(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0074247
(43) 공개일자 2025년05월27일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/367 (2019.01) *G01R 31/36* (2019.01)
G01R 31/396 (2019.01) *G08B 21/18* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 31/367 (2019.01)
G01R 31/3648 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0161101
(22) 출원일자 2023년11월20일
심사청구일자 2023년11월20일

(71) 출원인
울산대학교 산학협력단
울산광역시 남구 대학로 93(무거동)
(72) 발명자
안경관
울산광역시 남구 대공원로 207, 102동 402호 (신정동, 대공원 월드메르디앙)
찐 호아이 안
울산광역시 남구 대학로 93, 울산대학교 (무거동)
(74) 대리인
특허법인태백

전체 청구항 수 : 총 6 항

(54) 발명의 명칭 **디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템 및 방법**

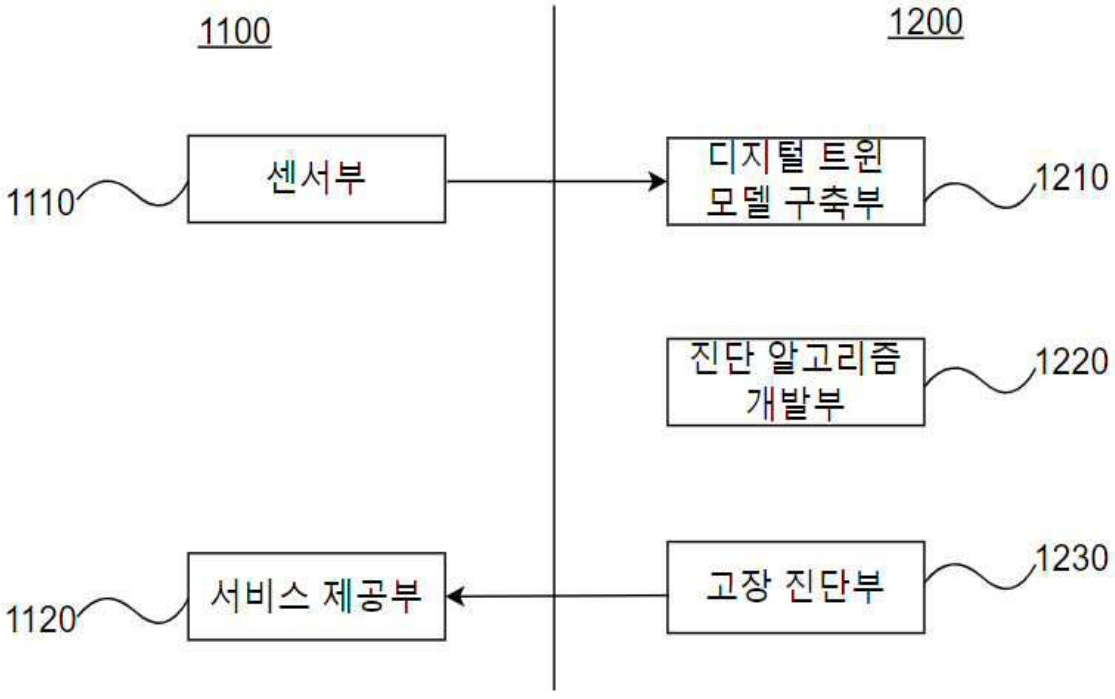
(57) 요 약

본 발명은, 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템 및 방법에 관한 것이다.

본 발명에 따르면, 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템은 IoT 센서를 사용하여 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하는 센서부; 상기 센서부에서 수집된 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 디지털 트윈

(뒷면에 계속)

대 표 도 - 도2



모델을 구축하는 디지털 트윈 모델 구축부; 상기 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 고장 진단 알고리즘을 설계하는 진단 알고리즘 개발부; 및 상기 진단 알고리즘을 실제 물리적 배터리 시스템에 적용하여 예측 결과를 산출하는 고장 진단부를 포함한다.

이와 같이 본 발명에 따르면, 물리적 모델의 온라인 측정값으로 디지털 트윈 모델을 업데이트할 수 있으며, 이는 변화하는 작동 조건과 셀 간 차이를 고려하여 예측 성능을 향상시킬 수 있고, 배터리 시스템의 안전한 작동 상태를 유지하는데 도움을 줄 수 있다.

(52) CPC특허분류
G01R 31/396 (2019.01)
G08B 21/185 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1345341781
과제번호	2021RIS-003
부처명	교육부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	지자체-대학협력기반지역혁신사업
연구과제명	Iot 기술기반 건설기계 안전시스템 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	울산대학교
연구기간	2023.05.01 ~ 2023.12.28

명 세 서

청구범위

청구항 1

IoT 센서를 사용하여 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하는 센서부;

상기 센서부에서 수집된 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 디지털 트윈 모델 구축부;

상기 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 고장 진단 알고리즘을 설계하는 진단 알고리즘 개발부; 및

상기 진단 알고리즘을 실제 물리적 배터리 시스템에 적용하여 예측 결과를 산출하는 고장 진단부를 포함하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 진단 결과를 사용자 및 제작업체 중 적어도 하나에 제공하고, 진단 결과가 비정상 상태일 경우, 진단 결과에 따른 경보를 출력하는 서비스 제공부를 더 포함하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 디지털 트윈 모델 구축부는

상기 디지털 트윈 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 수소 발전 시스템과 동일한지 검증하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템.

청구항 4

물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하는 단계;

상기 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계;

상기 디지털 트윈 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 배터리 시스템과 동일한지 검증하는 단계;

상기 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 고장 진단 알고리즘을 설계하는 단계; 및

상기 고장 진단 알고리즘을 통해 고장을 진단하는 단계를 포함하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법.

