



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2020-0079765
(43) 공개일자 2020년07월06일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G06F 30/00 (2020.01) G01N 17/00 (2020.01)
G01N 25/16 (2006.01) H01L 29/739 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G06F 30/20 (2020.01)
G01N 17/00 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2018-0169287
(22) 출원일자 2018년12월26일
심사청구일자 2018년12월26일

(71) 출원인
한국기술교육대학교 산학협력단
충청남도 천안시 동남구 병천면 충절로 1600 (한
국기술교육대학교내)
(72) 발명자
백제훈
서울특별시 서초구 고무래로 35 반포리체아파트
107-3004
(74) 대리인
특허법인 신우

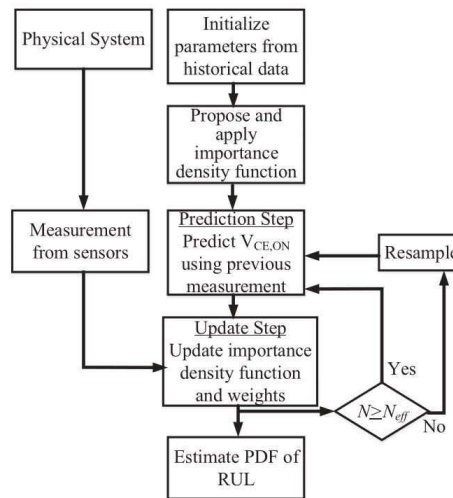
전체 청구항 수 : 총 4 항

(54) 발명의 명칭 보조 입자 필터링을 이용한 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법

(57) 요약

본 개시의 일 특징에 따르면, 컴퓨터 장치에서 수행되는 보조 입자 필터링을 이용한 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법이 제공된다. 본 개시의 방법은 과거 데이터를 분석하여 파라미터 초기값을 설정하는 단계; 중요 밀도 함수(importance density function)를 적용하는 단계; (a) 과거 측정값을 이용하여 $V_{CE,ON}$ 을 추정하는 단계; (b) 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계; 및 상기 IGBT의 잔여 유효 수명 추정하는 단계를 포함할 수 있다.

대표도 - 도8



(52) CPC특허분류

G01N 25/16 (2013.01)

H01L 29/7393 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호 2018-B-G041-010101

부처명 전기전자통신공학부

연구관리전문기관 한국연구재단

연구사업명 사회맞춤형 산학협력 선도사업(LINC+)육성사업

연구과제명 산업용 전동기 구동용 지능형 인버터 개발

기 여 율 1/1

주관기관 한국기술교육대학교 산학협력단

연구기간 2018.05.15 ~ 2018.12.31

명세서

청구범위

청구항 1

컴퓨터 장치에서 수행되는 보조 입자 필터링을 이용한 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법으로서,
과거 데이터를 분석하여 파라미터 초기값을 설정하는 단계;
중요 밀도 함수(importance density function)를 적용하는 단계;
(a) 과거 측정값을 이용하여 $V_{CE,ON}$ 을 추정하는 단계;
(b) 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계; 및
상기 IGBT의 잔여 유효 수명 추정하는 단계
를 포함하는 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,
상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계는
리샘플링하여 과거 측정값을 이용하여 $V_{CE,ON}$ 을 추정하는 단계를 더 포함하는 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법.

청구항 3

제1항에 있어서,
상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계는
 $V_{CE,ON}$ 의 제적의 수(N)가 유효 입자의 수(N_{eff})보다 작은 경우,
리샘플링하는 단계; 및
(b) 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계
를 수행하는 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법.

청구항 4

제1항에 있어서,
상기 방법은
실제 시스템에서 센서를 통해 IGBT의 결함여부를 센싱하여 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계를 더 포함하는 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(insulated gate bipolar transistor: IGBT)의 잔여 수명 예측 방법에 관한 것으로, 보다 상세히는 보조 입자 필터링(Auxiliary Particle Filtering: APF)을 기초로 IGBT의 잔여 수명을 추정하는 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 절연 게이트 바이폴라 트랜지스터(IGBT)는 다양한 전력 전자 시스템에서 널리 사용되어왔다. IGBT는 전력 전자

변환기에서 가장 취약한 구성 요소 중 하나이기 때문에 이 스위치의 잔여 유효 수명(Remaining Useful Life: RUL) 추정이 최근 몇 년 동안 주요 연구가 되었다. 이러한 잔여 유효 수명 예측 방법은 IGBT의 정상 작동 상태를 기초로 일정 유지 관리에 도움을 주어 예상치 못한 컨버터 오류를 방지할 수 있으나 일반적으로 랜덤 노이즈의 존재로 인해 잔여 유효 수명 추정과 실제 값과는 큰 차이가 있어 IGBT 예후가 잘못된 결과를 초래할 수 있다.

[0003] 잔여 유효 수명 추정 방법에서 이러한 변동(variance)을 줄이기 위해, 순차적 중요성 샘플링 (sequential importance sampling)과 순차적 중요성 재샘플링 (sequential importance resampling)을 포함한 입자 필터 방법이 최근에 도입되었다. 그러나 이러한 방법은 표본의 퇴행성(degeneracy)과 부족(impovertishment)으로 인해 무시할 수 없는 추정 변동을 초래할 수 있다는 문제점이 있다.

[0004] 최근에는 IGBT (insulated gate bipolar transistor)의 예후 연구를 통해 예기치 않은 고장 모드를 방지하기 위해 전력전자시스템의 안정성을 어느 정도 향상시키는데 관심을 보이고 있다. IGBT는 전력전자시스템에서 사용되는 스위치의 약 42%는 모터구동시스템에서 두 번째로 취약한 부품이며, 산업조사에 따르면 IGBT의 시스템 비용 대비 실패비용의 비율은 약 80%에 달한다. IGBT의 정상 상태가 매우 짧은 시간($\sim 10 \mu s$) 내에 장애로 저하될 수 있기 때문에 장애 이후의 유지 관리 스케줄링은 실현 가능한 해결책이 아니다. IGBT 고장으로 인한 시스템 셧다운을 방지하기 위해 잔여 수명(RUL)을 정확하게 예측해야 한다. 정확한 RUL을 추정함으로써 결함이 있거나 성능이 저하된 스위치를 시간 내에 수리하고 교체하기 위해 최적화 된 유지 관리 일정을 결정할 수 있다.

[0005] 열화(degradation) 메커니즘을 확인하고 정확한 잔여 유효 수명을 추정하기 위해 많은 양의 연구가 수행되어 왔다. IGBT의 주요 성능 저하 메커니즘은 WBL0 (wire-bond liftoff) 및 솔더 피로(solder fatigue)를 초래하는 다이 어태치먼트 열화(die-attachment degradation)이다. 분해 수준은 X 선, 스캐닝 음향 현미경 분석과 같은 직접적인 방법을 사용하여 관찰 할 수 있지만 이러한 방법은 오프라인, 비용이 많이 들고 파괴적이다. 분석 방법은 실패 메커니즘의 물리학에 기반하여 널리 개발되었다. 그러나 분석 방법은 시스템의 동적 조건 변화와 랜덤 노이즈의 존재를 처리 할 수 없으므로 잔여 유효 수명 추정에 큰 차이가 발생한다.

