



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2024년02월27일
(11) 등록번호 10-2641403
(24) 등록일자 2024년02월22일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02P 21/00 (2016.01)

(52) CPC특허분류
H02P 21/0007 (2013.01)
H02P 6/182 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2022-0065752

(22) 출원일자 2022년05월30일

심사청구일자 2022년05월30일

(65) 공개번호 10-2023-0166171

(43) 공개일자 2023년12월07일

(56) 선행기술조사문헌
JP2006223085 A

(뒷면에 계속)

전체 청구항 수 : 총 9 항

(73) 특허권자

연세대학교 산학협력단

서울특별시 서대문구 연세로 50 (신촌동, 연세대학교)

(72) 발명자

박정욱

서울특별시 강남구 압구정로29길 71, 20동 701호

장원용

서울특별시 양천구 신정로14길 6, 106동 1109호

(74) 대리인

특허법인시공

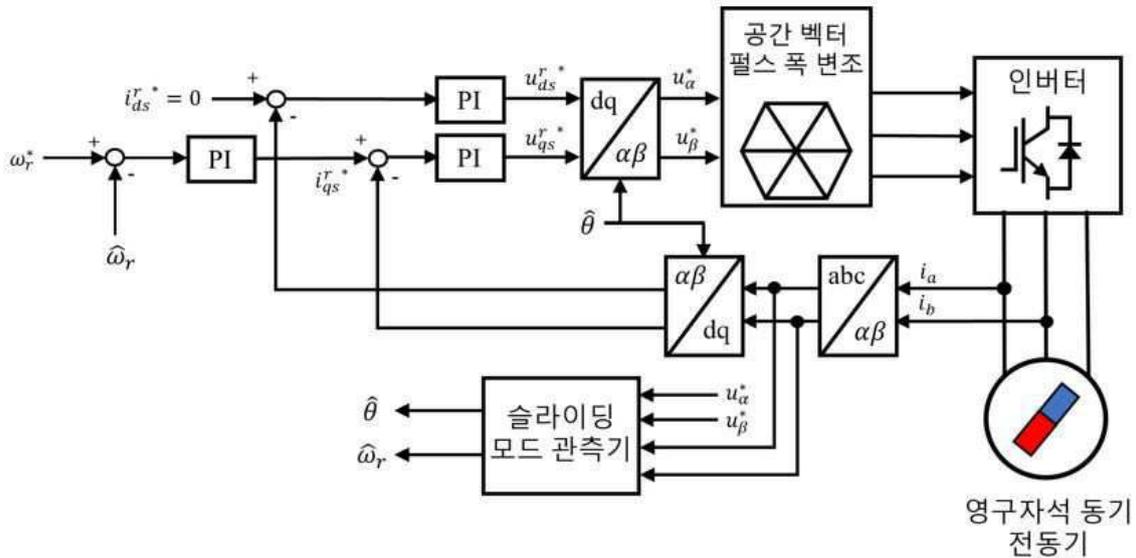
심사관 : 광태근

(54) 발명의 명칭 **역기전력 오차를 이용한 센서리스 제어의 슬라이딩 모드 관측 시스템**

(57) 요약

본 발명의 슬라이딩 모드 관측 시스템은 모터의 역기전력을 관측하는 역기전력 관측기; 및 상기 역기전력 관측기로부터 획득한 추정 역기전력과 실제 역기전력을 이용하여 역기전력 오차를 산출하고, 상기 역기전력 오차를 이용하여 상기 역기전력 관측기를 통해 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 분석부를 포함할 수 있다.

대표도 - 도1



(52) CPC특허분류

H02P 2207/05 (2013.01)
Y10S 388/9281 (2013.01)

(56) 선행기술조사문헌

KR1020220033367 A
KR1020210137570 A
KR1020110036979 A
KR1020200046692 A
JP2007518390 A
JP2003319686 A

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711156916
과제번호	2020R1A3B2079407
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	에너지 대전환 전력망 연구단
기여율	1/1
과제수행기관명	연세대학교
연구기간	2022.03.01 ~ 2023.02.28

명세서

청구범위

청구항 1

모터의 역기전력을 관측하는 역기전력 관측기; 및

상기 역기전력 관측기로부터 획득한 추정 역기전력과 실제 역기전력을 이용하여 역기전력 오차를 산출하고, 상기 역기전력 오차 및 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 이용하여 상기 역기전력 관측기를 통해 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 분석부를 포함하는

슬라이딩 모드 관측 시스템.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 분석부는 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 기반으로 생성된 아래 슬라이딩 모드 관측기 방정식을 이용하는

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \sqrt{|S_\alpha|} \operatorname{sgn}(S_\alpha) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\alpha) dt \\ k_1 \sqrt{|S_\beta|} \operatorname{sgn}(S_\beta) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\beta) dt \end{bmatrix}$$

슬라이딩 모드 관측 시스템.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 분석부는 아래 식을 만족하는지 여부에 기초하여, 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성을 판단하는

$$k_1 > 2\delta, k_2 > k_1 \frac{5\delta k_1 + 4\delta^2}{2(k_1 - 2\delta)}$$

슬라이딩 모드 관측 시스템.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 분석부는 리아푸노프 함수가 0보다 크고 상기 리아푸노프 함수의 미분값이 0보다 작은지 여부에 기초하여 상기 역기전력 관측기의 안정성을 확인하고,

상기 리아푸노프 함수는 아래 식으로 표현되는

$$V = \frac{\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2 + \tilde{\omega}_r^2}{2}$$

슬라이딩 모드 관측 시스템.