청구항 5

제 4 항에 있어서,

상기 고장을 진단한 결과를 사용자 및 제작업체 중 적어도 하나에 제공하는 단계를 더 포함하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 고장을 진단한 결과를 사용자 및 제작업체 중 적어도 하나에 제공하는 단계는,

상기 진단 결과가 비정상 상태일 경우, 진단 결과에 따른 경보를 출력하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템 및 방법에 관한 것으로, 더욱 상세하게는 물리적 모델의 온라인 측정값으로 디지털 트윈 모델을 업데이트하여 배터리 시스템의 무결성과 신뢰성을 보장하기 위한 적절한 조치를 수행할 수 있도록 상태를 모니터링하고 진단하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템 및 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 배터리는 전기차부터 스마트폰까지 다양한 애플리케이션에 널리 사용되는 중요한 에너지 저장장치다.

[0003] 리튬 이온, 니켈 금속 수소화물, 납산, 나트륨 황은 전기 자동차에 일반적으로 사용되는 배터리의 일종으로, 그 중 리튬이온 배터리 기술은 지난 10년동안 전 세계 자동차 산업의 급속한 발전에 중요한 역할을 하고 있다.

[0004] 그러나 리튬 이온 배터리는 열적 불안정성과 복잡한 작동 조건으로 인해 극한 조건에서 화재 및 폭발 가능성이 높고, 동시에 배터리의 품질, 용량 및 에너지 밀도가 향상되면 사고 가능성과 위험이 크게 높아진다.

[0005] 특히 대규모 에너지 저장 애플리케이션에서 배터리 화재는 헤아릴 수 없는 손실을 가져올 수 있다.

[0006] 때문에 차량 배터리의 관리와 고장 진단은 차량 배터리 산업의 중요한 과제이다.

[0007] 종래에도 차량 배터리 고장 진단 시스템은 연구되고 있지만, 오류나 결함 발생을 즉각적으로 감지하여 대처할 수 있도록 구성되는 결함 진단 시스템은 아직 제시되지 못하고 있는 실정이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

[0008] 본 발명에 따르면, 물리적 모델의 온라인 측정값으로 디지털 트윈 모델을 업데이트하여 배터리 시스템의 무결성과 신뢰성을 보장하기 위한 적절한 조치를 수행할 수 있도록 상태를 모니터링하고 진단하는 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템을 제공하기 위한 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 이러한 기술적 과제를 이루기 위한 본 발명의 일 실시예에 따르면 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템은 IoT 센서를 사용하여 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하는 센서부; 상기 센서부에서 수집된 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 디지털 트윈 모델 구축부; 상기 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 고장 진단 알고리즘을 설계하는 진단 알고리즘 개발부; 및 상기 진단 알고리즘을 실제 물리적 배터리 시스템에 적용하여 예측 결과를 산출하는 고장 진단부를 포함한다.

[0010] 본 발명의 다른 실시예에 따르면, 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법은 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하는 단계; 상기 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 디지털 트윈 모델을 구축하는 단계; 상기 디지털 트윈 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 배터리 시스템과 동일한지 검증하는 단계; 상기 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 고장 진단 알고리즘을 설계하는 단계; 및 상기 고장 진단 알고리즘을 통해 고장을 진단하는 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0011] 이와 같이 본 발명에 따르면, 물리적 모델의 온라인 측정값으로 디지털 트윈 모델을 업데이트할 수 있으며, 이는 변화하는 작동 조건과 셀 간 차이를 고려하여 예측 성능을 향상시킬 수 있고, 배터리 시스템의 안전한 작동 상태를 유지하는데 도움을 줄 수 있다.

도면의 간단한 설명

[0012] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템을 설명하기 위한 도면이다.

도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템의 구성도이다.

도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법의 흐름을 도시한 도면이다.

도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 고장 진단 알고리즘을 설명하기 위한 도면이다.

도 5는 장단기 기억 구조를 설명하기 위한 도면이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0013] 이하 첨부된 도면을 참조하여 본 발명에 따른 바람직한 실시예를 상세히 설명하기로 한다. 이 과정에서 도면에 도시된 선들의 두께나 구성요소의 크기 등은 설명의 명료성과 편의상 과장되게 도시되어 있을 수 있다.

[0014] 또한 후술되는 용어들은 본 발명에서의 기능을 고려하여 정의된 용어들로서, 이는 사용자, 운용자의 의도 또는 관례에 따라 달라질 수 있다. 그러므로 이러한 용어들에 대한 정의는 본 명세서 전반에 걸친 내용을 토대로 내려져야 할 것이다.

[0015] 도 1은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템을 설명하기 위한 도면이고, 도 2는 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템의 구성도이다.

[0016] 도 1 및 도 2에 도시된 바와 같이, 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템(1000)은 물리적 공간(1100) 및 가상 공간(1200)이 연동하여 동작한다.

[0017] 또한, 물리적 공간(1100)은 센서부(1110) 및 서비스 제공부(1120)를 포함하고, 가상 공간(1200)은 디지털 트윈 모델 구축부(1210), 진단 알고리즘 개발부(1220) 및 고장 진단부(1230)를 포함한다.

[0018] 센서부(1110)는 IoT 센서를 사용하여 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하고, 가상 공간(1200)으로 전송한다.

[0019] 좀 더 상세하게는, 센서부(1110)는 물리적 배터리 시스템에 설치된 IoT센서를 이용하여 충방전 과정에서의 셀의 전압, 배터리 팩의 전류, 온도를 포함한 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 획득한다.

[0020] 서비스 제공부(1120)는 가상 공간(1200)에서 진단된 진단 결과를 사용자 또는 제조업체에게 제공한다.

[0021] 또한, 서비스 제공부(1120)는 가상 공간(1200)에서 진단된 진단 결과가 비정상 상태일 경우, 진단 결과에 따른 경보를 출력할 수 있다.

[0022] 예를 들어, 1단계 경고는 비교적 안전한 상태이지만, 잠재적인 장애를 피하기 위해서는 적시에 개입하는 것이 필요한 상태일 때 출력하고, 2단계 경고는 해당 배터리가 위험 상태에 있으며, 정밀하고 주의 깊은 점검을 위해 차량/응용 시스템을 정지해야 하는 상태에서 출력하며, 3단계 경고가 발령되면 사용자는 차량을 멈추고 즉시 차량에서 탈출해야 하는 상황에서 출력한다.