[0006] 한편, 데이터 기반 방법은 결함 전구 물질의 궤도(trajectories)를 분석하여 개발되었다. 이 방법은 내부 IGBT 구조에 대한 지식이 거의 없으므로 비용 효과적이고 비파괴적인 온라인 적용이 가능하다. 또한, 이 방법은 다양한 작동 조건에 따라 성능 저하 모델을 조정할 수 있다. 전기적 매개 변수는 WBL0 및 솔더 피로로 인한 특성의 중요한 변화를 보여 주었다. 이러한 파라미터의 민감도로 인해 콜렉터-에미터 전압($V_{CE, ON}$), 콜렉터 전류(I_C), 게이트-에미터 전압(V_{GE}), 게이트-에미터 임계 전압($V_{GE, TH}$), 열 및 전기 저항 및 스위치 턴 온(T_{on})과 턴 오프(T_{off}) 시간은 와이어 본드(wire-bond) 관련 결함의 결함 전구 물질로 식별된다.

[0007] 일부 연구에서는 전력 변환 장치의 IGBT 모듈의 케이스 온도(T_C)를 모니터링함으로써 성능 저하 모니터링 방법을 제안한다. 이 방법은 베이스 플레이트와 콜드 플레이트 사이의 인터페이스에서 각 IGBT에 대해 2 개의 열 센서를 필요로 한다. 이러한 결함 전구체의 궤적 추정과 투영은 측정 잡음 때문에 큰 추정 변화에 영향을 받기 쉽다는 단점이 있다.

[0008] 매우 많은 정확하지 않은 데이터(highly noisy data)로부터 궤적을 예측하는 정확성을 향상시키기 위해 칼만 필터(KF), 확장 칼만 필터(EKF) 및 입자 필터(PFs)를 포함한 선진적(advanced) 비선형 필터가 광범위하게 연구되었다. 한 연구에서는 칼만 필터(KF)를 IGBT의 잔여 유효 수명 추정에 사용하였다. KF 방식은 선형 시스템 및 가우시안 노이즈로 더 우수한 성능을 나타낼 수 있으나, KF 방법은 IGBT 분해 과정의 높은 비선형성에 기인한 잔여 유효 수명 추정의 큰 변화를 보여준다.

[0009] 다른 예로 EKF는 비선형 시스템을 다루는데 사용될 수 있다. 첫째, EKF는 Taylor 계열의 처음 두 항을 사용하여 비선형 시스템의 선형 근사를 수행 한 다음 KF 방법을 적용하여 추정할 수 있다. 이 방법은 제한된 비선형성에 따라 수용 가능한 성능을 제공할 수 있으나, EKF 방법 또한 시스템이 고도로 비선형이거나 잡음이 아닌 가우시안(non-Gaussian) 일 때 추정치가 크게 변한다는 단점이 존재한다. 실제로 시스템 잡음은 항상 가우시안이 아니다.

[0010] 또 다른 예로 PF 방식은 시스템이 비선형이거나 노이즈가 가우스가 아닌 경우 더 나은 추정 정확도를 제공할 수 있다. $V_{CE, ON}$ 의 궤적을 시뮬레이션하기 위해 SIR (sequential importance resampling) PF 기법이 활용될 수 있다. SIR PF는 순차 중요성 표본 추출(SIS) PF에서 퇴행성 문제를 해결할 수 있다는 장점이 있으나 SIR PF는 RUL 추정에서 21 %의 분산을 보여주는데 이러한 차이는 표본 빈곤(sample impoverishment)로 알려진 입자 다양

성의 상실화(loss of particle diversity)을 원인으로 한다. 이 문제는 각 단계에서 리샘플링으로 인해 발생하며 모든 입자가 공통 입자에서 비롯된 것이다. 이러한 표본 빈곤화로 인해 추정이 크게 달라진다. 이러한 변화는 입자 샘플링의 다양성 감소로 인한 것이다.

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0012] 본 개시에 따르면, 보조 입자 필터링(APF) 기법을 기초로 잔여 유효 수명을 추정 방법을 제공할 수 있다.
- [0013] 본 개시에 따르면, 샘플의 차원을 증가시키고 샘플의 다양성을 유지함으로써 추정 변동(variance)을 충분히 감소시킬 수 있다.
- [0014] 본 개시에 따르면, 기울기 기반으로 IGBT의 열화가 명백한 경우를 식별할 수 있으며, 테스트중인 IGBT가 이 영역에 들어갈 때 APF 방법이 적용될 수 있다.
- [0015] 본 개시에 따르면, 잔여 유효 수명 추정 및 계산 비용의 편차를 줄일 수 있다.

과제의 해결 수단

- [0016] 본 개시의 일 특징에 따르면, 컴퓨터 장치에서 수행되는 보조 입자 필터링을 이용한 IGBT의 잔여 유효 수명 추정 방법이 제공된다. 본 개시의 방법은 과거 데이터를 분석하여 파라미터 초기값을 설정하는 단계; 중요 밀도 함수(importance density function)를 적용하는 단계; (a) 과거 측정값을 이용하여 $V_{CE,ON}$ 을 추정하는 단계; (b) 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계; 및 상기 IGBT의 잔여 유효 수명 추정하는 단계를 포함할 수 있다.
- [0017] 본 개시의 일 실시예에 따르면, 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계는 리샘플링하여 과거 측정값을 이용하여 $V_{CE,ON}$ 을 추정하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0018] 본 개시의 일 실시예에 따르면, 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계는 $V_{CE,ON}$ 의 제적의 수(N)가 유효 입자의 수(N_{eff})보다 작은 경우, 리샘플링하는 단계; 및 (b) 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계를 수행할 수 있다.
- [0019] 본 개시의 일 실시예에 따르면, 본 개시의 방법은 실제 시스템에서 센서를 통해 IGBT의 결함여부를 센싱하여 상기 중요 밀도 함수와 가중치를 업데이트하는 단계를 더 포함할 수 있다.
- [0020] 본 개시의 다른 특징에 따르면, 하나 이상의 명령어를 수록한 컴퓨터 판독가능 기록 매체로서, 상기 하나 이상의 명령어는, 실행될 경우, 컴퓨터 장치로 하여금, 상기 기재한 방법 중 어느 한 항의 방법을 수행하도록 하는, 컴퓨터 판독가능 기록 매체가 제공된다.

발명의 효과

- [0021] 본 개시에 따르면, 보조 입자 필터링(APF) 기법을 기초로 잔여 유효 수명을 추정하는 효과가 있다.
- [0022] 본 개시에 따르면, 샘플의 차원을 증가시키고 샘플의 다양성을 유지함으로써 추정 변동(variance)을 충분히 감소시킬 수 있다.
- [0023] 본 개시에 따르면, 기울기 기반으로 IGBT의 열화가 명백한 경우를 식별하여 잔여 유효 수명 추정 및 계산 비용의 편차를 줄이는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

- [0024] 도 1은 본 개시의 일 실시예에 따라 IGBT의 단면을 도시하는 도면이다.
- 도 2는 본 개시의 일 실시예에 따라 IGBT의 고장 원인의 비율을 도시하는 그래프이다.
- 도 3은 본 개시의 일 실시예에 따라 IGBT의 결함 전구 물질의 성능을 비교하는 그래프이다.

도 4는 본 개시의 일 실시예에 따라 $V_{CE, ON}$ 의 예측 궤적을 도시하는 그래프이다.

도 5는 본 개시의 일 실시예에 따라 시간의 경과에 따른 p 의 진화 ($V_{CE, ON, pre, n} \mid V_{CE, ON, act, n}$)를 도시한 그래프이다.

도 6은 본 개시의 일 실시예에 따라 후부(posterior) PDF 및 중요도 PDF의 가중치를 계산한 결과 값을 도시하는 그래프이다.