청구항 5

적어도 하나 이상의 프로세서에 의해 수행되는 슬라이딩 모드 관측 방법에 있어서,

모터의 실제 역기전력을 획득하는 단계;

역기전력 관측기로부터 획득한 추정 역기전력과 상기 실제 역기전력을 이용하여 역기전력 오차를 산출하는 단계; 및

상기 역기전력 오차 및 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 이용하여 상기 역기전력 관측기를 통해 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 단계를 포함하는

슬라이딩 모드 관측 방법.

청구항 6

제5항에 있어서,

상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 단계는 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 기반으로 생성된 아래 슬라이딩 모드 관측기 방정식을 이용하는 단계인

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \sqrt{|S_\alpha|} \operatorname{sgn}(S_\alpha) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\alpha) dt \\ k_1 \sqrt{|S_\beta|} \operatorname{sgn}(S_\beta) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\beta) dt \end{bmatrix}$$

슬라이딩 모드 관측 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

아래 식을 만족하는지 여부에 기초하여, 상기 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성을 판단하는 단계를 더 포함하는

$$k_1 > 2\delta, k_2 > k_1 \frac{5\delta k_1 + 4\delta^2}{2(k_1 - 2\delta)}$$

슬라이딩 모드 관측 방법.

청구항 8

제7항에 있어서,

리아푸노프 함수가 0보다 크고 상기 리아푸노프 함수의 미분값이 0보다 작은지 여부에 기초하여 상기 역기전력 관측기의 안정성을 판단하는 단계를 더 포함하고,

상기 리아푸노프 함수는 아래 식으로 표현되는

$$V = \frac{\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2 + \tilde{\omega}_r^2}{2}$$

슬라이딩 모드 관측 방법.

청구항 9

제5항 내지 제8항 중 어느 한 항에 기재된 슬라이딩 모드 관측 방법을 실행시키도록 컴퓨터로 판독 가능한 기록 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 센서리스 제어의 슬라이딩 모드 관측 시스템에 관한 것으로, 보다 상세하게는, 영구자석 동기 전동기의 역기전력 오차를 이용하여 모터의 각속도 및 위치를 산출하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 3상 영구자석 동기 전동기를 제어하는 방법은 전류와 모터의 각속도 및 각을 실시간으로 측정된 값과 지령 값의 차이를 이용한다. 이에, 모터의 각속도를 측정해주는 센서인 엔코더와 레졸버의 중요성은 강조되고 있다. 그러나, 이러한 장비들은 비싸고 부피가 크며 노이즈가 심한 환경에서는 원활한 출력을 하지 못해 신뢰성이 낮은 단점이 문제점이 존재한다.

[0003] 이를 해결하고자 최근에 센서리스 제어가 대두되고 있다. 센서리스 제어란 엔코더와 레졸버 없이 모터의 각속도와 각을 추정하는 제어이다. 따라서, 기존의 방식과 달리 속도 측정 센서가 없기 때문에, 종래보다 저렴하고 부피가 작은 모터 드라이버를 구성할 수 있으며, 노이즈가 있는 환경에서도 정확한 출력이 가능하다.

[0004] 그러나, 센서리스 제어는 관측기가 외란에 취약하다는 문제가 존재한다. 관측기는 외란이 없거나 외란의 변동성이 없는 환경에서는 잘 동작하지만, 외란의 변동성이 존재하는 환경에서는 정확한 각 추정이 어려우므로 실질적인 사용이 어렵다. 이러한 문제는 외란에 강인한 슬라이딩 모드 제어를 관측기에 적용함으로써 해결될 수 있을 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0005] 본 발명의 일 과제는 추정 역기전력을 이용하여 모터의 각속도 및 위치를 산출하는 슬라이딩 모드 관측 시스템에 관한 것이다.

과제의 해결 수단

[0006] 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측 시스템은 모터의 역기전력을 관측하는 역기전력 관측기; 및 상기 역기전력 관측기로부터 획득한 추정 역기전력과 실제 역기전력을 이용하여 역기전력 오차를 산출하고, 상기 역기전력 오차를 이용하여 상기 역기전력 관측기를 통해 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 분석부를 포함할 수 있다.

[0007] 여기서, 상기 분석부는 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 기반으로 생성된 슬라이딩 모드 관측기 방정식을 이용할 수 있다.

[0008] 여기서, 상기 분석부는 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 제정수와 관련된 식을 만족하는지 여부에 기초하여, 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성을 확인할 수 있다.

