



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2024-0114943
(43) 공개일자 2024년07월25일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)

G06F 30/23 (2020.01) G01R 31/34 (2006.01)
G06F 111/10 (2020.01) G06F 119/08 (2020.01)
H02K 11/25 (2016.01)

(52) CPC특허분류

G06F 30/23 (2020.01)
G01R 31/346 (2013.01)

(21) 출원번호 10-2023-0007258

(22) 출원일자 2023년01월18일

심사청구일자 2023년01월18일

(71) 출원인

경희대학교 산학협력단

경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)

(72) 발명자

김진균

경기도 수원시 영통구 매영로310번길 27, 645동 1201호 (영통동, 신원미주아파트)

안창욱

경기도 수원시 영통구 매영로247번길 20, 116동 305호 (원천동)

이지원

전라북도 전주시 덕진구 동부대로 785, 301동 207호 (호성동1가, 동신3차아파트)

(74) 대리인

김종선, 이형석

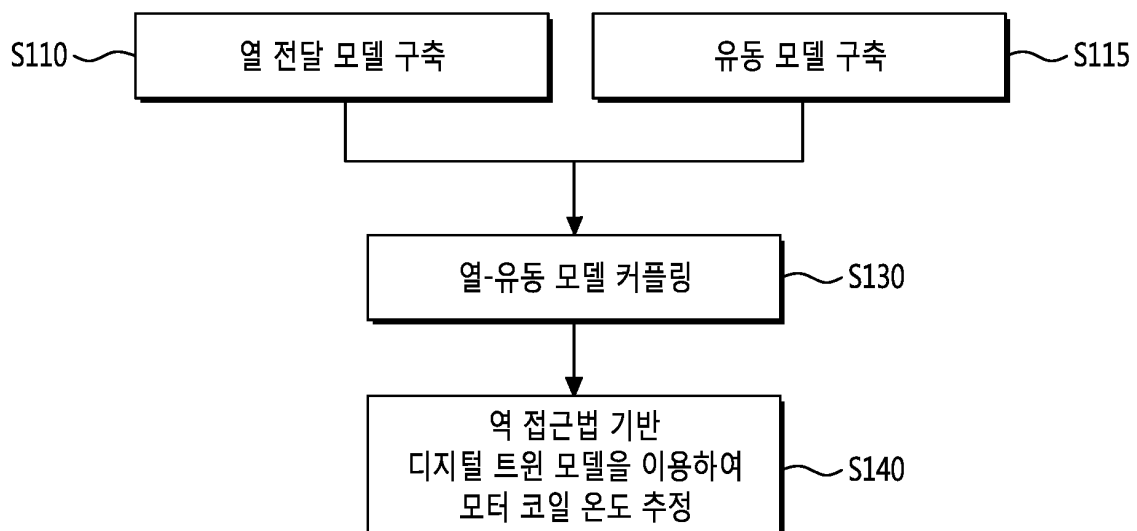
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치

(57) 요약

본 발명에 따른 모터 코일 온도 추정 방법은 온도 데이터가 입력되면, 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 열 전달 모델을 구축하는 단계, 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 유동 모델을 구축하는 단계, 열 전달 모델과 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계 및, 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정하는 단계를 포함한다. 이에 의하면, 피드스루를 설치하지 않고 밀폐된 내부공간에서 작동하는 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다. 이와 더불어, 실험시 검증 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

H02K 11/25 (2016.01)

G06F 2111/10 (2020.01)

G06F 2119/08 (2020.01)

명세서

청구범위

청구항 1

온도 데이터가 입력되면, 상기 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 열 전달 모델을 구축하는 단계;

상기 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 유동 모델을 구축하는 단계;

상기 열 전달 모델과 상기 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계; 및,

상기 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정하는 단계;를 포함하는 모터 코일 온도 추정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 열 전달 모델을 구축하는 단계는,

열 전달 수치모델을 구축하는 단계;

상기 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 단계;

민감도 계수 행렬을 생성하는 단계; 및,

상기 열 전달 수치모델, 상기 안정기 파라미터 및 상기 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 열 전달 모델을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는 단계;를 포함하는, 모터 코일 온도 추정 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,

상기 유동 모델을 구축하는 단계는,

비선형 시스템 식별(Nonlinear system identification), 희소 식별(Sparse identification of nonlinear dynamics, SINDy), 역학모드 분해(Dynamic mode decomposition with Koopman operator) 및 최소 제곱법(Normal equation solution of least-squares problem) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는, 모터 코일 온도 추정 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계는,

명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(Implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(Surface-2-Surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(Volume-2-Volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(Point-2-Point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정하는, 모터 코일 온도 추정 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계는,

지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 온도를 추정하는, 모터 코일 온도 추정 방법.