도 7은 본 개시의 일 실시예에 따라 입자 필터링의 리샘플링 단계를 도시하는 그래프이다.

도 8은 본 개시의 일 실시예에 따라 보조 입자 필터링 기반 잔여 유효 수명을 추정하는 방법을 도시하는 흐름도이다.

도 9는 본 개시의 일 실시예에 따라 시간 n 에서 잔여 유효 수명 추정값을 도시하는 그래프이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0025] 이하, 첨부 도면을 참조하여 본 발명의 실시예에 관하여 상세히 설명한다. 이하에서는, 본 발명의 요지를 불필요하게 흐릴 우려가 있다고 판단되는 경우, 이미 공지된 기능 및 구성에 관한 구체적인 설명을 생략한다. 또한, 이하에서 설명하는 내용은 어디까지나 본 발명의 일 실시예에 관한 것일 뿐 본 개시가 이로써 제한되는 것은 아님을 알아야 한다.
- [0026] 본 개시에서 사용되는 용어는 단지 특정한 실시예를 설명하기 위해 사용되는 것으로 본 발명을 한정하려는 의도에서 사용된 것이 아니다. 예를 들면, 단수로 표현된 구성요소는 문맥상 명백하게 단수만을 의미하지 않는다면 복수의 구성요소를 포함하는 개념으로 이해되어야 한다. 본 개시에서 사용되는 "및/또는"이라는 용어는, 열거되는 항목들 중 하나 이상의 항목에 의한 임의의 가능한 모든 조합들을 포괄하는 것임이 이해되어야 한다. 본 개시에서 사용되는 '포함하다' 또는 '가지다' 등의 용어는 본 개시 상에 기재된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함을 지정하려는 것일 뿐이고, 이러한 용어의 사용에 의해 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 배제하려는 것은 아니다.
- [0027] 본 발명의 실시예에 있어서 '모듈' 또는 '부'는 적어도 하나의 기능이나 동작을 수행하는 기능적 부분을 의미하며, 하드웨어 또는 소프트웨어로 구현되거나 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다. 또한, 복수의 '모듈' 또는 '부'는, 특정한 하드웨어로 구현될 필요가 있는 '모듈' 또는 '부'를 제외하고는, 적어도 하나의 소프트웨어 모듈로 일체화되어 적어도 하나의 프로세서에 의해 구현될 수 있다.
- [0028] 덧붙여, 달리 정의되지 않는 한 기술적 또는 과학적인 용어를 포함하여, 본 개시에서 사용되는 모든 용어들은 본 개시가 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의된 용어들은, 관련 기술의 문맥상 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 개시에서 명백하게 달리 정의하지 않는 한 과도하게 제한 또는 확장하여 해석되지 않는다는 점을 알아야 한다.
- [0029] 보조 입자 필터링(Auxiliary particle filtering : APF)은 샘플의 다양성을 증가시키면서 시료의 빈곤을 감소시키는 재 샘플링을 위한 추가 변수로서 입자의 색인을 도입한다. 정규 입자 여과(RPF)와 Rao Blackwell 입자 여과(RBPF)도 비슷한 기능을 보여준다. 그러나 RPF는 정규화된 리샘플링을 위한 추가 프로세스가 필요하다. APF보다 큰 RMSE (제곱 평균 오차)를 보여줄 수 있다. RBPF 방법은 시스템의 차원이 2보다 클 때 더 효과적이다. 이 방법은 시스템을 선형 하위 시스템으로 세그먼트화하여 작동한다. Cuckoo Search (CS) 기술과 같은 진화적 최적화 기술은 샘플의 입자 퇴보 및 유지 다양성을 줄이기 위해 적용될 수 있다. CS PF 기술은 입자의 수가 500일 때의 추적 문제만을 다루는데 사용되어왔다. 일부 연구에서는 개선된 CS PF 기법이 비디오 추적에 사용되었다. 이 방법은 더 많은 계산 시간을 가지는 일반 PF 및 입자 군 최적화 PF와 비교하여 더 나은 성능을 나타낸다. APF 방법은 IGBT의 잔여 유효 수명을 추적 및 예측하는데 만족스러운 정밀도 및 계산 시간을 제공할 수 있다. 본 개시의 일 실시예에 따르면, 기존의 RUL 추정 방법과 비교하여 RUL 추정의 정확도를 향상시킨 APF를 개시한다. 이 방법은 샘플의 다양성 보존 능력으로 인해 SIS PF 및 SIR PF보다 더 우수한 평가 기능을 보여준다. 이 개시는 또한 저하가 명백한 영역을 확인하고 결국 계산 시간을 줄인 APF 방법을 적용하는 간단한 기울기 기반 방법을 활용한다.

- [0030] 이하, 첨부된 도면을 참조하여, 본 발명의 실시예에 대해 구체적으로 설명하기로 한다.
- [0031] IGBT의 결함 전구 물질(precursors)
- [0032] A. IGBT의 스트레스
- [0033] 도 1은 본 개시의 일 실시예에 따른 IGBT의 단면을 도시하는 도면이다.
- [0034] IGBT는 높은 전력 밀도 영역에서 고효율로 작동할 수 있기 때문에 전력 전자 응용 분야에서 널리 사용되고 있다. 도 1에 도시된 바와 같이, IGBT는 실리콘(Si)베이스 판 위에 구리와 세라믹 판의 서로 다른 층을 적층하여 제작된다. 스택을 함께 고정하기 위해 SiO₂ 납땜이 적용될 수 있다. 다른 IGBT 장치의 실리콘 칩은 알루미늄(Al) 와이어를 사용하여 상호 연결될 수 있다. IGBT에서 관찰되는 개방 위상 결함은 WBLO, 다이 솔더 열화(die-solder degradation), 게이트 산화물 열화(gate-oxide degradation) 및 패키지 박리(delamination) 메커니즘 때문이다.
- [0035] 도 2는 IGBT의 고장 원인의 비율을 도시하는 그래프이다.
- [0036] IGBT의 고장 고장 메커니즘의 근본 원인은 도 2에 도시된 바와 같이 운전 중 스트레스이다. IGBT의 약 55 %의 고장은 높은 정상 상태 온도와 온도 사이클에 기인한다.
- [0037] 구리, 세라믹 및 실리콘과 같은 IGBT 모듈의 재료에는 서로 다른 열팽창 계수(coefficients of thermal expansions: CTE)를 가진다. IGBT는 작동 중에 온도 사이클에 노출되어 다이 조인트 및 상호 연결에서 기계적 응력을 발생시킨다. 이러한 기계적 응력은 결국 WBLO 및 솔더 피로를 야기할 수 있다. 다른 IGBT의 Si 다이 사이의 상호 접촉 실패는 주로 WBLO 때문이다. 솔더 피로는 서로 다른 스택 사이에서 솔더 접촉면에 균열과 보이드가 형성되는 여러 재료 사이의 CTE 불일치 및 관련 물리적 응력에 기인한다. IGBT가 고주파수에서 동작 할 때, WBLO 및 솔더 피로가 지배적이 되어, 온 상태 동안 발생된 열을 오프 상태 동안 제거할 수 없다. 그 결과, 모듈의 정상 상태 온도가 증가한다. 노미날(nominal) 특성 온도 근처의 온도는 저온에서 유사한 변화보다 더 파괴적이다.
- [0038] B. 결함 전구 물질(fault precursors)
- [0039] 도 3은 본 개시의 일 실시예에 따라 IGBT의 결함 전구 물질의 성능을 비교하는 그래프이다.
- [0040] $V_{CE, ON}$, I_C , V_{GE} , $V_{GE, TH}$, T_{on} 및 T_{off} 는 접합 온도(T_j)에서의 IGBT의 결함 전구 물질로 알려져 있다. T_j 가 열화에 가장 영향력있는 매개 변수임에도 불구하고, T_j 의 직접 측정은 침입적이기 때문에 비실용적이다. 따라서, T_j 의 비 침습적 평가를 위한 많은 연구가 수행되었다. 온도 민감성 전기 매개 변수 (temperature sensitive electrical parameters: TSEP)를 사용하는 T_j 의 평가는 비침습적이며 추가 하드웨어가 필요하지 않으므로 선호되었다. 그러나 IGBT의 스위칭 주파수가 증가하면 TSEP 성능이 저하된다. 케이스 온도(case temperature)는 또한 결함 전조로 사용된다. 이 방법은 IGBT 당 두 개의 센서가 필요하며 구현 비용이 비싸다. $V_{CE, ON}$ 은 I_C , V_{GE} 및 $V_{GE, TH}$ 에 비해 열화에 더 민감하다. $V_{CE, TH}$ 및 I_C 는 별로 변하지 않지만 $V_{CE, ON}$ 은 노화에 따라 크게 변화한다. 또한 $V_{CE, ON}$ 은 다른 매개 변수보다 더 우수한 온라인 측정 기능과 정확성을 보여준다. $V_{CE, ON}$ 은 초기 값의 3%에 도달하면 정기적으로 증가한다. 그 전에는 $V_{CE, ON}$ 이 불규칙하고 천천히 증가한다. $V_{CE, ON}$ 이 초기 값의 20 %를 증가 시키면 IGBT는 결함으로 간주된다.
- [0041] $V_{GE, TH}$ 는 게이트 산화물 결함에 대한 효과적인 결함 전구 물질이다. T_{on} 과 T_{off} 는 IGBT의 단락 고장시 고장 전구체로 사용된다. 그러나 이러한 매개 변수는 WBLO 및 솔더 피로에 대해 중요하지 않은 감도를 나타낸다.
- [0042] 도 3에 도시된 바와 같이, $V_{CE, ON}$ 은 민감도, 정확도 및 온라인 측정 기능으로 인해 WBLO 및 솔더 피로를 조사하는 데 가장 적절한 결함 전구 물질임을 알 수 있다. 그러나 $V_{CE, ON}$ 은 거친 산업 소음에 영향을 받기 때문에(is subject to) RUL 추정에서 많은 양의 불확실성을 초래한다. 이 발명은 추정 변동을 최소화하는 방법을 정확하게 다룬다.