[0023] 이 때, 1단계 및 2단계 경고는 잠재적인 고장 위험을 평가하는 데 사용되며, 3단계 경고는 열폭주 발생에 대한 조기 경보로 사용된다.

[0024] 디지털 트윈 모델 구축부(1210)는 물리적 공간(1100)에서 전송된 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 물리적 배터리 시스템과 동일한 구성의 디지털 트윈 모델을 구축한다.

[0025] 이 때, 디지털 트윈 모델은 가상 동적 배터리 모델 및 업데이트된 배터리 모델을 포함하여 구축된다.

[0026] 또한, 디지털 트윈 모델 구축부(1210)는 디지털 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 배터리 시스템과 동일한지 검증한다.

[0027] 또한, 초기 디지털 모델은 물리적 모델과 동일한 초기 매개변수를 사용하여 생성되며, 실제 애플리케이션이 작동하는 동안 물리적 공간에서 획득한 신호를 기반으로 업데이트된다.

[0028] 이 때, 디지털 트윈 배터리 모델은 하기의 수학식 1과 같이 계산된다.

수학식 1

[0029] $$E=f(It,I^{*},I)=E_0-K\frac{Q}{Q-\int_0^t Idt}I^{*}-K\frac{Q}{Q-\int_0^t Idt}\int_0^t Idt+Aexp\left(-B\int_0^t Idt\right)$$

[0030] $$V=E-R_{int}I$$

[0031] $$T(t)=L^{-1}\left(\frac{P_{loss}R_{th}+T_a}{I+st_c}\right)$$

[0032] 이 때, E는 방전 모드의 비선형 전압(V)이고, E_0는 배터리 정전압(V)이고, Q는 최대 배터리 용량(Ah)이고, I는 배터리 출력 전류(A)이고, I^{*}는 저주파 전류 역학(low-frequency current dynamics, A)이고, K는 분극 상수(V/Ah)이고, A는 지수 전압(V)이며, B는 지수 용량(Ah-1)이다.

[0033] 또한, V는 배터리 모델의 출력 전압(V)이고, R_{int}는 배터리 내부 저항(W)이고, R_{th}는 셀에서 주변 환경까지의 열 저항(℃/W)이고, t_c는 셀에서 주변 환경까지의 열 시간 상수(s)이고, P_{loss}는 충전 또는 방전 과정 중에 생성된 전체 열(W)이며, T_a는 주변온도(^{0}K)이다.

[0034] 이 때, 디지털 트윈 모델의 입력 신호인 물리적 공간의 획득 데이터는 하기의 수학식 2와 같다.

수학식 2

[0035] $$X_{mea}(k)=\begin{pmatrix} V_1(1) & \cdots & V_n(1) & I_1(1) & T_1(1) \\ \vdots & V_c(t) & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_1(k) & \cdots & V_n(k) & I_j(k) & T_j(k) \end{pmatrix}$$

[0036] 이 때, k는 시간 간격(s)이고, n은 배터리의 셀 수이고, $V_c(t)$는 시간 k에서의 배터리 셀 c의 전압(t=1, 2,…,k;c=1,2,…,n)이며, $I_j(k)$ 및 $T_j(k)$는 시간 k에서의 배터리 팩 j의 전류 및 온도이다.

[0037] 또한, 디지털 트윈 배터리 모델의 출력 매개변수는 하기의 수학식 3을 통해 계산된다.

수학식 3

[0038] $$\hat{X}_{vir}(k)=\hat{X}_{vir}(k-1)+G(k)(X_{mea}(k)-\hat{X}_{mea}(k))$$

[0039] 이 때, $\hat{X}_{vir}(k)$는 는 시간 k에서의 디지털 트윈 배터리 모델의 추정된 출력 매개변수이고, $\hat{X}_{mea}(k)$

는 시간 k에서의 관측을 기반으로 한 $\hat{X}_{mea}(k)$ 의 예측이다.

[0040] 또한, 게인 값인 G(k)는 예측 오차인 M-V가 매개변수 추정 업데이트에 얼마나 영향을 미치는지를 결정하며, 추정 알고리즘은 예측 오차 항인 $X_{mea}(k)-\hat{X}_{mea}(k)$ 를 최소화한다.

[0041] 이 때, 게인 값은 하기의 수학식 4와 같이 계산된다.

수학식 4

[0042] $$G(k)=Q(k)\psi(k)$$

[0043] 이 때, Q(k)는 칼만 필터 접근법의 추정 도구에서 선택할 수 있는 재귀행렬이고, $\Psi(k)$ 는 예측된 모델 $\hat{X}_{mea}(k)$ 의 출력 매개변수 $\hat{X}_{vir}(k)$ 에 대한 기울기이다.

[0044] 기울기 매개변수 $\Psi(k)$ 는 이전에 측정된 입력 및 출력 값의 이전 값들을 기반으로 하기의 수학식 5와 같이 선형 회귀 형태로 계산된다.

수학식 5

[0045] $$X_{mea}(k)=\psi^{T}(k)X_{0,mea}(k)+e(k)$$

[0046] 이 때, $X_{0,mea}(k)$ 시간 k에서의 초기 매개변수를 나타내고, e(k)는 백색 소음으로 가정되는 노이즈 소스이며, $\Psi(k)$ 의 구체적인 형태는 다항식 모델의 구조에 따라 달라진다.

[0047] 이 때, 선형 회귀 방정식의 경우, 예측 출력은 하기의 수학식 6과 같이 계산된다.

수학식 6

[0048] $$\hat{X}_{mea}(k)=\psi^{T}(k)\hat{X}_{vir}(k-1)$$

[0049] 물리적 배터리 모델의 초기 설정 매개변수가 변경되면, 업데이트된 배터리 모델을 사용하여 변경된 매개변수를 반영하여 디지털 트윈 모델을 업데이트한다.

[0050] 이 때, 업데이트된 데이터는 하기의 수학식 7을 통해 제공된다.