청구항 6

온도 데이터가 입력되면, 열 전달 모델을 구축하고, 상기 열 전달 모델을 이용하여 상기 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측하는 열 연산부;

유동 모델을 구축하고, 상기 유동 모델을 이용하여 상기 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측하는 유동 연산부; 및,

상기 열 전달 모델과 상기 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하고, 상기 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정하는 열-유동 연산부;를 포함하는 모터 코일 온도 추정 장치.

청구항 7

제6항에 있어서,

상기 열 연산부는,

열 전달 수치모델을 구축하는 수치모델 구축부;

상기 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 파라미터 설정부;

민감도 계수 행렬을 생성하는 행렬 생성부; 및,

상기 열 전달 수치모델, 상기 안정기 파라미터 및 상기 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 상기 열 전달 모델을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는 예측부;를 포함하는, 모터 코일 온도 추정 장치.

청구항 8

제6항에 있어서,

상기 유동 연산부는,

비선형 시스템 식별(Nonlinear system identification), 희소 식별(Sparse identification of nonlinear dynamics, SINDy), 역학모드 분해(Dynamic mode decomposition with Koopman operator) 및 최소 제곱법(Normal equation solution of least-squares problem) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는, 모터 코일 온도 추정 장치.

청구항 9

제6항에 있어서,

상기 열-유동 연산부는,

명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(Implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(Surface-2-Surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(Volume-2-Volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(Point-2-Point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정하는, 모터 코일 온도 추정 장치.

청구항 10

제9항에 있어서,

상기 열-유동 연산부는,

지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 온도를 추정하는, 모터 코일 온도 추정 장치.

발명의 설명

기술 분야

본 발명은 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치에 관한 것으로서, 특히, 모터 외부를 측정한 온도 데이터만으로 모터 코일의 온도를 추정할 수 있는 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치에 관한 것이다.

[0001]

배경 기술

- [0002] 모터는 모터 코일에 전류가 흘러 구동 토크를 발생시키지만, 모터 코일에 대전류를 계속 흘렸을 경우, 모터 코일이 발열하여 모터 코일의 파손이나 모터 마그넷의 감자(減磁) 등의 장애가 생기는 일이 있을 수 있다. 이에, 모터 코일의 온도를 측정하고, 모터 코일에 흘리는 전류를 제한하는 등의 보호가 필요하다.
- [0003] 그러나, 모터 코일에 온도 센서를 직접 설치하는 것은 물리적으로 곤란하다. 특히, 단품이 아닌 시스템 단위의 모듈 내부 모터 코일의 온도를 직접 측정하는 것은 어렵다. 더욱이, 모터의 하우징에 센서가 삽입될 수 있는 피드스루를 만드는 것은 추가 가공비용이 발생하며 실제 시스템과 괴리가 생기게 된다.
- [0004] 이를 극복하고자 모터 코일에 온도 센서를 직접 부착하지 않고 모터 코일의 온도를 측정하기 위한 디지털 트윈(Digital twin) 기술들이 개발되고 있는 추세이다.
- [0005] 디지털 트윈은 물리 현상을 현실에 가깝게 반영하는 FMU(Functional Mock-up Unit)를 구축하는 것에서 시작하며, FMU는 크게 직접 접근법(Direct problem)과 역 접근법(Inverse problem)으로 개발되고 있다.
- [0006] 기존의 디지털 트윈 기술들은 주로 직접 접근법에 기반한 기술들이 많으며, 역 접근법에 의해 모터 코일의 온도를 추정하는 기술을 찾아보기 어려운 실정이다.
- [0007] 현재, 직접 접근법에 의한 모터 코일 온도 추정 방법은 전기 데이터를 수집하여 모터의 전력손실을 계산하고, 이를 열원으로 입력하고 온도가 출력되는 FMU가 구성된다. 이때, 모터의 전력손실(Power loss)은 크게 동손(copper losses), 철손(core losses), 기계손(Mechanical losses)으로 나뉘어 있는데, 철손과 기계손을 측정하기 위한 데이터들은 수집되기 어렵다. 따라서 동손만 고려하는 경우가 많으며, 이로 인해 추정 오차가 크게 발생할 수 있다.
- [0008] 또한, 동손은 $3I^2R$ 로 계산될 수 있는데, 온도가 증가함에 따라 저항(R)이 증가하므로 비선형 모델임에도 불구하고 비선형성을 선형화해서 고려하는 경우가 많고 이로 인해 오차가 발생하는 문제점이 있었다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0009] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-0797336호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0010] 본 발명은 상기와 같은 문제점을 해결하기 위한 것으로서, 모터 외부를 측정한 온도 데이터만으로 모터 코일의 온도를 추정할 수 있는 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치를 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