[0044] 입자 필터링

[0046] A. 잔여 유효 수명 추정 기본

[0047] 도 4는 본 개시의 일 실시예에 따라 $V_{CE, ON}$ 의 예측 궤적을 도시하는 그래프이다.

[0048] 도 4에 따르면 입자 필터링 방법을 이용한 RUL 추정 과정의 기본 원리가 도시되어 있다. 도 4에서 그래프(410)는 IGBT의 실제 성능 저하 궤적을 나타낸다. 시간 $n-1$ 에서 이전의 데이터 및 데이터 중심 모델을 사용하여 궤적 대역을 시뮬레이션할 수 있다. 탄도의 떠는 넓은 점선으로 표시된다. 시간 n 에서 새로운 데이터를 사용할 수 있게 되면 데이터 기반 모델이 업데이트된다. 그런 다음이 업데이트 된 모델을 사용하여 궤도를 시뮬레이션 할 수 있다. 이러한 업데이트 된 궤도는 이전의 궤도 대역보다 낮은 변동을 보여준다. 이것은 RUL 추정의 변동을 줄이기 위해 측정이 가능할 때 추정치를 지속적으로 업데이트하는 베이저안 추적의 기본이다. 베이저안 추적의 정확성을 향상시키기 위해 APF를 적용할 수 있다.

[0050] B. 베이저안 추적의 기본 (Fundamental of Bayesian Tracking)

[0051] 도 5는 본 개시의 일 실시예에 따라 시간의 경과에 따른 p 의 진화 ($V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n}$)를 도시한 그래프이다.

[0052] $V_{CE, ON}$ 의 궤적은 다음과 같이 베이저안 추적 시스템을 사용하여 추정할 수 있다.

[0053]
$$V_{CE, ON, pre, n} = f(V_{CE, ON, pre, n-1}) + v_{n-1} \quad (1)$$

[0054]
$$V_{CE, ON, act, n} = h(V_{CE, ON, pre, n}) + m_n \quad (2)$$

[0056] 식 (1)과 식 (2)는 각각 $V_{CE, ON, act, n}$ 이 측정 된 VCE, 시간 n 에서의 $V_{CE, ON, pre, n}$ 은 시간 V 에서의 VCE 예측, v 는 공정(process) 잡음, m 은 측정 잡음, n 은 정수이다. 이러한 모델은 자기 회귀 (autoregressive, AR) 방법을 사용하여 시계열 데이터로부터 공식화된다. 이 모델은 새로운 측정이 가능해지면 업데이트 된다.

[0057] $V_{CE, ON, pre, n-1}$ 및 $V_{CE, ON, act, n-1}$ 에 기초한 $V_{CE, ON, pre, n}$ 의 추정은 잡음의 존재로 인한 확률적 추정 문제이며, $p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n})$ 이 분포는 사후 분포라고 알려져 있으며 (2)의 측정 잡음, m_n 및 측정 모델 통계로 정의할 수 있다. 시간 $n = 0$ 에서, 이 확률은 다음과 같이 표현된다.

[0058]
$$p(V_{CE, ON, pre, 0} | V_{CE, ON, act, 0}) = p(V_{CE, ON, pre, 0}) \quad (3)$$

[0059] (3)에서 이용 가능한 사전 지식이 없다면, 그것은 일정 확률 분포로 선택 될 수 있다. 그런 다음, 새로운 측정이 가능할 때마다 (3)의 분포를 업데이트 할 수 있다. 시간이 지남에 따라, 이 분포는 도 5와 같이 실제 $p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n})$ 에 가깝게 근사된다. 이 근사는 중요도 밀도 함수이다. $q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n})$.

[0060] 예측 단계에서 $V_{CE, ON, pre, n}$ 은 다음과 같이 Chapman-Kolmogorov 방정식을 사용하여 이전 추정을 기준으로 예측된다.

[0062]
$$\begin{aligned} p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n-1}) \\ = \int p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1}) \\ \times p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n-1}) dV_{CE, ON, pre, n-1} \quad (4) \end{aligned}$$

[0064] 여기서 $p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1})$ 는 전이 확률 분포 함수 (PDF)이고 $p(V_{CE, ON, pre, n-1} | V_{CE, ON, act, n-1})$ 는 시간 $n-1$ 에서 후부 PDF이다. 전환 PDF는 (1)로 정의된다.