수학식 7

$$E_{update} = E_{0_update} - K_{update}\frac{Q_{update}}{Q_{update} - \int_0^t Idt} I^* - K_{update}\frac{Q_{update}}{Q_{update} - \int_0^t Idt}\int_0^t Idt + A_{update}\exp\left(-B_{update}\int_0^t Idt\right)$$

$$V_{update} = E_{update} - R_{int_update} I$$

$$T_{update} = L^{-1}\left(\frac{P_{loss}R_{th} + T_a}{1 + st_{c_update}}\right)$$

[0051]

[0052] 이 때, 배터리 시스템의 업데이트 매개변수는 하기의 수학식 8과 같다.

수학식 8

$$X_{update}(k) = \begin{pmatrix} V_{1,update}(1) & \cdots & V_{n,update}(1) & I_{1,update}(1) & T_{1,update}(1) \\ \vdots & V_{c,update}(t) & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{1,update}(k) & \cdots & V_{n,update}(k) & I_{j,update}(k) & T_{j,update}(k) \end{pmatrix}$$

[0053]

[0054] 이 때, k는 시간 간격(s)이고, n은 배터리의 셀 수이고, $V_{c,update}(t)$는 시간 k에서의 배터리 셀 c의 업데이트된 전압(t=1,2,…,k;c=1,2,…,n)이며, $I_{j,update}(t)$ 및 $T_{j,update}(t)$는 시간 k에서의 업데이트된 배터리 팩 j의 전류 및 온도이다.

[0055] 업데이트된 매개변수를 기반으로 디지털 트윈 배터리 모델의 출력 매개변수는 하기의 수학식 9와 같이 계산된다.

수학식 9

$$\hat{X}_{vir}(k) = \hat{X}_{vir}(k-1) + G(k)(X_{update}(k) - \hat{X}_{update}(k))$$

[0056]

[0057] 이 때, $\hat{X}_{update}(k)$는 시간 k에서의 관측을 기반으로 하는 $\hat{X}_{update}(k)$의 예측이다.

[0058] 업데이트 과정이 진행된 후, 디지털 트윈 모델의 출력 매개변수는 하기의 수학식 10과 같다.

수학식 10

$$\hat{X}_{DT}(k) = \hat{X}_{vir}(k)$$

[0059]

[0060] 진단 알고리즘 개발부(1220)는 디지털 트윈 모델의 출력 신호와 물리적 모델의 출력 신호를 비교하여 발생할 수 있는 장애를 감지하고 잠재적인 장애를 진단하는 알고리즘을 설계한다.

[0061] 고장 진단부(1230)는 진단 알고리즘을 물리적 배터리 시스템에 적용하여 예측 결과를 산출한다.

[0062] 또한, 고장 진단부(1230)는 진단 결과를 물리적 공간(1100)의 서비스 제공부(1120) 또는 시스템이 종료될 때까지 진단을 반복적으로 수행한다.

[0063] 이하, 도 3을 참조하여 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법에 대해 구체적으로 설명한다.

[0064] 도 3은 본 발명의 일 실시예에 따른 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 방법의 흐름을 도시한 도면이다.

[0065] 도 3에 도시된 바와 같이, 먼저, 물리적 공간(1100)에서 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집하고, 가상 공간으로 전송한다(S310).

[0066] 좀 더 상세하게는, 물리적 배터리 시스템에 설치된 IoT센서를 이용하여 충방전 과정에서의 셀의 전압, 배터리 팩의 전류, 온도를 포함한 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 획득한다.

[0067] 다음으로, 전송된 물리적 배터리 시스템의 출력신호를 이용하여 물리적 배터리 시스템과 동일한 구성의 디지털 트윈 모델을 구축한다(S320).

[0068] 이 때, 디지털 트윈 모델은 가상 동적 배터리 모델 및 업데이트된 배터리 모델을 포함하여 구축된다.

[0069] 또한, 초기 디지털 트윈 모델은 물리적 배터리 시스템과 동일한 초기 매개변수를 사용하여 생성되며, 실제 물리적 배터리 시스템의 운영 중 물리적 공간에서 획득한 신호를 기반으로 업데이트된다.

[0070] 다음으로, 디지털 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 배터리 시스템과 동일한지 검증한다(S330).

[0071] 디지털 트윈 모델이 검증되면, 물리적 배터리 시스템에서 측정된 신호의 모든 정보에 대해 고장 진단 알고리즘을 설계한다(S340).

[0072] 도 4는 본 발명의 일 실시예에 따른 고장 진단 알고리즘을 설명하기 위한 도면이고, 도 5는 장단기 기억 구조를 설명하기 위한 도면이다.

[0073] 도 4에 도시된 바와 같이, 고장 진단 알고리즘은 두 가지 레이어로 구성된다.

[0074] 첫 번째 레이어는 심각한 고장을 감지하는 레이어로, 첫 번째 레이어의 알고리즘은 모든 시점에서 적용되며, 여기서 배터리 전압(ΔV), 전류(ΔI) 및 온도(ΔT)가 미리 정의된 한계값($\Delta V_{threshold}, \Delta I_{threshold}, \Delta T_{threshold}$)과 비교된다.

[0075] 좀 더 상세하게는, 현재 시점 t에서 물리적으로 측정된 배터리 시스템의 전압, 전류, 온도를 디지털 트윈 모델의 출력값 및 임계값과 비교한다.

[0076] 이 때, 임계값은 배터리 시스템의 기술적 특성과 데이터를 기반으로 결정되며, 물리적 공간에서 측정된 신호와 가상 신호의 미분 값은 하기의 수학식 11에 의해 정의된다.

수학식 11

[0077]
$$\Delta V = V_{mea}(k) - V_{vir}(k)$$

$$\Delta I = I_{mea}(k) - I_{vir}(k)$$

$$\Delta T = T_{mea}(k) - T_{vir}(k)$$

[0078] 이 때, $\Delta V, \Delta I, \Delta T$는 각각 배터리 전압, 전류, 온도의 미분 값이다.

[0079] 또한, $V_{mea}(k), I_{mea}(k), T_{mea}(k)$는 각각 시간 k에서 물리적 공간의 전압, 전류 및 온도를 측정한 값이고, $V_{vir}(k), I_{vir}(k), T_{vir}(k)$는 각각 시간 k에서의 가상 공간의 전압, 전류, 온도를 측정한 값이다.