- [0011] 상기와 같은 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 일 실시예에 따른 모터 코일 온도 추정 방법은 온도 데이터가 입력되면, 상기 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 열 전달 모델을 구축하는 단계; 상기 온도 데이터에 근거하여 간접 열원을 예측하기 위한 유동 모델을 구축하는 단계; 상기 열 전달 모델과 상기 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계; 및, 상기 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0012] 또한, 상기 열 전달 모델을 구축하는 단계는, 열 전달 수치모델을 구축하는 단계; 상기 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 단계; 민감도 계수 행렬을 생성하는 단계; 및, 상기 열 전달 수치모델, 상기 안정기 파라미터 및 상기 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 열 전달 모델을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는 단계;를 포함할 수 있다.
- [0013] 또한, 상기 유동 모델을 구축하는 단계는, 비선형 시스템 식별(Nonlinear system identification), 희소 식별(Sparse identification of nonlinear dynamics, SINDy), 역학모드 분해(Dynamic mode decomposition with Koopman operator) 및 최소 제곱법(Normal equation solution of least-squares problem) 중 어느 하나의 방법

을 이용하여 상기 간접 열원을 예측할 수 있다.

[0014] 또한, 상기 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계는 명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(Surface-2-Surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(Volume-2-Volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(Point-2-Point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.

[0015] 더욱 바람직하게, 상기 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계는, 지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.

[0016] 한편, 본 발명의 일 실시예에 따른 모터 코일 온도 추정 장치는 온도 데이터가 입력되면, 열 전달 모델을 구축하고, 상기 열 전달 모델을 이용하여 상기 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측하는 열 연산부; 유동 모델을 구축하고, 상기 유동 모델을 이용하여 상기 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측하는 유동 연산부; 및, 상기 열 전달 모델과 상기 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하고, 상기 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정하는 열-유동 연산부;를 포함할 수 있다.

[0017] 또한, 상기 열 연산부는, 열 전달 수치모델을 구축하는 수치모델 구축부; 상기 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정하는 파라미터 설정부; 민감도 계수 행렬을 생성하는 행렬 생성부; 및, 상기 열 전달 수치모델, 상기 안정기 파라미터 및 상기 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 상기 열 전달 모델을 이용하여 상기 간접 열원을 예측하는 예측부;를 포함할 수 있다.

[0018] 또한, 상기 유동 연산부는, 비선형 시스템 식별(Nonlinear system identification), 희소 식별(Sparse identification of nonlinear dynamics, SINDy), 역학모드 분해(Dynamic mode decomposition with Koopman operator) 및 최소 제곱법(Normal equation solution of least-squares problem) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 상기 간접 열원을 예측할 수 있다.

[0019] 또한, 상기 열-유동 연산부는, 명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(Surface-2-Surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(Volume-2-Volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(Point-2-Point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.

[0020] 더욱 바람직하게, 상기 열-유동 연산부는, 지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.

발명의 효과

[0021] 상기와 같은 본 발명에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치는 피드스루를 설치하지 않고 밀폐된 내부공간에서 작동하는 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다.

[0022] 이와 더불어, 시험시 검증 비용의 절감 효과를 기대할 수 있다.

[0023] 나아가, 원자로 및 전기차와 같이 온도 센서를 모터 코일 내부로 직접 삽입하기 힘든 구조에서도 모터 코일의 온도를 모니터링하고 이상 감지하는 시스템에 활용될 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0024] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 장치를 간략하게 나타내는 개략도이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 장치의 구성을 개략적으로 나타내는 블록도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법을 설명하기 위한 흐름도이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 커플링 방법을 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0025] 이하에서 본 발명의 기술적 사상을 명확화하기 위하여 첨부된 도면을 참조하여 본 발명의 바람직한 실시예를 상

세하게 설명하도록 한다. 본 발명을 설명함에 있어서, 관련된 공지 기능 또는 구성요소에 대한 구체적인 설명이 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 수 있다고 판단되는 경우 그 상세한 설명을 생략할 것이다. 도면들 중 실질적으로 동일한 기능구성을 갖는 구성요소들에 대하여는 비록 다른 도면상에 표시되더라도 가능한 한 동일한 참조번호들 및 부호들을 부여하였다. 설명의 편의를 위하여 필요한 경우에는 장치와 방법을 함께 서술하도록 한다.

[0026] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 장치를 간략하게 나타내는 개략도이다.

[0027] 도 1을 참조하면, 모터 코일 온도 추정 장치(100)는 모터(10)의 외부에 부착된 센서(20)에 의해 측정된 온도 데이터가 입력되면, 디지털 트윈 기반으로 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다.