[0065] 업데이트 단계에서 $p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n})$ 는 Bayes 규칙을 사용하여 다음과 같이 작성할 수 있다.

$$p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n}) = \frac{p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,pre,n})p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n-1})}{p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,act,n-1})} \quad (5)$$

[0069] 여기서 $p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,pre,n})$ 는 우도 함수이며 $p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,act,n-1})$ 는 상수를 정규화한다. 정규화 상수는 다음과 같이 정의된다.

$$p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,act,n-1}) = \int p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,pre,n}) \times p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n-1}) dV_{CE,ON,pre,n} \quad (6)$$

[0073] (5)에 (4)를 넣어 다음을 확인할 수 있다.

$$p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n}) = \frac{p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,pre,n})}{p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,act,n-1})} \times \int p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,pre,n-1}) \times p(V_{CE,ON,pre,n-1}|V_{CE,ON,act,n-1}) dV_{CE,ON,pre,n-1} \quad (7)$$

[0076] (1)과 (2)가 선형이고 연관된 잡음이 가우시안이면, 후부(posterior) PDF, 상태 전이(state transition) PDF 및 우도 PDF가 가우시안이다. 이 경우, 식 (7)의 적분(integral)은 분석적으로 계산될 수 있다. 그러면 KF는 단층 전구체의 궤적을 정확하게 추적할 수 있다. 시스템이 약간 비선형이고 기본 노이즈가 가우스인 경우, EKF 방법은 Taylor 계열 확장을 사용하여 시스템을 선형으로 근사할 수 있다. KF는 결합 전구체의 궤적을 추적하는데 적용될 수 있다. 그러나, EKF는 고도의 비선형 시스템에 대한 근사로 인해 RUL 추정에서 더 큰 변동성을 가져온다. 높은 비선형 시스템 또는 비 가우시안 잡음의 경우, (7)의 적분은 분석적으로 계산될 수 없다. 이 경우 PF 기법은 수치 해석 방법을 사용하여 분석적으로 다루기 어려운 통합을 계산하는데 적용할 수 있다.

[0078] C. 입자 필터링(Particle Filtering)

[0079] PF에서 후방 PDF는 무작위 샘플로 표시되며 중요도 가중치로 알려진 관련 가중치는 다음과 같이 계산된다.

$$p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n}) \approx \sum_{i=1}^N w_n^i \delta(V_{CE,ON,pre,n} - V_{CE,ON,pre,n}^i) \quad (8)$$

[0083] 여기서 $\delta(\cdot)$ 는 Dirac-delta 함수이고, w_n^i 는 시간 n에서 i 번째 샘플의 중요도 가중치이고, i는 후부 PDF에서 추출된 i 번째 샘플의 인덱스다. 이러한 무작위 샘플을 입자라고 한다. 입자의 중요도 가중치는 중요도 샘플링 원리를 사용하여 계산된다.

[0085] D. 중요도 가중치 계산

[0086] 도 6은 본 개시의 일 실시예에 따라 후부(posterior) PDF 및 중요도 PDF의 가중치를 계산한 결과값을 도시하는 그래프이다.

[0087] i 번째 입자의 중요도 가중치는 다음과 같이 정의된다.

$$w_n^i \propto \frac{p(V_{CE, ON, pre, n}^i | V_{CE, ON, act, n})}{q(V_{CE, ON, pre, n}^i | V_{CE, ON, act, n})} \quad (9)$$

[0091] 여기서 $\sum w_n^i = 1$ 이다. 도 6에서, 중요도 가중치 계산은 그 시점에서 사후 확률 및 중요도 확률의 비율이다. 중요도 PDF는 비 가우스 PDF의 가우스 근사치이다. 중요도 PDF는 다음과 같이 분석될 수 있다.

$$q(V_{CE, ON, pre, n}^i | V_{CE, ON, act, n}) = q(V_{CE, ON, pre, n}^i | V_{CE, ON, pre, n-1}, V_{CE, ON, act, n}) \times q(V_{CE, ON, pre, n-1}^i | V_{CE, ON, act, n-1}) \quad (10)$$

[0095] 식 (9)의 분자는 다음과 같이 분석될 수 있다.

$$p(V_{CE, ON, pre, n}^i | V_{CE, ON, act, n}) = p(V_{CE, ON, act, n}^i | V_{CE, ON, pre, n}^i) p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1}) p(V_{CE, ON, pre, n-1}^i | V_{CE, ON, act, n-1}) \quad (11)$$

[0099] (10)과 (11)을 식 (9)에 대입하면 중요도 가중치는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_n \propto \frac{p(V_{CE, ON, pre, n-1} | V_{CE, ON, act, n-1})}{q(V_{CE, ON, pre, n-1} | V_{CE, ON, act, n-1})} \frac{p(V_{CE, ON, act, n} | V_{CE, ON, pre, n}) p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1})}{q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1}, V_{CE, ON, act, n-1})} = w_{n-1} \frac{p(V_{CE, ON, act, n} | V_{CE, ON, pre, n}) p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1})}{q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1}, V_{CE, ON, act, n-1})} = w_{n-1} \tilde{w}_n \quad (12)$$

[0103] 이때,

$$\tilde{w}_n = \frac{p(V_{CE, ON, act, n} | V_{CE, ON, pre, n}) p(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1})}{q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n-1}, V_{CE, ON, act, n-1})} \quad (13) \text{ 이다.}$$

[0106] 여기서 $\tilde{w}$ 는 증분(incremental) 중요도 가중치이다. 이 증분 중요도 가중치는 각 단계에서 계산된다. 식 (12)에서 재귀적 방법을 사용하여 중요도 가중치를 추정한다. 이 PF 방법은 SIS PF로 알려져 있다. SIS의 장점은 중요도 가중치의 전체 표현을 평가하는 대신 증분 중요도 가중치를 평가하여 계산 부담을 줄이는 것이다. 그러나 이 방법은 반복 횟수가 많아질 수록 가중치 감소로 인해 변동이 증가합니다. 결과적으로 전력 낭비가 발생한다.

[0108] E. 리샘플링(Resampling)

[0109] 도 7은 본 개시의 일 실시예에 따라 입자 필터링의 리샘플링 단계를 도시하는 그래프이다.

[0110] 리샘플링 단계는 체중 감소를 극복하기 위해 SIS 알고리즘에 도입된다. 리샘플링 단계의 기본 원리는 더 높은 가중치를 갖는 입자를 복제하고 더 낮은 가중치를 갖는 입자를 제거하여 모든 입자의 가중치가 같아지도록 하는 것으로 도 7에 도시되어 있다. 이 원리에 기초하여, 수식(8)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$p(V_{CE,ON,pre,n}|V_{CE,ON,act,n}) \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \times \delta(V_{CE,ON,pre,n} - V_{CE,ON,pre,n}^i) \quad (14)$$

[0114] 이 방법을 SIR이라고 한다. 리샘플링 단계가 계산적으로 비용이 많이 드는 것처럼, 이 단계는 고밀도 영역 입자의 수가 유효 입자 수(N_{eff})보다 적을 때 수행된다. 리샘플링 단계에서 고중량 입자는 복제되고 저중량 입자는 폐기된다. 대부분의 입자는 일부 리샘플링 단계 후에 고중량 입자에서 비롯된 것이다. 이러한 현상을 표본 빈곤화(sample impoverishment)라고 하며, 이러한 표본 빈곤화는 입자의 다양성을 부족하게 하는데, 이로 인하여 추정치가 크게 달라질 수 있다.

[0116] 보조 입자 필터링에 기초하여 정확한 잔여 유효 수명 추정을 위한 제안 조건

[0117] PF는 궤적의 추적 및 예측을 향상시키는 새로운 방법론이었다. PF 방법은 표본 퇴행성 및 표본 빈곤화와 같은 문제에 직면하여 RUL 추정에 큰 변동이 발생한다. 이러한 문제는 APF에 의해 충분히 완화 될 수 있다. 본 논문에서는 IGBT의 RUL 추정을 위해 APF를 제안한다.