[0080] 측정된 신호와 가상 신호 간의 차이 값이 미리 정의된 차동 임계값보다 높을 경우 배터리 오류는 과전압(Over-voltage), 과전류(Over-current) 또는 과열(Over-heat)로 진단된다.

[0081] 이 때, 열 가변 저항기는 과충전 및 과방전 시나리오 중에 온도뿐만 아니라 변화율도 염두에 두기 때문에 온도와 변화율을 모두 측정하고, 판단기준으로 최대온도와 변화율을 기록하며, 작업 온도를 제어한다.

[0082] 또한, 최고 온도보다 평균 온도가 더 높은 온도일 경우, 센서 테스트 결과 중 적어도 하나의 온도가 최대 온도보다 높은 온도일 경우, 평균 온도 변화율이 최대 변화율이 큰 경우, 센서 테스트 결과 중 하나의 변화율이 최대 변화율보다 높을 경우 중 적어도 하나의 기준이 충족되면 과열 상태로 진단된다.

[0083] 첫 번째 레이어에서 고장이 발생한 것을 감지하면 배터리 진단 시스템은 사용자에게 가능한 빨리 응용 프로그램의 작동을 중지하도록 경고 신호를 보낸다.

[0084] 첫 번째 레이어에서 고장이 감지되지 않으면, 배터리 진단 시스템은 두 번째 레이어의 과정을 수행한다.

[0085] 두 번째 레이어는 심각한 고장은 아직 발생하지 않았지만 디지털 트윈 모델의 데이터를 기반으로 배터리 시스템의 일부 잠재적인 고장을 진단하여 비정상 상태를 경고한다.

[0086] 좀 더 상세하게는, 고장 진단을 달성하기 위해 배터리 데이터를 사용하여 LSTM 모델을 훈련하고 각각의 전압 임계값에 따라 다양한 고장 수준을 설정한다.

[0087] 오류가 발생하면 동일한 출력 시스템 성능, 즉 비정상적인 신호가 발생하는데, 오류 유형을 정확하게 결정하기 위해 오류 격리가 구현된다.

[0088] 이 때, 도 5에 도시된 바와 같이, 고장 진단 전략을 구현하기 위해 LSTM(Long Short-Term Memory) 알고리즘을 사용하여 다양한 조건에 대한 용량 저하 경향의 장기 종속성(정보를 장기간 기억)을 학습하여 배터리 시스템의 잠재적인 이상을 진단한다.

[0089] LSTM은 망각 게이트(f(k)), 입력 게이트(i(k)) 및 출력 게이트(o(k))로 구성된다.

[0090] LSTM 모델에서 입력 신호는 배터리 매개변수 $(X_{DT}(k))$, 이전 블록의 메모리(C(k-1)) 및 이전 숨겨진 레이어(h(k-1))의 출력을 포함한다.

[0091] 다음으로, 출력 신호는 현재 셀 상태(C(k))의 메모리와 현재 숨겨진 레이어(h(k))의 출력으로 구성되고, 각 단계에서 현재 입력 신호 $(X_{DT}(k))$ 및 이전 숨겨진 레이어(h(k-1))의 출력은 해당 가중치(i.e. 망각 게이트 가중치(wf), 입력 게이트 가중치(wi), 입력 노드 가중치(wc), 출력 게이트 가중치(wo)), 편향(b), 상태 활성화 함수(tanh) 및 게이트 활성화 함수(σ)와 함께 사용되어 출력을 계산한다.

[0092] 이때, 망각 게이트는 내부 반복을 제어하고, 이전 출력(C(k-1))에서 폐기, 업데이트 및 저장될 정보를 결정하며, 하기의 수학식 12와 같이 계산된다.

수학식 12

[0093] $$f(k)=\sigma\left(w_f.\left[h(k-1), X_{DT}(k)\right]+b_f\right)$$

[0094] 입력 게이트는 하기의 수학식 13을 통해 계산되며, 셀 상태에서 전달되는 정보를 저장한다.

수학식 13

$$i(k)=\sigma\left(w_i.\left[h(k-1),X_{DT}(k)\right]+b_i\right)$$

$$\tilde{C}(k)=\tanh\left(w_c.\left[h(k-1),X_{DT}(k)\right]+b_C\right)$$

[0095]

[0096] 또한, 입력 게이트는 업데이트할 정보를 조절하는 시그모이드 활성화 함수(σ)와 셀 상태에 추가되는 새로운 벡터($\widetilde{C}(k)$)를 생성하는 하이퍼 탄젠트 활성화 함수(tanh)를 포함한다.

[0097] 다음으로, 새로운 셀 상태 값(C(k))는 하기의 수학식 14를 통해 계산된다.

수학식 14

$$C(k)=f(k)C(k-1)+i(k)\tilde{C}(k)$$

[0098]

[0099] 출력 게이트는 하기의 수학식 15를 통해 계산되며, 시그모이드 활성화 함수를 사용하여 출력 정보를 결정한다.

수학식 15

$$o(k)=\sigma\left(w_o.\left[h(k-1),X_{DT}(k)\right]+b_o\right)$$

[0100]

[0101] 이 때, 숨겨진 상태 h_k 는 하기의 수학식 16과 같이 셀 상태 c_k 를 활성화 tanh에 전달하고 출력 게이트의 출력과 곱하여 최종적으로 계산할 수 있다.

수학식 16

$$h(k)=o(k)\tanh\left(C(k)\right)$$

[0102]

[0103] 또한, 출력 게이트의 값은 하기의 수학식 17을 통해 계산된다.

수학식 17

$$h(k)=\begin{pmatrix} V_{1,LSTM}(1) & \cdots & V_{n,LSTM}(1) & I_{1,LSTM}(1) & T_{1,LSTM}(1) \\ \vdots & V_{c,LSTM}(t) & \vdots & \vdots & \vdots \\ V_{1,LSTM}(k) & \cdots & V_{n,LSTM}(k) & I_{j,LSTM}(k) & T_{j,LSTM}(k) \end{pmatrix}$$

[0104]

[0105] 수학식 17의 매개변수는 고장 진단 과정에서 사용된다.