[0028] 일 실시예에서, 모터 코일 온도 추정 장치(100)는 역 접근법에 의해 온도 데이터의 열원을 간접 예측하고, 예측한 열원으로 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다. 이를 위해, 모터 코일 온도 추정 장치(100)는 열 전도 모델과 유동 모델을 구축한 후, 열 전도 모델과 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하고, 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다.

[0030] 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 장치의 구성을 개략적으로 나타내는 블록도이다.

[0031] 도 1 및 도 2를 참조하면, 모터 코일 온도 추정 장치(100)는 열 연산부(110), 유동 연산부(120) 및 열-유동 연산부(130)를 포함할 수 있다.

[0032] 열 연산부(110)는 모터의 열적 거동을 표현할 선형 열 전달 모델을 구축할 수 있다.

[0033] 열 연산부(110)는 온도 데이터가 입력되면, 열 전달 모델을 구축하고, 열 전달 모델을 이용하여 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측할 수 있다.

[0034] 열 연산부(110)는 간접 열원과 전체 온도를 아래의 (수식1)에 의하여 산출할 수 있다.

[0035] (수식1)

$$\Delta t = t^{i+1} - t^i,$$

$$\Delta q^{i+1} = [(X_s^{i+1})^T (X_s^{i+1}) + \alpha I]^{-1} (X_s^{i+1})^T (Y^{i+1} - \bar{T}_s^{i+1}),$$

$$q^{i+1} = q^i + \Delta q^{i+1},$$

$$T^{i+1} = T^i + X^{i+1} \Delta q^{i+1}$$

[0040] 여기서, t^i 는 과거 시점 시간, t^{i+1} 은 현재 시점 시간, Δt 는 측정 시간 간격, q^{i+1} 은 예측된 열원 벡터, Y^{i+1} 은 측정 온도 벡터, T^{i+1} 은 예측된 전체 온도 벡터(온도센서 구비 지점 외의 온도 포함)를 의미한다. 또한, $\bar{T}_s^{i+1}$ 은 T_s^i 를 q^i 로 일정하게 가열했을 때 온도센서 구비 지점의 가상 온도 벡터이며, 온도센서가 1개인 경우에는 상수가 된다. 그리고, X_s^{i+1} 은 센서 위치의 민감도 계수 행렬이며 아래의 (수식2)로 정의된다.

[0041] (수식2)

$$X_s^{i+1} = \frac{\partial T_s^{i+1}}{\partial q} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_1^{i+1}}{\partial q_M} \\ \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_2^{i+1}}{\partial q_M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_1} & \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_2} & \dots & \frac{\partial T_N^{i+1}}{\partial q_M} \end{bmatrix}$$

[0042] 여기서, N은 각각 사용된 센서의 개수에 대응되고, M은 공간적으로 분해된 열원의 개수에 대응된다. X^{i+1} 도 같은 방식으로 정의되며, 열의 개수는 M으로 동일하지만, 행의 개수는 후술할 수치모델의 전체 자유도와 같다. 예를 들어, 수치모델 구축단계에서 구축된 모터의 수치모델의 자유도가 100이라면, X^{i+1} 는 100×100행렬이 된다.

[0043] 실시예에서, 열 연산부(110)는 수치모델 구축부, 파라미터 설정부, 행렬 생성부 및 예측부를 포함할 수 있다.

[0044] 수치모델 구축부는 열 전달 수치모델을 구축할 수 있다. 즉, 수치모델 구축부는 열 전달 수치모델의 구축에 유한요소법(Finite Element Method), 유한차분법(Finite Difference Method), 경계요소법(Boundary Element Method) 등의 다양한 기술이 사용될 수 있다.

[0045] 수치해석 기법은 어떤 현상을 지배하는 법칙과 조건을 수학적으로 모델링하고, 근사해(approximate solution)를 구하기 위해 답을 보간함수(interpolation function)의 조합으로 표현한 뒤 각 기저함수의 크기를 계산한다. 이때, 기본적으로 수학적인 표현을 기저함수(basis function)의 계수를 계산하기 위한 행렬 방정식으로 전환하게 되며, 기저함수의 정의 방식에 따라 수치해석 기법의 종류가 결정된다.

[0046] 예를 들어, 유한요소법은 기저함수의 체계적 정의를 위하여, 대상이 되는 물체, 즉, 모터의 공간상의 영역을 유한 요소(finite element)라 불리는 소영역으로 나누어 수치해석을 수행한다.

[0047] 유한차분법은 미분방정식을 자연현상의 대상이 되는 기하학적 영역 내에서 수치적분(numerical integration)을 취해 행렬방정식을 유도하는데, 기하학적 영역 내에 생성된 유한개의 점들을 격자(grid)라 부르고 격자의 조밀도에 따라 근사해의 정확도가 향상된다.