[0118] A. 보조 입자 필터 (Auxiliary Particle Filters)

[0119] APF에서 샘플링된 입자의 인덱스가 보조 변수로 도입되었다. 이 보조 변수는 변형 추정을 줄이는 데 도움이 되는 입자의 차원을 증가시킨다. APF 방법은 다음 측정과 더 잘 호환되는 입자가 더 나은 생존 기회를 갖는 방식으로 샘플을 취한다. 이를 위해 APF는 $V_{CE,ON,pre,n}$ 대신에 쌍 $\{V_{CE,ON,pre,n}^i, j^i\}$ 로 표본을 취하는데, 여기서 j 는 시간 $n-1$ 에서 i 번째 입자의 인덱스이다.

[0121] 쌍 $\{V_{CE,ON,pre,n}^i, j^i\}$ 의 조인트 확률(joint probability)은 상태 전이 PDF, $p(V_{CE,ON,act,n}|V_{CE,ON,pre,n})$ 와 이들 입자의 중요도 가중의 곱에 비례한다.

[0122] 이러한 관계는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$p(V_{CE,ON,pre,n}, j^i | V_{CE,ON,act,n}) \propto p(V_{CE,ON,act,n} | V_{CE,ON,pre,n}) p(V_{CE,ON,pre,n} | V_{CE,ON,pre,n-1}^i) w_{n-1}^i \quad (15)$$

[0126] APF에서, 첫 번째로, 입자는 이 조인트 확률로부터 얻어지고(drawn), 그 다음 인덱스가 한계 PDF, $p(V_{CE,ON,pre,n} | V_{CE,ON,act,n})$ 로부터의 샘플로 삭제될 수 있다. 입자는이 한계 PDF의 비 가우시안 특성으로 인해 중요도 PDF로부터 얻어질 수 있다. 중요도 PDF, $q(V_{CE,ON,pre,n}, j^i | V_{CE,ON,act,n})$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(V_{CE,ON,pre,n}, j^i | V_{CE,ON,act,n}) \propto q(V_{CE,ON,act,n} | \mu_n^i) q(V_{CE,ON,pre,n} | V_{CE,ON,pre,n-1}^i) w_{n-1}^i \quad (16)$$

[0129] 여기서, $q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[0131] \mu_n = E[q(V_{CE, ON, pre, n} | V_{CE, ON, act, n})] \quad (17)$$

[0133] 수식(9)에서 수식 (15)와 수식 (16)을 사용하여 i 번째 입자의 중요도 가중치는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$[0135] w_n \propto \frac{p(V_{CE, \in, pre, n} | V_{CE, ON, pre, n}^i)}{q(V_{CE, ON, act, n} | \mu_n)} \quad (18)$$

[0137] B. 잔여 유효 수명의 추정

[0138] 도 8은 본 개시의 일 실시예에 따라 보조 입자 필터링 기반 잔여 유효 수명을 추정하는 방법을 도시하는 흐름도이다.

[0139] 우선, 모델 (1)과 모델 (2)는 IGBT의 실험 데이터와 적절한 중요성 PDF로부터 선택되었다. 재판 모델과 중요성 지수 PDF가 예측된다. 이러한 예측 된 값이 측정 값과 비교되고 모델은 그러한 측정 값에 따라 조정될 수 있다. N 개의 $V_{CE, ON}$ 의 궤적이 조정된 모델에 따라 시뮬레이션될 수 있다. RUL은 이러한 궤도에서 임계 값에 도달하는 데 걸리는 시간을 계산할 수 있다. 시간 n에서 RUL은 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$[0140] RUL_n = n_f - n \quad (19)$$

[0141] 여기서 RUL_n 는 시간 n에서 추정 된 RUL이고, n_f 는 현재 시간 n에서 결함 전구체의 임계 $V_{CE, ON}$ 에 도달하는 시간이다.

[0142] 도 9는 본 개시의 일 실시예에 따라 시간 n에서 잔여 유효 수명 추정값을 도시하는 그래프이다.

[0143] 도 9에 도시된 바와 같이, 각 입자에 대해 결함 전구 물질의 궤도를 시뮬레이션할 수 있다. 첫 번째 입자의 경우, RUL은 $RUL_n^1 = n_1 - n$ 이고; N 번째 입자의 경우, 실제 RUL은 $RUL_r = n_r - n$ 이다. 여기서,는 테스트중인 IGBT가 실제로 실패한 실제 시간이다.

[0144] 상태 전이 모델 및 측정 모델은 샘플링 인스턴스에서 AR 방법을 사용하여 업데이트 할 수 있다. 궤도의 투영이 업데이트 된 모델에 따라 수정될 수 있다. IGBT가 새로운 영역에 진입 할 때 리샘플링 단계가 빈번하게 발생한다는 것이 관찰된다. 그 후 APF는 고밀도 영역의 거의 모든 입자로 궤도 추적을 계속한다. 이 기간 동안 입자는 거의 같은 무게를 가지고 있다. 따라서, 입자의 가중치는 (20)에서 단순화를 위해 동일하게 고려된다.

[0145] RUL 추정의 오류(error)는 성능 비교의 척도이다. 일반적으로 평균 절대 오차 (MAE)는 오차 분포가 일정하지 않을 때 RMSE가 사용되는 곳에 오차가 일정하게 분포될 때 사용될 수 있다. 또한 MAE가 이상 치의 영향을받지 않는 이상치의 영향을 RMSE 결과로 나타낼 수 있다. 이러한 이점 때문에 RMSE가 더 적합할 수 있다. RUL 추정의 오류는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$[0146] Error = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{N=1}^N (RUL_r - RUL^i)^2} \quad (20)$$

[0148] 여기서 실제 RUL_r 은 실제 RUL이고, RUL^i 는 중요도 밀도 함수에서 추출한 i 번째 입자에 대해 추정된 RUL이다.

[0150] C. 보조 입자 필터링의 조건 기반 응용

[0151] APF 기반 RUL 추정의 정확도를 향상시키기 위해 IGBT의 근사화 된 조건을 기반으로 APF가 적용됩니다. IGBT의 열화 및 조건과 그에 따른 VCE, ON의 변화는 정상 영역, 일정 증가 영역 및 지수 증가 영역 등 3 가지 영역으로

분류될 수 있다.

[0153] 1) 영역 1 (정상 영역) : 새로운 IGBT가 작동을 시작할 때, 변화는 매우 사소한 것이다. 이 영역의 추세선의 기울기는 거의 제로다. 이 영역에서의 상태 전이 방정식은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

[0155]
$$V_{CE,ON,pre,n} = V_{CE,ON,pre,n-1} + v_{n-1} \quad (21)$$

[0157] $V_{CE,ON,pre,0}$ 의 초기 PDF는 $p(V_{CE,ON,pre,0}) \sim N(1.95, 0.12)$ 이며, $p(v_0) \sim N(0, 0.12)$. $p(V_{CE,ON,pre,0})$ 의 평균값은 데이터 시트의 IGBT 온 상태 전압이다.

[0158] 2) 영역 2 (상수 변경 영역(Constant Change Region)) : 이 영역에서 $V_{CE,ON}$ 은 선형적으로 증가한다. 이 영역은 IGBT의 열화를 나타낸다. 이 영역의 경향 선의 기울기는 양의 값을 갖지만 기울기의 변화는 0 또는 작은 값이다. 이 영역에서의 상태 전이 방정식은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

[0159]
$$V_{CE,ON,pre,n} = V_{CE,ON,pre,n-1} + a\Delta n + v_{n-1} \quad (22)$$

[0161] 여기서 a는 추세선의 기울기이다. 가장 적절한 추세선의 계수는 이전 20 포인트를 사용하여 추정될 수 있다. 영역 2에서의 공정 잡음의 초기 PDF는 $N(0, 0.14)$ 이다.