[0106] 진단 모델 실행 결과, LSTM의 출력 값이 전압, 전류 및 수소 압력의 기 정의된 하한값 $(V_{min}, I_{min}, T_{min})$ 보다 낮거나 기 정의된 상한값 $(V_{max}, I_{max}, T_{max})$ 보다 높다면, 고장 진단 결과는 전압 이상, 전류 이상, 발열 이상 중 하나로 판단된다.

[0107] 이 때, 하한값과 상한값은 배터리 시스템의 특성과 데이터를 기반으로 결정된다.

[0108] 고장 진단 알고리즘을 설계한 후, 고장 진단 알고리즘을 통해 고장을 진단한다(S350).

[0109] 다음으로, 진단된 결과를 사용자 또는 제조업체에게 제공한다(S360).

[0110] 이 때, 진단 결과가 비정상 상태일 경우, 진단 결과에 따른 경보를 사용자 또는 제조업체에게 출력할 수 있다.

[0111] 예를 들어, 1단계 경고는 비교적 안전한 상태이지만, 잠재적인 장애를 피하기 위해서는 적시에 개입하는 것이 필요한 상태일 때 출력하고, 2단계 경고는 해당 배터리가 위험 상태에 있으며, 정밀하고 주의 깊은 점검을 위해 차량/응용 시스템을 정지해야 하는 상태에서 출력하며, 3단계 경고가 발령되면 사용자는 차량을 멈추고 즉시 차량에서 탈출해야 하는 상황에서 출력한다.

[0112] 이 때, 1단계 및 2단계 경고는 잠재적인 고장 위험을 평가하는 데 사용되며, 3단계 경고는 열폭주 발생에 대한 조기 경보로 사용된다.

[0113] 이와 같이 본 발명에 따르면, 물리적 모델의 온라인 측정값으로 디지털 트윈 모델을 업데이트할 수 있으며, 이는 변화하는 작동 조건과 셀 간 차이를 고려하여 예측 성능을 향상시킬 수 있고, 배터리 시스템의 안전한 작동 상태를 유지하는데 도움을 줄 수 있다.

[0114] 또한, 본 발명의 고장 진단 방법은 적절한 임계값 설정을 기반으로 하는 다른 배터리 시스템에서도 적용 가능하여 높은 호환성을 가지고 있다.

[0115] 본 발명은 도면에 도시된 실시예를 참고로 하여 설명되었으나 이는 예시적인 것에 불과하며, 당해 기술이 속하는 분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 이로부터 다양한 변형 및 균등한 타 실시예가 가능하다는 점을 이해할 것이다. 따라서 본 발명의 진정한 기술적 보호범위는 아래의 특허청구범위의 기술적 사상에 의하여 정해져야 할 것이다.