[0048] 경계요소법은 미분방정식 형태의 수학적 표현식과 그린함수(green function)라 불리는 핵함수(kernel function)의 곱을 대상물체의 전체 영역에 걸쳐 적분을 취한다. 이후, 그린의 정리(green theorem)에 따라 영역 전체에 대한 적분을 물체의 경계에 따른 경계적분(boundary integral) 형식으로 변환하고, 경계 조건(boundary condition)을 적용하는 방식으로 수치해석을 수행한다.

[0049] 파라미터 설정부는 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정할 수 있다. 안정기 파라미터는 시스템에 사용되는 온도센서(20)의 노이즈에 대한 안정성(stability)을 보장하기 위해 필요하다. 즉, 안정기 파라미터인 α 값은 센서의 개수, 위치, 열확산도(thermal diffusivity), 성능에 의해서 결정되는 값인데, 패널티를 주어 측정 오차로 인한 (수식1)의 불안정성을 억제하는 역할을 하기 때문에, 적절한 값을 입력하는 것이 중요하다.

[0050] 행렬 생성부는 민감도 계수 행렬을 생성할 수 있다.

[0051] 행렬 생성부는 모터의 간접 열원을 예측한다. 즉, 행렬 생성부는 (수식2)의 X^{i+1} 과 X_s^{i+1} 을 입력받아 민감도 계수 행렬을 생성할 수 있다. 여기서, X_s^{i+1} 는 간접 열원을 계산하기 위해 사용되며, 계산된 열원과 X^{i+1} 로 전체 온도를 예측한다.

[0052] 예측된 전체 온도가 유일하게 존재하기 위해서는 X_s^{i+1} 의 열과 행의 수가 같거나, 열보다 행의 수가 많아야 하는데, 이는 열원의 수보다 센서의 수가 많아야 함을 의미한다. 일반적으로는 센서의 수보다 공간적으로 분해된

열원의 수가 더 많기 때문에 위의 조건을 보장할 수 있는 방법이 필요하며, 그렇지 못한 경우 수학적으로 ill-posed problem이 되어 유일하지 않은 여러 개의 해가 존재하는 결과를 야기한다

- [0054] 예측부는 열 전달 수치모델, 안정기 파라미터 및 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 열 전달 모델을 이용하여 간접 열원을 예측할 수 있다.
- [0055] 실시예에서, 예측부는 소정의 온도 데이터가 입력되면, 수치모델, 안정기 파라미터 및 민감도 계수 행렬에 기초하여 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다.
- [0056] 유동 연산부(120)는 온도 데이터가 입력되면, 유동 모델을 구축하고, 유동 모델을 이용하여 온도 데이터에 근거한 간접 열원을 예측할 수 있다. 이때, 등가 열원(Equivalent heat source)이 추정될 수 있다.
- [0057] 유동 연산부(120)는 유동을 표현할 비선형 유동 모델을 구축할 수 있다. 즉, 유동 연산부(120)는 3D 유동을 해석하여 데이터를 추출하고 데이터 기반으로 유동 모델을 구축할 수 있다.
- [0058] 유동 연산부(120)는 비선형 시스템 식별(Nonlinear system identification), 비선형 역학의 희소 식별(Sparse identification of nonlinear dynamics, SINDy), 동적 모드 분해(Dynamic mode decomposition with Koopman operator) 및 최소제곱법의 정규 방정식(Normal equation solution of least-squares problem) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 간접 열원을 예측하고 온도를 추정할 수 있다.
- [0059] 모델 프리 방법은 일 예로, 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

표 1

접근방법(approach)	아키텍처	비고
시스템 식별(System identification) 구조 식별(Structural identification(M,D,K))	$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{A}]\mathbf{x} + [\mathbf{B}]\mathbf{u}$ $\mathbf{y} = [\mathbf{C}]\mathbf{x}$	$\mathbf{x}$: state $\mathbf{y}$: output $\mathbf{u}$: input
비선형 역학 시스템의 지배 방정식 발견(Discovering governing equations of nonlinear dynamical systems)	$\dot{\mathbf{x}}^T = \Phi_{\mathbf{x}}[\mathbf{W}]$	
간접적으로 입력 측정(Indirectly measuring the inputs)	$[\mathbf{u}] = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{y}$	