[0009] 여기서, 상기 분석부는 상기 리아푸노프 함수가 0보다 크고 상기 리아푸노프 함수의 미분값이 0보다 작은지 여부에 기초하여 상기 역기전력 관측부의 안정성을 확인할 수 있다.

[0011] 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측 방법은 적어도 하나 이상의 프로세서에 의해 수행되는 슬라이딩 모드 관측 방법에 있어서, 모터의 실제 역기전력을 획득하는 단계; 역기전력 관측부로부터 획득한 추정 역기전력과 상기 실제 역기전력을 이용하여 역기전력 오차를 산출하는 단계; 및 상기 역기전력 오차를 이용하여 상기 역기전력 관측기를 통해 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 단계를 포함할 수 있다.

[0012] 여기서, 상기 모터의 위치 및 속도를 산출하는 단계는 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 기반으로 생성된 슬라이딩 모드 관측기 방정식을 이용하는 단계일 수 있다.

[0013] 여기서, 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 제정수와 관련된 식을 만족하는지 여부에 기초하여, 상기 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성을 판단하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0014] 여기서, 상기 리아푸노프 함수가 0보다 크고 상기 리아푸노프 함수의 미분값이 0보다 작은지 여부에 기초하여 상기 역기전력 관측부의 안정성을 판단하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0015] 여기서, 상기 슬라이딩 모드 관측 방법을 실행시키도록 컴퓨터로 관독 가능한 기록 매체에 저장된 컴퓨터 프로그램이 제공될 수 있다.

발명의 효과

[0016] 본 발명의 일 실시예에 따르면 추정 역기전력을 이용하여 모터의 각속도 및 위치를 산출하는 슬라이딩 모드 관측 시스템이 제공될 수 있다.

도면의 간단한 설명

- [0017] 도 1은 일 실시예에 따른 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어에 사용되는 블록 다이어그램이다.
- 도 2는 종래와 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측기의 블록 다이어그램이다.
- 도 3은 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측 시스템의 블록도이다.
- 도 4는 속도 지령을 인가하였을 때 발생하는 실제 각과 추정 각 그래프에 대해 종래와 본원 발명을 비교한 도면이다.
- 도 5는 속도 지령을 인가하였을 때 발생하는 추정 각속도 그래프에 대해 종래와 본원 발명을 비교한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0018] 본 명세서에 기재된 실시예는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에게 본 발명의 사상을 명확히 설명하기 위한 것이므로, 본 발명이 본 명세서에 기재된 실시예에 한정되는 것은 아니며, 본 발명의 범위는 본 발명의 사상을 벗어나지 아니하는 수정에 또는 변형예를 포함하는 것으로 해석되어야 한다.
- [0019] 본 명세서에서 사용되는 용어는 본 발명에서의 기능을 고려하여 가능한 현재 널리 사용되고 있는 일반적인 용어를 선택하였으나 이는 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자의 의도, 관례 또는 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 다만, 이와 달리 특정한 용어를 임의의 의미로 정의하여 사용하는 경우에는 그 용어의 의미에 관하여 별도로 기재할 것이다. 따라서 본 명세서에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌 그 용어가 가진 실질적인 의미와 본 명세서의 전반에 걸친 내용을 토대로 해석되어야 한다.
- [0020] 본 명세서에 첨부된 도면은 본 발명을 용이하게 설명하기 위한 것으로 도면에 도시된 형상은 본 발명의 이해를 돕기 위하여 필요에 따라 과장되어 표시된 것일 수 있으므로 본 발명이 도면에 의해 한정되는 것은 아니다.
- [0021] 본 명세서에서 본 발명에 관련된 공지의 구성 또는 기능에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 흐릴 수 있다고 판단되는 경우에 이에 관한 자세한 설명은 필요에 따라 생략하기로 한다.
- [0023] 도 1은 일 실시예에 따른 영구자석 동기 전동기의 센서리스 제어에 사용되는 블록 다이어그램이다.
- [0024] 도 1을 참조하면, 블록 다이어그램은 복수의 PI(PI 제어(Proportional-Integral) 제어, 복수의 좌표 변환계, 공간 벡터 펄스 폭 변조부, 인버터 및 슬라이딩 모드 관측기를 포함할 수 있다.
- [0025] 도 1의 센서리스 제어는 역기전력을 기반으로 하는 방법으로, 역기전력의 오차를 이용하기 위해 슬라이딩 모드 관측기를 포함할 수 있다. 센서리스 제어는 영구자석 동기 전동기의 전류, 전압 및 슬라이딩 모드 관측기에 의한 역기전력 등을 이용하여 모터의 각속도와 위치를 산출할 수 있다.
- [0026] 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측기는 추정 역기전력 기반의 역기전력의 오차를 이용해 모터의 각속도 및 위치를 산출할 수 있다. 슬라이딩 모드 관측기의 구체적인 구성 요소에 대해서는 도 2를 참조하여 이하에서 설명한다.
- [0028] 도 2는 종래와 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측기의 블록 다이어그램이다.
- [0029] 도 2(a)는 종래의 슬라이딩 모드 관측기의 블록 다이어그램이고, 도 2(b)는 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측기의 블록 다이어그램이다.
- [0030] 도 2(a)를 참조하면, 종래의 슬라이딩 모드 관측기는 시그넘(Signum) 함수를 사용하였다. 시그넘 함수는 슬라이딩 표면이 0인 지점에 빠르게 진입할 수 있는 장점이 존재한다. 그러나, 시그넘 함수는 불연속적인 값을 갖기

때문에 채터링이 발생하게 되고, 이는 소음을 유발하고 모터의 수명을 단축시킬 수 있다.