[0162] 3) 영역 3 (지수 변화 영역) : 이 영역에서 기하 급수적으로 증가하고 스위치 실패를 나타내는 임계 값에 도달한다. 추세선의 기울기는 이 영역에서 급속하게 변화하고 있다. 상태 전이 방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

[0164]
$$V_{CE,ON,pre,n} = \frac{1}{l} \sum_{l=1}^p V_{CE,ON,pre,n-l} \exp[(b^p + c)\Delta n] + v_{n-1} \quad (23)$$

[0166] 여기서 b와 c는 AR 모델의 계수이고 l은 역방향 데이터이다. 마르코프 추정에 따르면, l은 1로 설정되고, $l = 1$, $p = 1$, $c = 0$ 이다. b의 값은 최소 알카이케(Alkaike) 정보 기준을 사용하여 추정된다. 영역 3의 프로세스 노이즈의 초기 PDF는 $N(0, 0.15)$ 이다. IGBT의 측정 모델은 다음과 같다.

[0167]
$$V_{CE,ON,act,n} = (l - d^l) V_{CE,ON,pre,n} + m_n \quad (24)$$

[0168] 여기서 d는 상수이다. d의 값은 AR 모델에 의존한다. 본 개시에서는 1 단계 예측 모델을 사용하여 $l = 1$ 과 $d = 0$ 을 얻었다. 초기 측정 잡음의 PDF는 $N(0, 0.34)$ 이다. IGBT는 $V_{CE,ON}$ 이 초기 값의 2 % 증가 할 때까지 영역 1에 남아 있으며 VCE가 초기 값의 5 %까지 일정하게 증가한 다음 $V_{CE,ON}$ 이 기하 급수적으로 증가하는 영역 3에 들어간다. 본 개시에서는 이러한 $V_{CE,ON}$ 궤적의 세분화를 기반으로 APF를 적용할 수 있다.

[0169] 잡음 분포는 중심 극한 정리(central limit theorem) 하에서 가우시안이라고 가정할 수 있다. 중심 극한 정리는 입자 수가 30 보다 큰 경우 잡음을 가우스 잡음으로 모델링 할 수 있음을 나타낸다. 이 가정은 계산 시간을 향상시키고 RUL 추정에서 동등한 성능을 제공할 수 있다.

[0171] 본 개시에서는 APF에 기반한 IGBT의 고정밀 RUL 추정 방법을 소개했다. 이는 제안 된 APF 방법이 RUL 추정에서 SIR PF보다 우수한 성능을 나타냄을 보여준다. 이는 APF가 적용될 때 RUL 추정의 RMS 오류가 22%에서 17.8%로 감소함을 나타낸다. APF의 적용을 토대로, $V_{CE,ON}$ 의 궤도가 세 영역으로 세분화될 수 있음을 보여줍니다. 영역 1은 일정한 경향을 나타내지만 영역 2는 선형 증가 경향을 나타낸다. 영역 3은 VCE의 기하 급수적인 증가를 나타낸다.

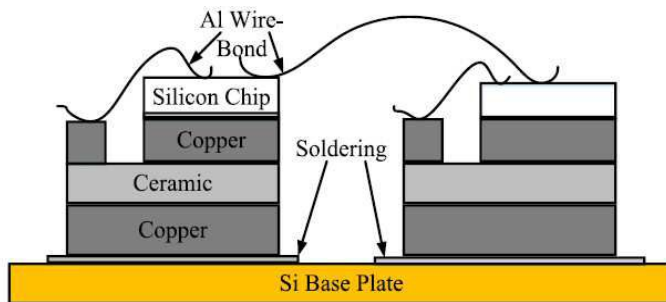
[0172] $V_{CE, ON}$ 이 영역 3에 들어갈 때 APF를 적용함으로써 APF 방법을 이용한 RUL 추정이 크게 향상됨을 알 수있다. 또한 APF 방법의 성능은 영역 3에 적용할 때 RUL 추정에서 80%까지 개선될 수 있음을 보여준다. 낮은 계산 시간을 갖는 샘플에서 입자를 감소시키고 다양성을 증가시키는 능력으로, 제안된 방법은 업계의 다른 전력 스위치의 정확한 RUL 추정에 적용될 수 있다.

[0173] 당업자라면 알 수 있듯이, 본 발명이 본 명세서에 기술된 예시에 한정되는 것이 아니라 본 발명의 범주를 벗어나지 않는 범위 내에서 다양하게 변형, 재구성 및 대체될 수 있다. 본 명세서에 기술된 다양한 기술들은 하드웨어 또는 소프트웨어, 또는 하드웨어와 소프트웨어의 조합에 의해 구현될 수 있음을 알아야 한다.

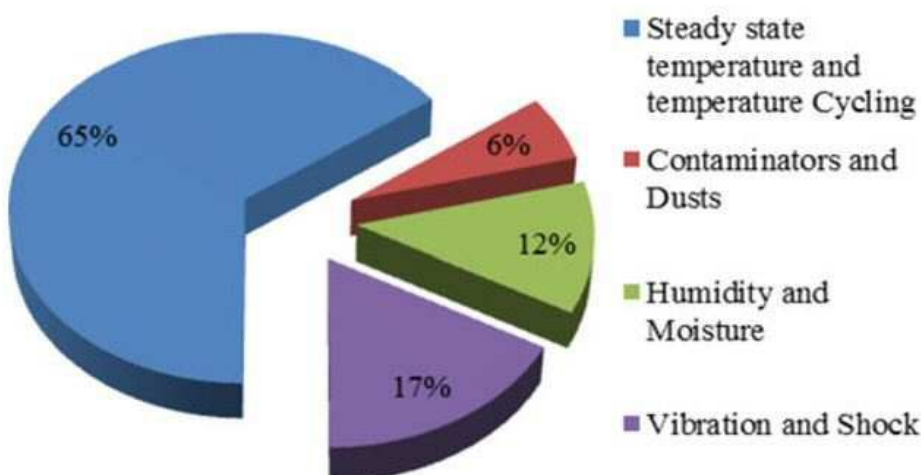
[0174] 본 발명의 일 실시예에 따른 컴퓨터 프로그램은, 컴퓨터 프로세서 등에 의해 판독 가능한 저장 매체, 예컨대 EPROM, EEPROM, 플래시 메모리장치와 같은 비휘발성 메모리, 내장형 하드 디스크와 착탈식 디스크 같은 자기 디스크, 광자기 디스크, 및 CDROM 디스크 등을 포함한 다양한 유형의 저장 매체에 저장된 형태로 구현될 수 있다. 또한, 프로그램 코드(들)는 어셈블리어나 기계어로 구현될 수 있다. 본 발명의 진정한 사상 및 범주에 속하는 모든 변형 및 변경을 이하의 특허청구범위에 의해 모두 포괄하고자 한다.

