있는데, 즉 2개의 3상 시스템 외에도, 4개 이상의 고정자 시스템도 또한 고려될 수 있다.

[0176] 본 발명의 목적은, 특히 능동 정류기를 갖는 복수의 발전기 시스템 또는 고정자 시스템 및 고도의 포화 의존성 파라미터를 갖는 타여자 동기식 기계를 효율면에서 최적화된 방식으로 작동시키는 것이다. 기계의 포화 특성 또는 자화 인덕턴스의 올바른 거동의 추정은 설명된 해결 방안으로 달성될 수 있으며, 능동 정류기에 대한 조절 방법에 사용될 수 있으며, 이를 통해 기계의 포화 특성도 또한 고려될 수 있다. 또한, 제시된 해결 방안은 타여자 동기식 기계에도 적합하다.

[0177] 이하에 언급되는 참고 문헌 [a] 및 [b]는 타여자 동기식 발전기를 위한 해결 방안을 설명한다.

[0178] 여기서, 문헌 [a]는 타여자 동기식 기계를 조절하기 위한 방법을 보여준다. 전류 목표값들은 총 고정자 및 로터 손실을 최소화하기 위해, "라그랑주 승수법(Lagrange Multiplier)"을 통해 분석적으로 계산된다. 작동 중인 분석 계산에 대한 일부 파라미터를 변경할 수 있는 자체 조정 알고리즘(Self-Tuning-Algorithmus)은, 기계가 정상 상태에 있다는 가정 하에 표현된다. 그러나, 고정자 전류의 i_d -성분 및 여자 전류(i_{err})만이 적응된다.

[0179] 파라미터 추정과 관련하여, 순환최소자승법(Recursive Least Square)(RLS) 등에 기초한 방법이 종종 제안되고, 플럭스의 도출을 무시하기 위해 정상 상태의 가정이 필요하다. 개선을 위해, 제안된 해결 방안에서는 인덕턴스(L_{md} 및 L_{mq})의 추정이 대수 방정식을 통해 대응하는 파라미터가 간단히 계산되는 방법을 기반으로 한다.

[0180] 본 발명은 적어도 일부 실시예에서, 복수의 발전기 시스템을 갖는 타여자 동기식 기계를 조절하기 위해 사용될 수 있다. 기계의 파라미터가 기계의 실제 특성에 대응한다고 가정하면, 알고리즘은 결정된 목표값 전력에 대해 고정자 및 로터 손실을 최소화하기 위해 각각 전체적으로 최적의 동작점을 계산할 수 있다. 본 방법은 측정된 발전기 변수, 즉 전압, 전류 및 회전 속도의 대수적 평가에 의해 수행될 수 있는 온라인 파라미터 추정에 의해 인덕턴스의 룩업 테이블을 보정할 수 있는 가능성을 제공한다.

[0181] 동작점은 수치적 반복 계산에 의해 결정되기 때문에, 대응하는 연산력이 요구된다. 이러한 문제는 인식되었고,

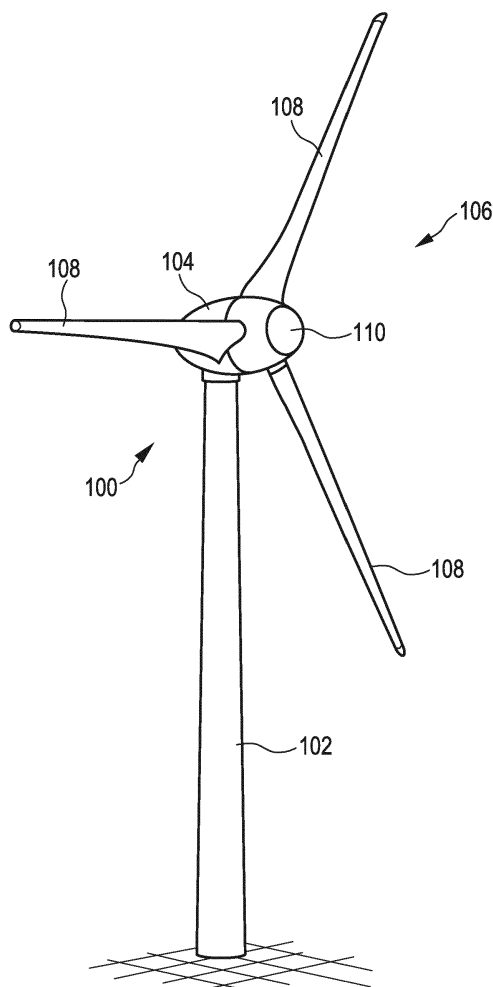
기계의 큰 기계적 관성 및 로터의 큰 시간 상수로 인해 현대 마이크로 컨트롤러의 클록 주파수와 비교하여 낮은 주파수로 계산이 수행될 수 있다.