- [0031] 또한, 종래의 슬라이딩 모드 관측기에서 추출된 역기전력에는 고주파 성분의 노이즈가 많이 포함되어 있으므로 저역 통과 필터가 필요하다. 그러나, 저역 통과 필터로 인해 추정 각 및 각속도에 시지연성이 발생하게 된다. 따라서, 종래의 슬라이딩 모드 관측기는 시지연성으로 인해 정확한 각을 추정하지 못한다는 문제가 존재한다.
- [0032] 도 2(b)를 참조하면, 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측기는 시그넘 함수 및 저역 통과 필터를 사용하지 않는다. 또한, 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측기는 종래의 단점인 채터링과 시지연성을 개선하기 위해 역기전력의 오차를 입력으로 하는 관측기 및 슈퍼 트위스팅 알고리즘을 이용함으로써 모터의 각속도 및 각 위치를 산출한다.
- [0034] 도 3은 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측 시스템의 블록도이다.
- [0035] 도 3을 참조하면, 본원 발명의 일 실시예에 따른 슬라이딩 모드 관측 시스템(1000)은 제어부(1100), 모델 생성부(1200), 슬라이딩 모드 관측부(1300), 역기전력 관측부(1400) 및 분석부(1500)를 포함할 수 있다. 그러나 도 3에 한정되지 않고, 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측 시스템(1000)에는 다른 구성 요소가 추가될 수도 있다. 또한, 어느 하나의 구성 요소가 생략되거나 다른 구성 요소와 병합될 수도 있다.
- [0036] 제어부(1100)는 슬라이딩 모드 관측 시스템(1000)을 전반적으로 제어하는 프로세서일 수 있다. 구체적으로, 제어부(1100)는 모델 생성부(1200), 슬라이딩 모드 관측부(1300), 역기전력 관측부(1400) 및 분석부(1500)에 명령을 전송하여 각 구성 요소의 작동을 제어할 수 있다.
- [0037] 이하에서 특별한 언급이 없는 경우에 방법 수행의 주체는 제어부(1100)로 해석될 수 있다.
- [0038] 모델 생성부(1200)는 영구자석 모델 방정식을 제공할 수 있다. 이때, 영구자석 모델 방정식은 영구자석 동기 전동기의 수학적 모델로서, 전류, 전압 및 역기전력을 변수로 할 수 있다.
- [0039] 슬라이딩 모드 관측부(1300)는 슬라이딩 모드 관측기 방정식을 제공할 수 있다. 이때, 슬라이딩 모드 관측기 방정식은 슈퍼 트위스팅 알고리즘(Super Twisting Algorithm, STA)을 기반으로 생성될 수 있다.
- [0040] 역기전력 관측부(1400)는 모터의 역기전력을 관측하여, 추정 역기전력을 산출할 수 있다. 상기 추정 역기전력은 시스템의 결과값인 각속도 및 위치의 정확도에 따라 수정될 수 있다. 또는 상기 추정 역기전력은 리아푸노프 함수를 이용한 안정성 판단의 결과에 따라 수정될 수 있다.
- [0041] 분석부(1500)는 모델 생성부(1200), 슬라이딩 모드 관측부(1300) 및 역기전력 관측부(1400)로부터 데이터를 획득하여, 수학적 연산을 수행할 수 있다. 구체적으로, 분석부(1500)는 획득한 데이터에 기초하여 모터의 각속도 및 위치를 산출할 수 있다.
- [0042] 이하에서는 분석부(1500)의 연산 과정에 대해 자세하게 설명한다.
- [0043] 분석부(1500)는 슬라이딩 모드의 이론에 기초하여, 슬라이딩 표면 S를 아래 [수학식 1]과 같이 정의할 수 있다.

수학식 1

[0044]
$$S = \begin{bmatrix} S_\alpha \\ S_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha - i_\alpha \\ \hat{i}_\beta - i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix}$$

[0045] 이때, i_α, i_β 는 정지 좌표계에서의 전류 값이고, $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ 는 추정 전류 값이고, $\tilde{i}_\alpha, \tilde{i}_\beta$ 는 추정 전류와 실제 전류와의 오차 값을 의미한다.

[0046] 분석부(1500)는 모델 생성부(1200)로부터 제공받은 영구자석 모델 방정식을 이용하여 전류식을 아래 [수학식 2]와 같이 정의할 수 있다.