부호의 설명

[0116] 1000: 디지털 트윈 기반 배터리 고장 진단 시스템

1100: 물리적 공간

1110: 센서부

1120: 서비스 제공부

1200: 가상 공간

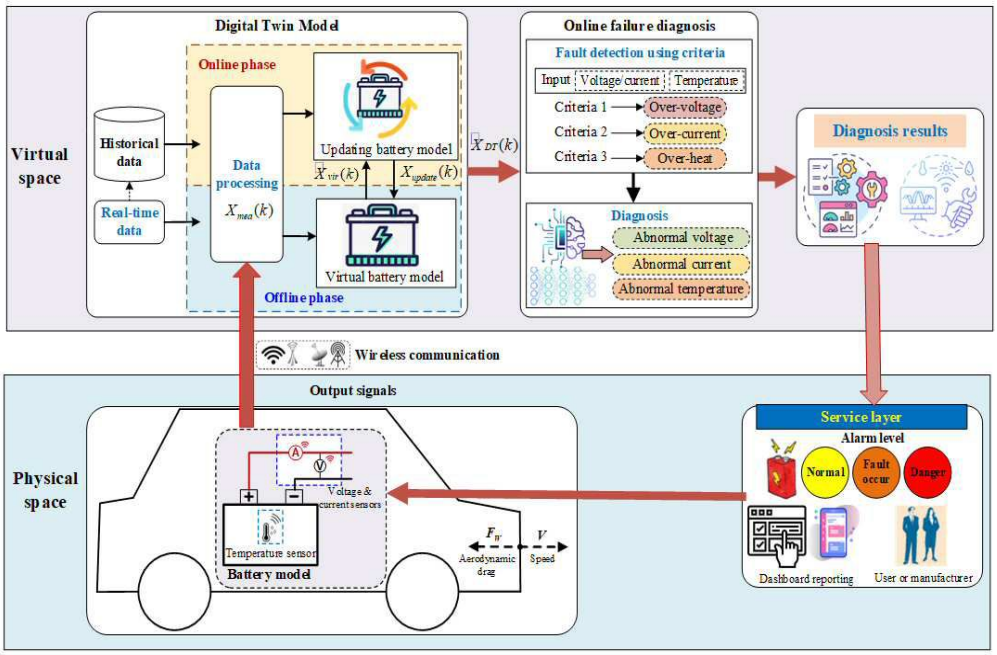
1210: 디지털 트윈 모델 구축부

1220: 진단 알고리즘 개발부

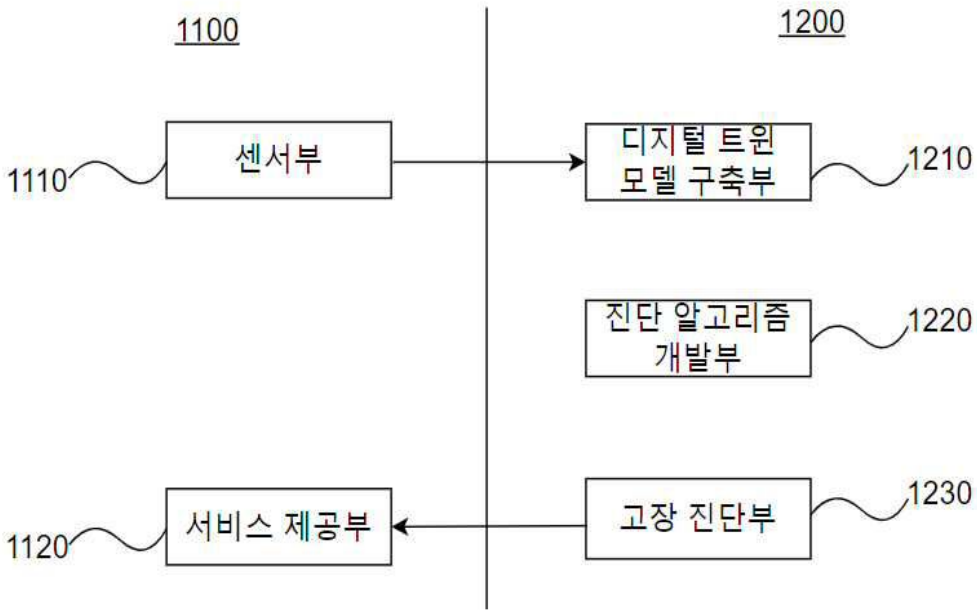
1230: 고장 진단부

도면

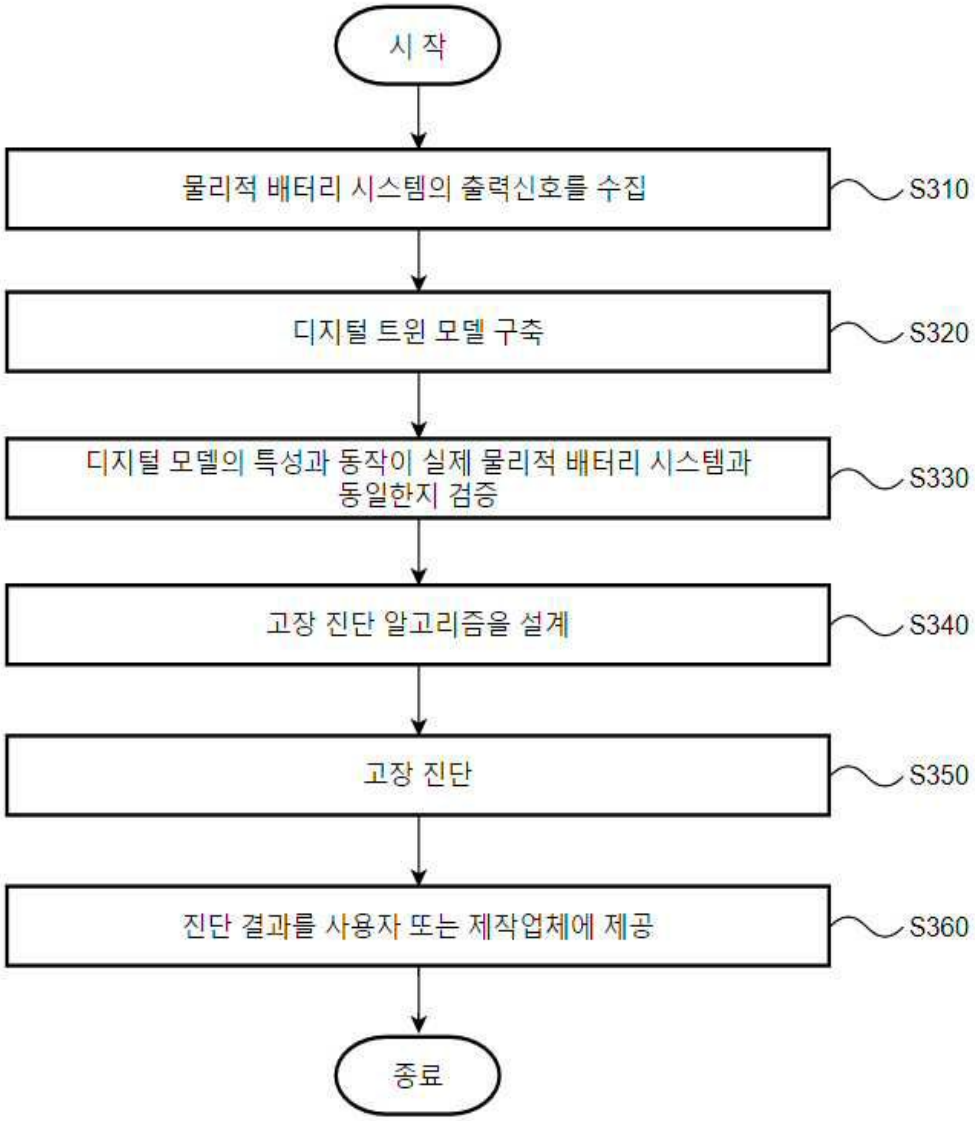
도면1


Digital Twin Model
Online phase
Offline phase
Virtual space
Historical data
Real-time data
Data processing
Updating battery model
Virtual battery model
Online failure diagnosis
Fault detection using criteria
Input
Voltage/current
Temperature
Criteria 1
Criteria 2
Criteria 3
Over-voltage
Over-current
Over-heat
Diagnosis
Abnormal voltage
Abnormal current
Abnormal temperature
Diagnosis results
Wireless communication
Output signals
Physical space
Voltage & current sensors
Temperature sensor
Battery model
Aerodynamic drag
Speed
Service layer
Alarm level
Normal
Fault occur
Danger
Dashboard reporting
User or manufacturer