[0182] [a] Chi D. Nguyen 및 W. Hoffman, "타여자 동기식 모터의 자체 조정 적응성 구리-손실 최소화 제어(Self-tuning adaptive copper-losses minimization control of externally excited synchronous motors)", 2014 전기 모터 국제 회의(ICEM), 2014 년 9 월 2-5일, 페이지 897-902.

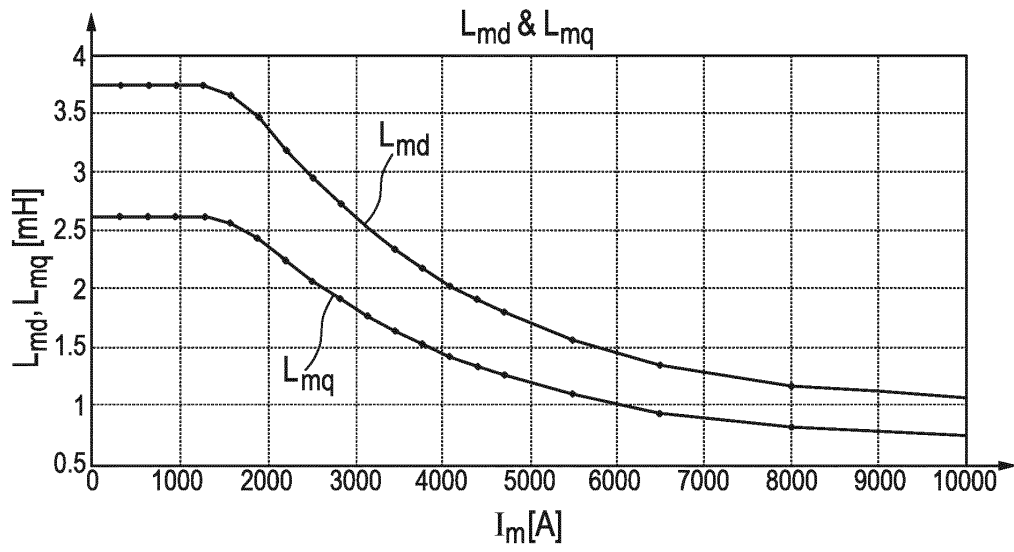
[0183] [b] D. Kowal, P. Sergeant, L. Dupre' 및 H. Karmaker, "풍력 발전 설비를 위한 PMSG의 PWM 고조파를 포함하는 주파수 및 시간 도메인 철 및 자석 손실 모델링 비교(Comparison of Frequency and Time-Domain Iron and Magnet Loss Modeling Including PWM Harmonics in a PMSG for Wind Energy Application)" IEEE 에너지 변환에 대한 트랜잭션, 30호, 2권, 페이지 476-486, 2015년 6월.