수학식 2

[0047]
$$L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}$$

[0048] 이때, L_s 는 고정자에 대한 인덕턴스, R_s 는 고정자에 대한 저항, u_α, u_β 는 정지 좌표계에서의 전압 값, e_α, e_β 는 정지 좌표계에서 역기전력을 의미한다.

[0049] 여기서, 역기전력에 관한 방정식은 아래 [수학식 3]과 같이 정의될 수 있다.

수학식 3

[0050]
$$\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \omega_r \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ \cos \theta \end{bmatrix}$$

[0051] 이때, λ_f 는 영구자석 동기 전동기의 쇄교자속을 의미하며, θ 는 전기적 각의 위치, ω_r 는 전기적 각속도를 의미한다.

[0052] 분석부(1500)는 [수학식 2]에 기초하여 추정 전류 방정식을 아래 [수학식 4]와 같이 정의할 수 있다.

수학식 4

[0053]
$$L_s \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} = -R_s \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}$$

[0054] 여기서, v_α, v_β 는 슈퍼 트위스팅 알고리즘을 이용한 식이며, 이는 아래 [수학식 5]와 같이 표현될 수 있다.

[0055] 분석부(1500)는 역기전력 관측부(1400)로부터 제공받은 추정 역기전력 $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 을 사용할 수 있다. 즉, 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측 시스템은 종래와 달리 추정 역기전력값을 이용하여, 채터링과 시지연성의 문제를 해결할 수 있다.

수학식 5

[0056]
$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_1 \sqrt{|S_\alpha|} \operatorname{sgn}(S_\alpha) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\alpha) dt \\ k_1 \sqrt{|S_\beta|} \operatorname{sgn}(S_\beta) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\beta) dt \end{bmatrix}$$

[0057] 분석부(1500)는 [수학식 2] 및 [수학식 4]에 기초하여, 아래 [수학식 6]을 도출할 수 있다.

수학식 6

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} = -\frac{R_s}{L_s} \begin{bmatrix} \tilde{i}_\alpha \\ \tilde{i}_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L_s} \left(\begin{bmatrix} \tilde{e}_\alpha \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \right)$$

[0058]

이때, $\tilde{e}_\alpha, \tilde{e}_\beta$ 는 역기전력 오차이며, $\tilde{e}_\alpha = \hat{e}_\alpha - e_\alpha$ 와 $\tilde{e}_\beta = \hat{e}_\beta - e_\beta$ 로 표현될 수 있다. 즉, 역기전력 오차는 추정 역기전력과 실제 역기전력의 차이일 수 있다. 실제 역기전력은 영구자석 동기 전동기로부터 획득될 수 있다. 구체적으로, 실제 역기전력은 영구자석 동기 전동기의 작동을 통해 산출될 수 있다.

[0059]

분석부(1500)는 영구자석 동기 전동기가 슬라이딩 모드 영역에 진입했다고 판단하면, $S = \dot{S} = \tilde{i}_{\alpha\beta} = 0$ 임을 이용하여 식을 전개할 수 있다. 이때, 분석부(1500)는 영구자석 동기 전동기의 속도가 지령 속도에 도달하였는지 여부에 기초하여 슬라이딩 모드 영역의 진입 여부를 판단할 수 있다.

[0060]

예를 들어, 지령 속도가 10[m/s]인 경우, 분석부(1500)는 실제 속도가 10[m/s]에서 ± 1 [m/s]의 범위 내에 포함되는 경우에 영구자석 동기 전동기가 슬라이딩 모드 영역에 진입한 것으로 판단할 수 있다.

[0061]

분석부(1500)는 $S = \dot{S} = \tilde{i}_{\alpha\beta} = 0$ 임을 이용하여, 역기전력의 오차를 아래 [수학식 7]과 같이 표현할 수 있다.

[0062]

수학식 7

$$\begin{bmatrix} \tilde{e}_\alpha \\ \tilde{e}_\beta \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = -\begin{bmatrix} k_1 \sqrt{|S_\alpha|} \operatorname{sgn}(S_\alpha) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\alpha) dt \\ k_1 \sqrt{|S_\beta|} \operatorname{sgn}(S_\beta) + k_2 \int \operatorname{sgn}(S_\beta) dt \end{bmatrix}$$

[0063]

이때, [수학식 7]을 이용하기 위해서, 분석부(1500)는 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성을 판단하여야 한다. 분석부(1500)는 리아푸노프 함수를 통해 안정성을 판단하여야 하는데, 아래 [수학식 8]의 조건을 만족하면 슈퍼 트위스팅 알고리즘의 안정성은 성립될 수 있다.

[0064]

수학식 8

$$k_1 > 2\delta, k_2 > k_1 \frac{5\delta k_1 + 4\delta^2}{2(k_1 - 2\delta)}$$

[0065]

이때, δ 는 0보다 큰 상수를 의미한다.