- [0061] 열-유동 연산부(130)는 열 전달 모델과 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축하고, 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다. 즉, 열-유동 연산부(130)는 비선형 열전달 모델을 선형 열전도 모델과 비선형 유동 모델로 분리하고, 분리된 방법(partitioned method)로 커플링 시키는 디지털 트윈 모델을 구축하는 것으로, 유동과 구조의 상호작용(fluid-structure interaction)에 대하여 각각 모델링하고, 그 결과값을 커플링하여 보완된 결과값을 산출할 수 있다.
- [0062] 이를 위해, 열-유동 연산부(130)는 명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(Implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(Surface-2-Surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(Volume-2-Volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(Point-2-Point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.
- [0063] 더욱 바람직하게, 열-유동 연산부(130)는 지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.
- [0065] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법을 설명하기 위한 흐름도이고, 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 커플링 방법을 설명하기 위한 도면이다.
- [0066] 도 2 및 도 3을 참조하여, 모터 코일 온도 추정 장치(100)의 모터 코일 온도 추정 방법을 설명한다.
- [0067] 온도 센서(20)에 의해 측정된 모터(10)의 외부 온도 데이터가 입력되면, 열 연산부(110)과 유동 연산부(120)에서 열 전달 모델 및 유동 모델을 구축한다(S110, S115).
- [0068] 열 전달 모델 구축 단계(S110)는 열 연산부(110)를 통해 열 전달 모델을 구축하여 간접 열원을 예측한다. 구체적으로, 열 전달 모델 구축 단계(S110)는 수치모델 구축단계, 안정기 파라미터 설정 단계, 열원 예측을 위한 민감도 계수 행렬(Sensitivity coefficient matrix) 생성단계, 및 온도 데이터 입력에 의한 전체 온도 예측단계를

수행한다.

- [0069] 실시예에서, 수치모델 구축 단계는 수치모델 구축부를 통해 유한요소법(Finite Element Method)를 사용하여 모터의 구동 현상을 지배하는 법칙과 조건을 수학적으로 모델링한다. 이때, 근사해(approximate solution)를 구하기 위해 답을 보간함수(interpolation function)의 조합으로 표현한 뒤 각 기저함수의 크기를 계산할 수 있다. 또한, 기본적으로 수학적인 표현을 기저함수(basis function)의 계수를 계산하기 위한 행렬 방정식으로 전환하게 되며, 기저함수의 체계적 정의를 위하여, 모터의 공간상의 영역을 유한 요소(finite element)라 불리는 소영역으로 나누어 수치해석을 수행한다.
- [0070] 안정기 파라미터 설정 단계는 온도 데이터의 노이즈를 조절하는 안정기 파라미터를 설정한다. 상술한 (수식1)에서 α 는 안정기의 성능을 결정하는 변수이다.
- [0071] α 값을 설정하는 방법은, ① 모터의 구동 시간에 따른 온도정보를 수집하는 단계, ② 수집한 온도를 후처리로 필터링(filtering)하여 노이즈가 제거된 필터링 데이터로 변환하는 단계, ③ α 값을 변화시키면서 필터링 데이터와 최소제곱오차(Least Square Error)가 최소가 되는 값을 결정하는 단계로 이루어진다.
- [0072] α 값은 온도 센서의 성능에 의하여 결정되므로 일정 주기의 온도 데이터(정보)를 수집하고, 노이즈의 증가량을 관측한다. 이때, 노이즈의 증가량은 교차검증(Generalized Cross Validation) 등의 기법을 활용하여 관측될 수 있고, 노이즈의 증가량에 따라 상술한 방법으로 α 값의 교정을 수행할 수 있다.
- [0073] 안정기의 자동 교정 방법은 ① 최초 테스트 구동시의 온도 데이터에 기초하여 최초 안정기 파라미터를 설정하는 단계, ② 열처리가 수행되는 동안 메모리에 저장된 온도 데이터에 기초하여 소정 주기로 안정기 파라미터의 교정값을 연산하는 단계, ③ 교정값을 안정기 파라미터로 설정하는 단계로 이루어질 수 있다.
- [0074] 민감도 계수 행렬 생성 단계는 행렬 생성부를 통해 모터가 받은 간접 열원을 예측한다.
- [0075] 온도 데이터 입력에 의한 전체 온도 예측단계는 예측부를 통해 열 전달 수치모델, 안정기 파라미터 및 민감도 계수 행렬에 기초하여 구축된 열 전달 모델을 이용하여 간접 열원을 예측할 수 있다. 즉, 소정의 온도 데이터가 입력되면, 구축된 열 전달 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정할 수 있다.
- [0076] 한편, 유동 모델 구축 단계(S115)는 유동 연산부(120)를 통해 유동 모델을 구축하여 간접 열원을 예측한다. 이때, 유동을 표현할 비선형 유동 모델을 구축한다. 즉, 3D 유동을 해석하여 데이터를 추출하고 데이터 기반으로 유동 모델을 구축할 수 있다.
- [0077] 실시예에서, 유동 연산부(120)는 모델 프리(free) 방법을 이용함으로써, DNN과 같은 인공지능망을 사용하지 않고 데이터 기반 모델링(Data-driven modeling)과 같은 그레이 박스(Gray box)를 적용하여 모델링할 수 있다. 이때, 등가 열원(Equivalent heat source)이 예측될 수 있다.
- [0078] 이후, 열-유동 모델을 커플링하는 단계(S130)는 열-유동 연산부(130)를 통해 열 전달 모델과 유동 모델의 결과값을 커플링하여 디지털 트윈 모델을 구축한다. 즉, 열-유동 연산부(130)를 통해 비선형 열전달 모델을 선형 열전도 모델과 비선형 유동 모델로 분리하고, 분리된 방법(partitioned method)으로 커플링 시키는 디지털 트윈 모델을 구축하는 것으로, 유동과 구조의 상호작용(fluid-structure interaction)에 대하여 각각 모델링하고, 그 결과값을 커플링하여 보완된 결과값을 산출할 수 있다.
- [0079] 도 4를 참조하여, 커플링하는 방법에 대하여 설명한다.
- [0080] 실시예에서는, 유동(Fluid, X program)과 구조(Structure, Y program)의 상호작용(fluid-structure interaction)에 대하여 각각 모델링하고 지그재그형 알고리즘(Staggered algorithm)을 이용하여 커플링한다. 여기서, 지그재그형 알고리즘은 예측-보정 알고리즘(prediction-correction algorithm)이라고도 할 수 있다.
- [0081] 시간 t_n 시점에서 Y program을 계산한 y_{n+1}^p 가 예측값(predictor)으로 계산이 되고, X program에서 예측값과 함께 $x_{(n+1)}$ 을 계산한 뒤, 다시 $y_{(n+1)}$ 을 계산해서 보정(correction)해 준다. 본 발명은 순차적으로 시간방향으로 풀어나가기 때문에 명시적 커플링 방법(explicit coupling method)이라고도 할 수 있다.
- [0082] 한편 암시적 커플링 방법(Implicit coupling method)에는 모놀리식 알고리즘(monolithic algorithm)이 있고,