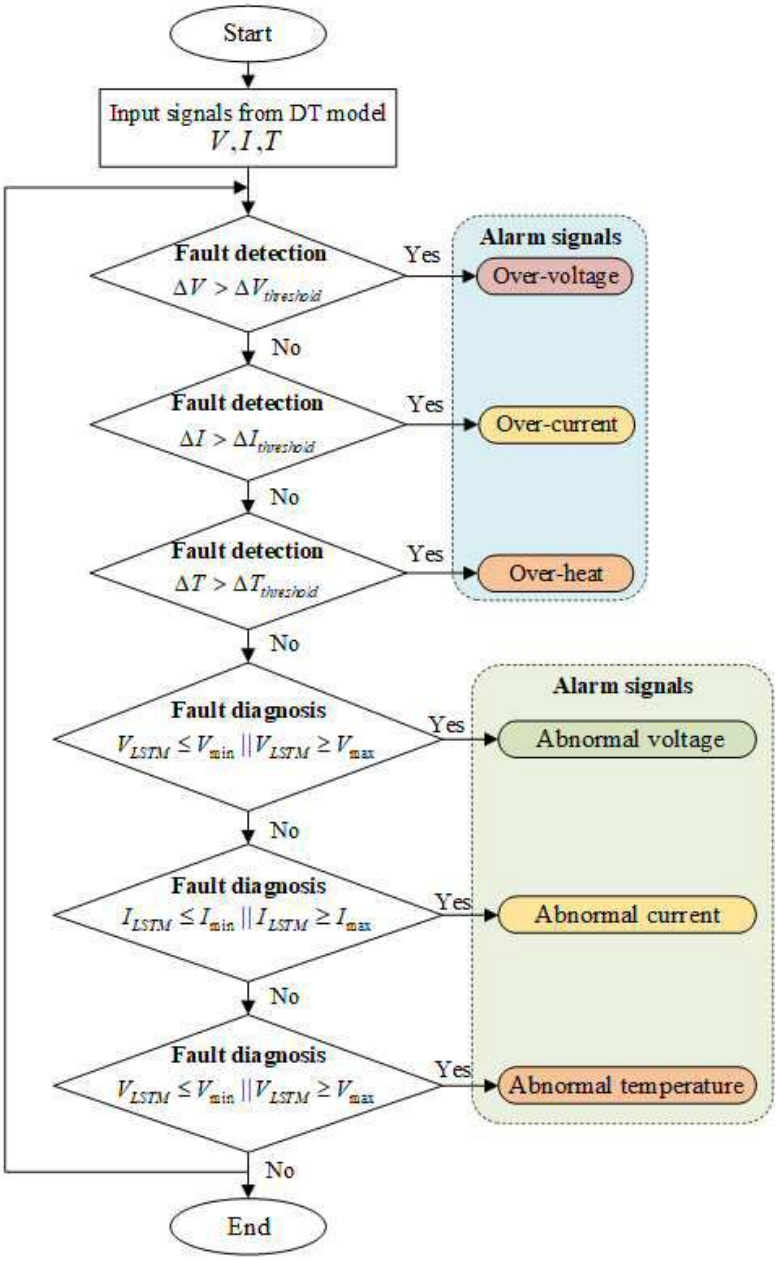
도면2


1100
1200
1110
센서부
디지털 트윈 모델 구축부
1210
진단 알고리즘 개발부
1220
1120
서비스 제공부
고장 진단부
1230

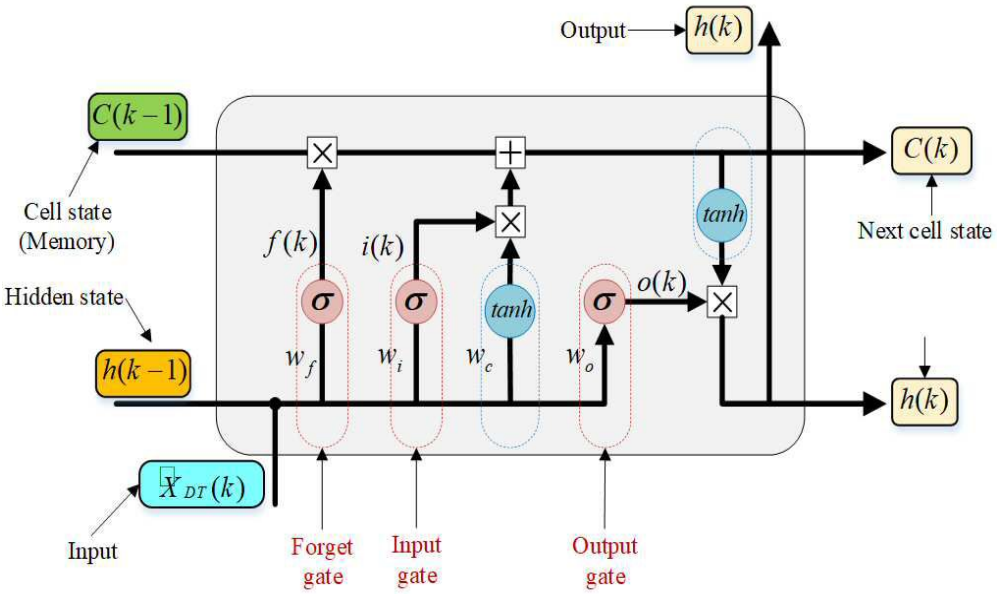
도면3


시 작
물리적 배터리 시스템의 출력신호를 수집
S310
디지털 트윈 모델 구축
S320
디지털 모델의 특성과 동작이 실제 물리적 배터리 시스템과 동일한지 검증
S330
고장 진단 알고리즘을 설계
S340
고장 진단
S350
진단 결과를 사용자 또는 제작업체에 제공
S360
종료

도면4


Start
Input signals from DT model
V, I, T
Fault detection
ΔV > ΔV_threshold
Yes
Alarm signals
Over-voltage
No
Fault detection
ΔI > ΔI_threshold
Yes
Over-current
No
Fault detection
ΔT > ΔT_threshold
Yes
Over-heat
No
Fault diagnosis
V_LSTM ≤ V_min || V_LSTM ≥ V_max
Yes
Alarm signals
Abnormal voltage
No
Fault diagnosis
I_LSTM ≤ I_min || I_LSTM ≥ I_max
Yes
Abnormal current
No
Fault diagnosis
V_LSTM ≤ V_min || V_LSTM ≥ V_max
Yes
Abnormal temperature
No
End

도면5


Output
h(k)
C(k−1)
Cell state
(Memory)
C(k)
Next cell state
tanh
f(k)
i(k)
o(k)
σ
σ
tanh
σ
Hidden state
h(k−1)
w_f
w_i
w_c
w_o
h(k)
X_DT(k)
Input
Forget
gate
Input
gate
Output
gate