[0066]

역기전력의 오차를 이용하여 모터의 각속도 및 위치를 산출하기 위해, 분석부(1500)는 영구자석 동기 전동기의 역기전력에 관한 상태 방정식인 아래 [수학식 9]를 이용할 수 있다.

[0067]

수학식 9

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\omega_r e_\beta \\ \omega_r e_\alpha \end{bmatrix}$$

[0068]

[0069] 여기서, [수학식 9]는 모터의 각속도에 대한 변화량은 고정자 전류의 변화량보다 작기 때문에, $\dot{\omega}_r = 0$ 으로 가정하여 표현될 수 있다.

[0070] 분석부(1500)는 [수학식 9]에 기초하여, 아래 [수학식 10]과 같이 모터의 각속도 및 위치를 산출할 수 있는 역기전력 관측기를 설계할 수 있다.

수학식 10

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{e}_\alpha \\ \hat{e}_\beta \\ \hat{\omega}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\hat{\omega}_r \hat{e}_\beta - \tilde{l} \hat{e}_\alpha \\ \hat{\omega}_r \hat{e}_\alpha - \tilde{l} \hat{e}_\beta \\ \tilde{e}_\alpha \hat{e}_\beta - \tilde{e}_\beta \hat{e}_\alpha \end{bmatrix}$$

[0071]

[0072] 여기서, \tilde{l} 은 관측기의 이득을 의미하며 0보다 큰 값을 갖는다.

[0073] [수학식 10]을 기반으로, 역기전력 관측기의 안정성을 증명하기 위해 리아푸노프 함수는 아래 [수학식 11]과 같이 정의될 수 있다.

수학식 11

$$V = \frac{\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2 + \tilde{\omega}_r^2}{2} > 0$$

[0074]

[0075] 이때, 역기전력 관측기의 안정성이 증명되려면 리아푸노프 함수를 미분한 값은 0보다 작아야 한다. 따라서, 분석부(1500)는 리아푸노프 함수를 미분한 아래 [수학식 12]가 0보다 작은지 여부를 판단할 수 있다.

수학식 12

$$\dot{V} = \tilde{e}_\alpha \dot{\tilde{e}}_\alpha + \tilde{e}_\beta \dot{\tilde{e}}_\beta + \tilde{\omega}_r \dot{\tilde{\omega}}_r = -l(\tilde{e}_\alpha^2 + \tilde{e}_\beta^2)$$

[0076]

[0077] 분석부(1500)는 결과적으로, [수학식 10]을 이용하여 모터의 추정각에 대한 아래 [수학식 13]을 구할 수 있다. 분석부(1500)는 [수학식 10]을 이용하여 모터의 각속도를 산출하고, [수학식 13]을 이용하여 모터의 위치를 산출할 수 있다.

수학식 13

$$\hat{\theta} = \tan^{-1} \left(-\frac{\hat{e}_\alpha}{\hat{e}_\beta} \right)$$

[0078]

[0080] 본원 발명의 우수성을 검증하기 위해, 타겟 모터에 부하 토크로 1[Nm]을 연결, 속도 지령은 시작과 동시에 1000[rpm]으로 인가하였으며, 0 내지 0.5초에 발생하는 추정 각속도와 추정 각을 종래와 함께 비교하였다. 결과는 도 4 및 도 5를 참조하여 이하에서 설명한다.

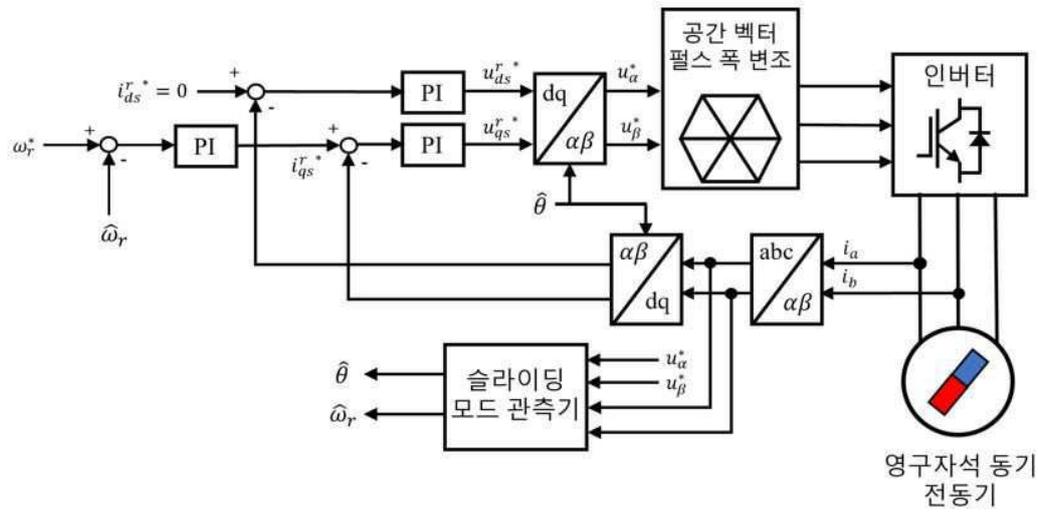
[0082] 도 4는 속도 지령을 인가하였을 때 발생하는 실제 각과 추정 각 그래프에 대해 종래와 본원 발명을 비교한 도면

이다.