이 방법은 특정 시점에서 반복 계산 과정을 통해 수렴을 시킨 뒤, 다음 시점으로 넘어간다. 그러나, 모놀리식 알고리즘은 계산 비용이 매우 크고 비효율적이다. 이에, 지그재그형 알고리즘을 이용하는 것이 바람직하다.

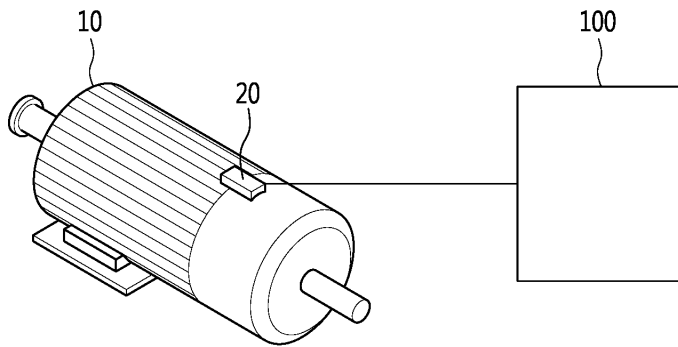
- [0083] MpCCI 또는 preCICE 등의 프로그램이 지그재그형 알고리즘 또는 모놀리식 알고리즘의 인터페이스를 제공한다.
- [0084] 그리고, 소정의 온도 데이터가 입력되면, 역 접근법 기반의 디지털 트윈 모델을 이용하여 모터 코일의 온도를 추정한다(S140).
- [0085] 한편, 열-유동 연산부(130)는 명시적 커플링 방법(explicit coupling method), 암시적 커플링 방법(implicit coupling method), 표면 대 표면 인터페이스 커플링 방법(surface-2-surface interface coupling), 볼륨 대 볼륨 커플링 방법(volume-2-volume coupling) 및 포인트 대 포인트 커플링 방법(point-2-point coupling) 중 어느 하나의 방법을 이용하여 온도를 추정할 수 있다.
- [0086] 본 발명에 따른 모터 코일 온도 추정 방법 및 장치에 의하면, 디지털 트윈 기술을 활용하여 점 측정된 온도 데이터를 가공하여 온도 추정이 가능해지므로, 모터 내부에 온도 센서를 삽입하지 않아 제작 비용 절감 효과를 기대할 수 있다.
- [0087] 한편, 본 발명에 따른 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법은 컴퓨터 시스템 상에서 구현될 수 있고, 하나 이상의 컴퓨터로 구성된 시스템은 소프트웨어, 펌웨어, 하드웨어 또는 이들의 조합을 작동 중 시스템이 작업들을 수행하도록 하는 시스템에 설치함으로써 위에서 설명한 방법의 각 단계를 수행하도록 구성될 수 있다. 하나 이상의 컴퓨터 프로그램은 데이터 처리 장치에 의해 실행될 때 장치로 하여금 동작들을 수행하게 하는 명령어들을 포함함으로써 특정 동작들 또는 작업들을 수행하도록 구성될 수 있다.
- [0088] 한편, 상술한 디지털 트윈 기반의 모터 코일 온도 추정 방법은 다양한 컴퓨터 수단을 통하여 수행될 수 있는 프로그램 명령 형태로 구현되어 컴퓨터 판독 가능 매체에 기록될 수 있다. 컴퓨터 판독 가능 기록 매체는 프로그램 명령, 데이터 파일, 데이터 구조 등을 단독으로 또는 조합하여 포함할 수 있다. 상기 매체에 기록되는 프로그램 명령은 본 발명을 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 본 발명의 동작을 수행하기 위해 하나 이상의 소프트웨어 모듈로서 작동하도록 구성될 수 있으며, 그 역도 마찬가지이다.
- [0089] 지금까지 본 발명에 대하여 도면에 도시된 바람직한 실시예들을 중심으로 상세히 살펴보았다. 이러한 실시예들은 이 발명을 한정하려는 것이 아니라 예시적인 것에 불과하며, 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 한다. 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 전술한 설명이 아니라 첨부된 특허청구범위의 기술적 사상에 의해서 정해져야 할 것이다. 비록 본 명세서에 특정한 용어들이 사용되었으나 이는 단지 본 발명의 개념을 설명하기 위한 목적에서 사용된 것이지 의미한정이나 특허청구범위에 기재된 본 발명의 범위를 제한하기 위하여 사용된 것은 아니다. 본 발명의 각 단계는 반드시 기재된 순서대로 수행되어야 할 필요는 없고, 병렬적, 선택적 또는 개별적으로 수행될 수 있다. 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자는 특허청구범위에서 청구하는 본 발명의 본질적인 기술사상에서 벗어나지 않는 범위에서 다양한 변형 형태 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 균등물은 현재 공지된 균등물뿐만 아니라 장래에 개발될 균등물 즉 구조와 무관하게 동일한 기능을 수행하도록 발명된 모든 구성요소를 포함하는 것으로 이해되어야 한다.