도면

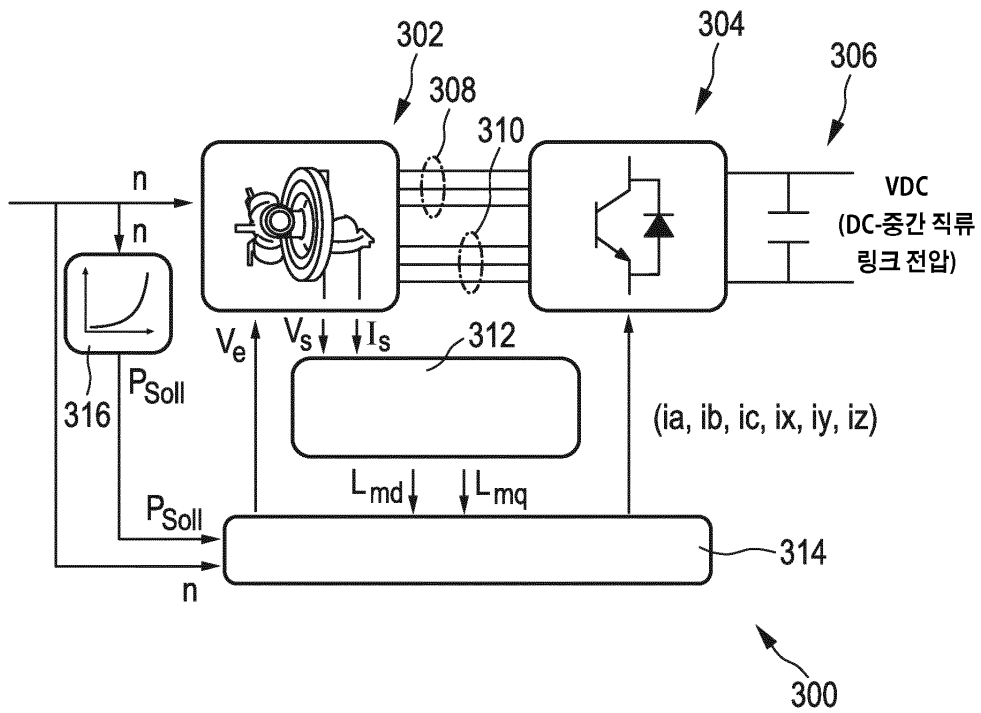
도면1



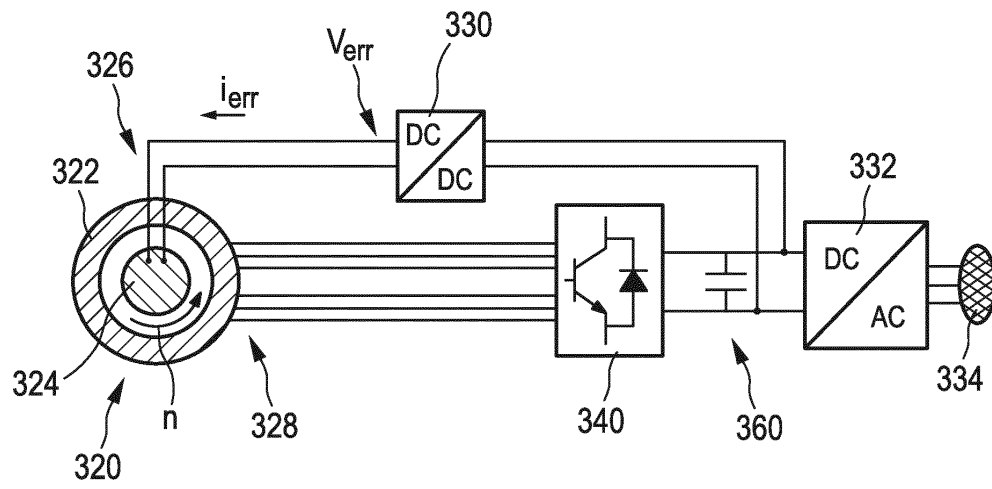
도면2