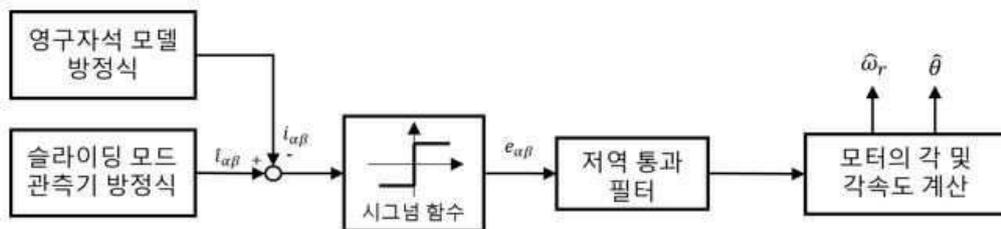
- [0083] 도 4(a)는 종래 방법에 의한 그래프이고, 도 4(b)는 본원 발명에 의한 그래프이다.
- [0084] 도 4(a)를 참조하면, 종래의 슬라이딩 모드 관측 시스템은 추정 위치와 실제 위치 간의 시지연성 문제가 존재하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 도 4(b)를 참조하면, 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측 시스템은 종래와 달리 추정 위치와 실제 위치간의 시지연성이 거의 존재하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 본원 발명에서는 저역 통과 필터를 사용하지 않기 때문이다.
- [0086] 도 5는 속도 지령을 인가하였을 때 발생하는 추정 각속도 그래프에 대해 종래와 본원 발명을 비교한 도면이다.
- [0087] 도 5(a)는 종래 방법에 의한 그래프이고, 도 5(b)는 본원 발명에 의한 그래프이다.
- [0088] 도 5(a)를 참조하면, 종래의 슬라이딩 모드 관측 시스템은 속도 지령에 도달하였을 때 발생하는 채터링의 크기가 35[rpm]인 것을 확인할 수 있다. 반면, 도 5(b)를 참조하면, 본원 발명의 슬라이딩 모드 관측 시스템에서의 채터링 크기는 15[rpm]으로, 종래보다 크기가 약 58% 감소한 것을 확인할 수 있다. 이는 본원 발명에서는 불연속적인 특성을 갖는 시그넘 함수를 사용하지 않기 때문이다.
- [0090] 센서리스 제어는 기존의 모터 제어와 달리, 속도 측정 센서 없이 제어하는 것이므로, 모터 드라이버의 비용 절감과 부피를 감소시킬 수 있는 장점이 존재한다. 그러나, 기존 센서리스 제어의 관측기는 외란 변동성에 취약하다는 문제가 존재한다. 따라서, 외란이 아예 없거나 외란 변동성이 없는 환경에서는 센서리스 제어가 사용되고 있으나, 외란이 갑작스럽게 발생하는 환경에서는 센서리스 제어의 실질적인 사용이 어려웠다.
- [0091] 이를 해결하기 위해, 외란에 강한 제어 중 하나인 슬라이딩 모드 관측기가 해결 방안으로 언급되어왔다. 그러나, 기존의 시그넘 함수를 사용한 슬라이딩 모드 관측기는 극심한 채터링으로 인한 모터의 소음 유발 및 수명 감소 문제가 존재한다. 또한, 저역 통과 필터의 사용으로 인해, 실제 각과 추정 각 사이에 시지연성이 발생하게 되어, 정확한 각 추정이 어렵다는 문제가 존재한다.
- [0092] 채터링을 해결하고자, 연속적인 시그모이드(Sigmoid) 함수를 사용하는 방법이 제시되었으나, 이 방법 또한 출력되는 역기전력에 고주파 노이즈 성분이 포함되어 있어, 저역 통과 필터의 사용이 필수적이었다.
- [0093] 본원 발명은 시그넘 함수와 저역 통과 필터를 사용하지 않고, 슈퍼 트위스팅 알고리즘 및 역기전력 관측기를 도입함으로써, 채터링 및 시지연성 문제를 해결할 수 있다. 따라서, 외란의 변동성이 큰 환경(전기자동차 및 가전 기기 분야)에서도 본원 발명에 개시된 기술을 적용함으로써, 센서리스 제어가 가능할 것이다.
- [0095] 실시예에 따른 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 상기 컴퓨터 판독 가능 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 실시예를 위하여 특별히 설계되고 구성된 것들이거나 컴퓨터 소프트웨어 당업자에게 공지되어 사용 가능한 것일 수도 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체의 예에는 하드 디스크, 플로피 디스크 및 자기 테이프와 같은 자기 매체(magnetic media), CD-ROM, DVD와 같은 광기록 매체(optical media), 플롭티컬 디스크(floptical disk)와 같은 자기-광 매체(magneto-optical media), 및 롬(ROM), 램(RAM), 플래시 메모리 등과 같은 프로그램 명령을 저장하고 수행하도록 특별히 구성된 하드웨어 장치가 포함된다. 프로그램 명령의 예에는 컴파일러에 의해 만들어지는 것과 같은 기계어 코드뿐만 아니라 인터프리터 등을 사용해서 컴퓨터에 의해서 실행될 수 있는 고급 언어 코드를 포함한다. 상기된 하드웨어 장치는 실시예의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다
- [0096] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 실시예와 도면에 의해 설명되었으나, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 상기의 기재로부터 다양한 수정 및 변형이 가능하다. 예를 들어, 설명된 기술들이 설명된 방법과 다른 순서로 수행되거나, 및/또는 설명된 시스템, 구조, 장치, 회로 등의 구성요소들이 설명된 방법과 다른 형태로 결합 또는 조합되거나, 다른 구성요소 또는 균등물에 의하여 대치되거나 치환되더라도 적절한 결과가 달성될 수 있다.
- [0097] 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