부호의 설명

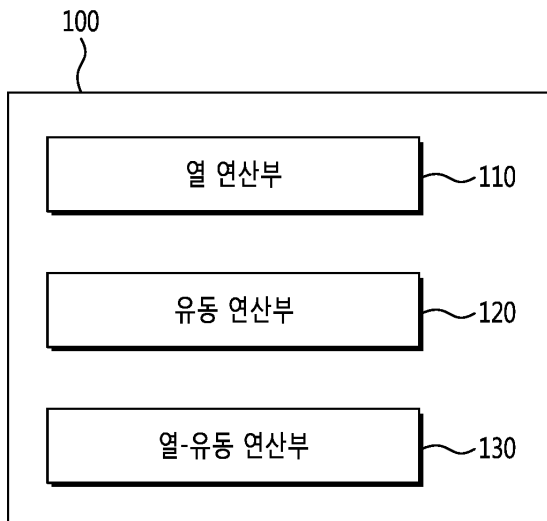
- [0090] 100: 모터 코일 온도 추정 장치
- 110: 열 연산부
- 120: 유동 연산부
- 130: 열-유동 연산부

도면

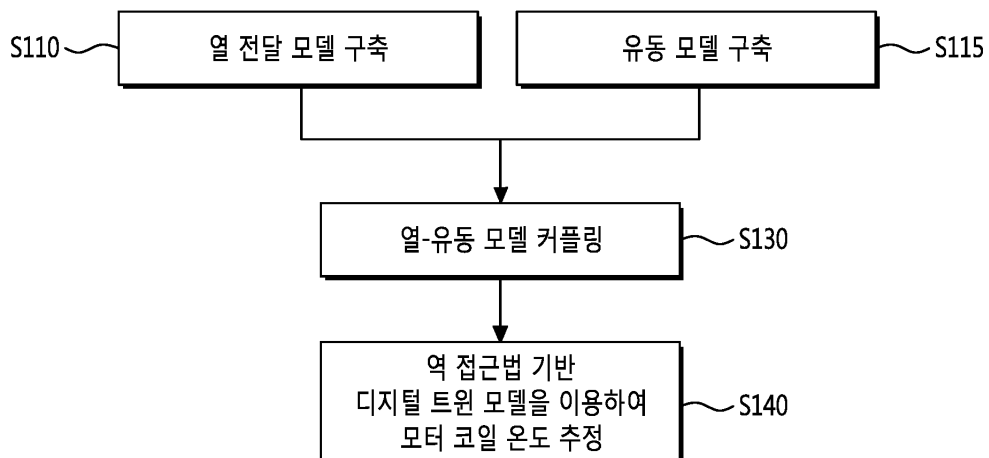
도면1



도면2



도면3



도면4