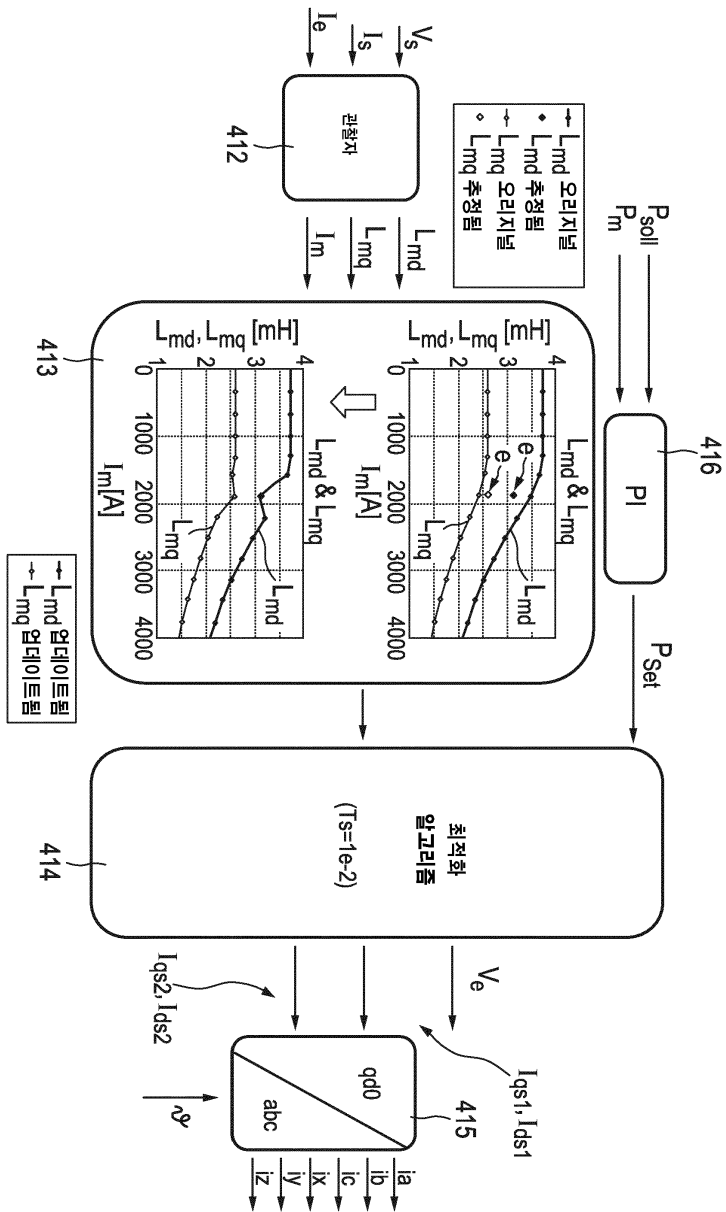
도면3



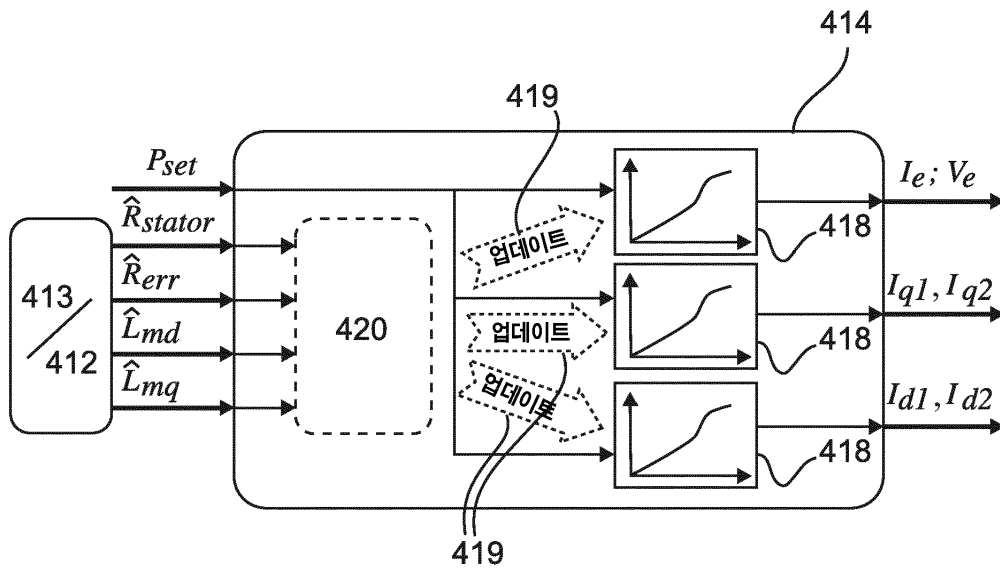
도면3a



도면4



도면4a



도면4b