도면

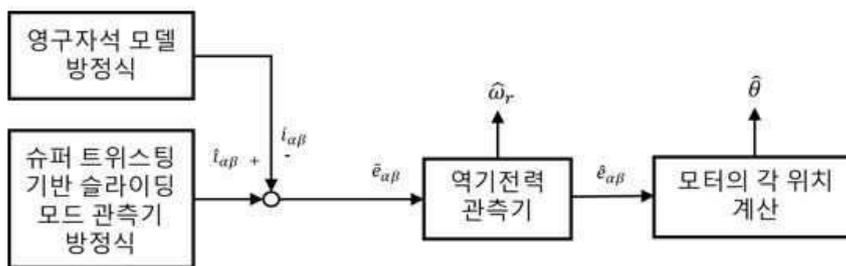
도면1



도면2

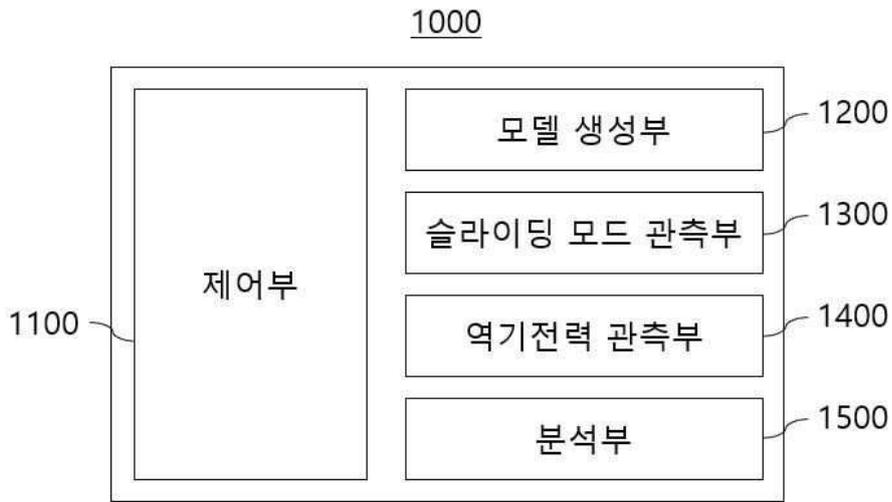


(a)

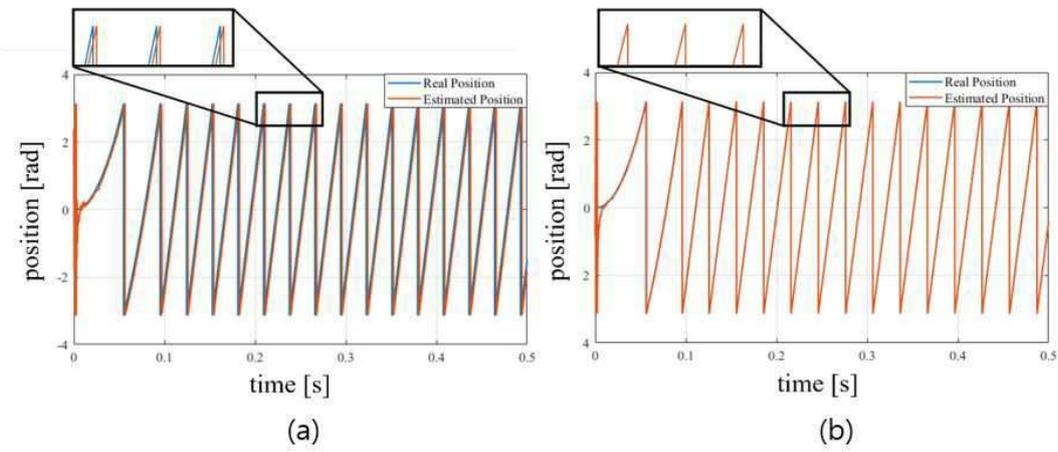


(b)

도면3



도면4



도면5