도면

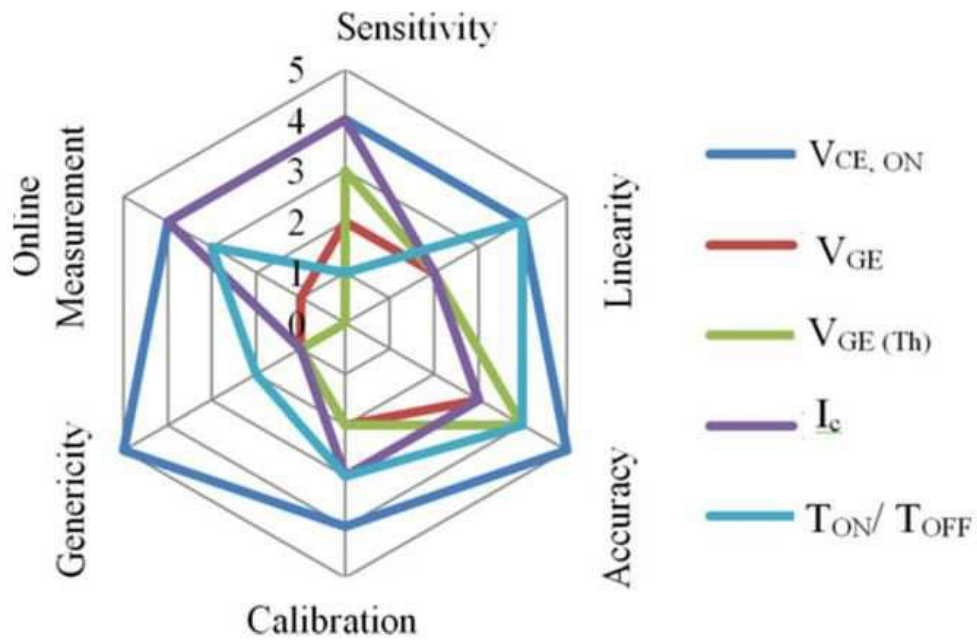
도면1



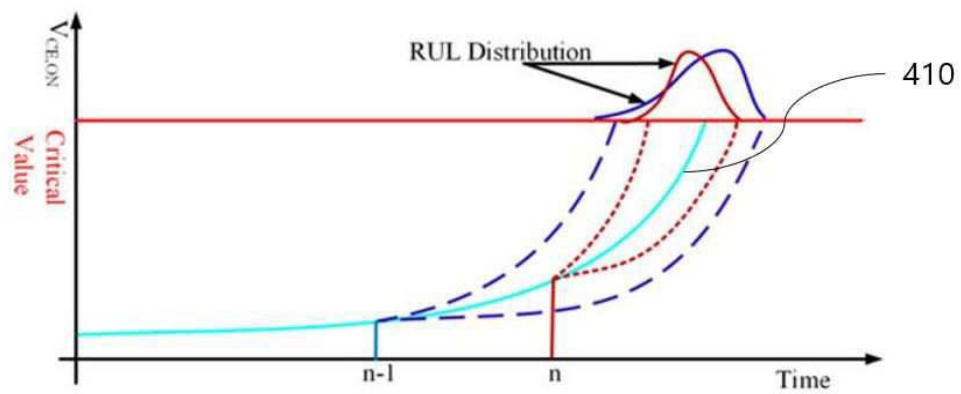
도면2



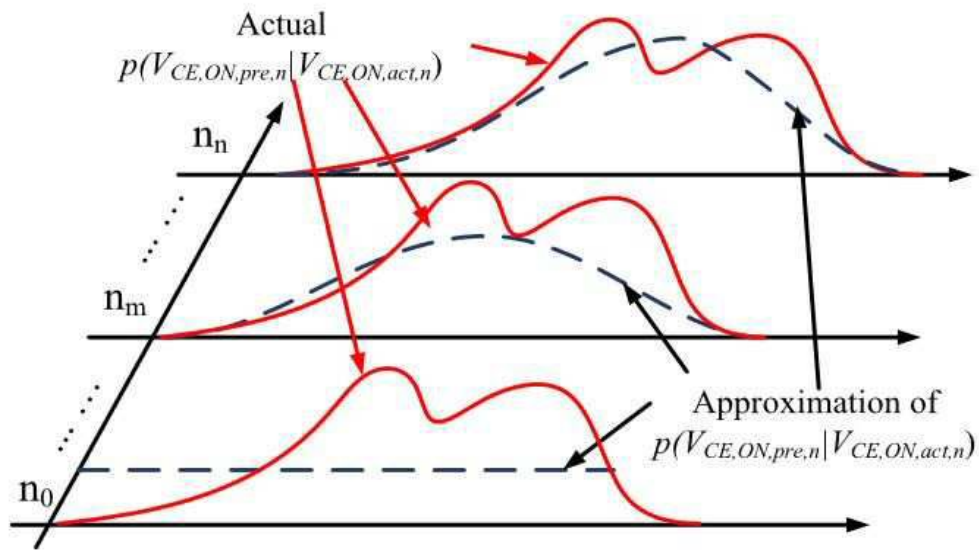
도면3



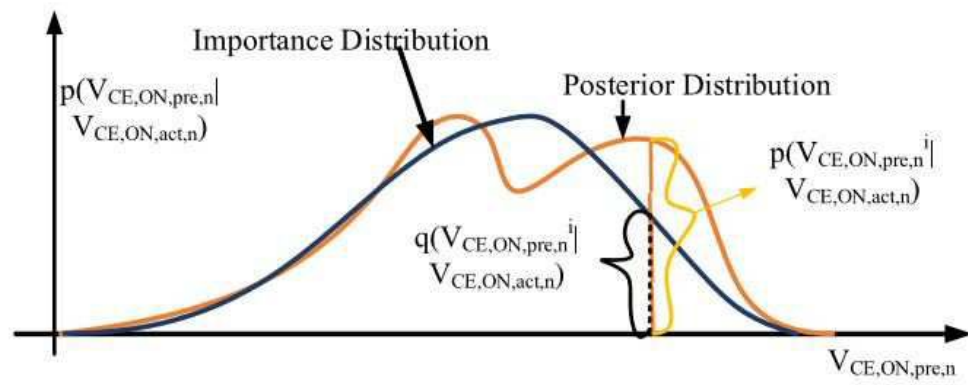
도면4



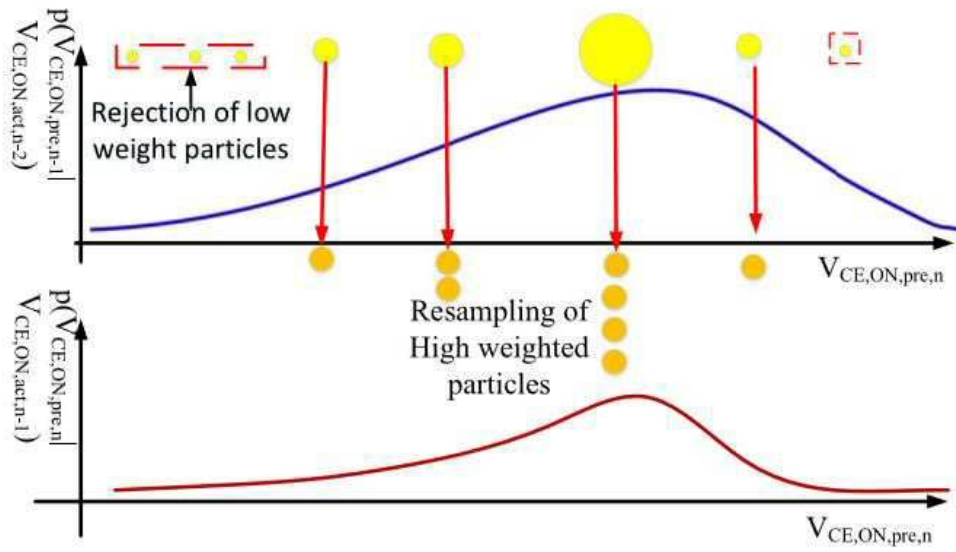
도면5



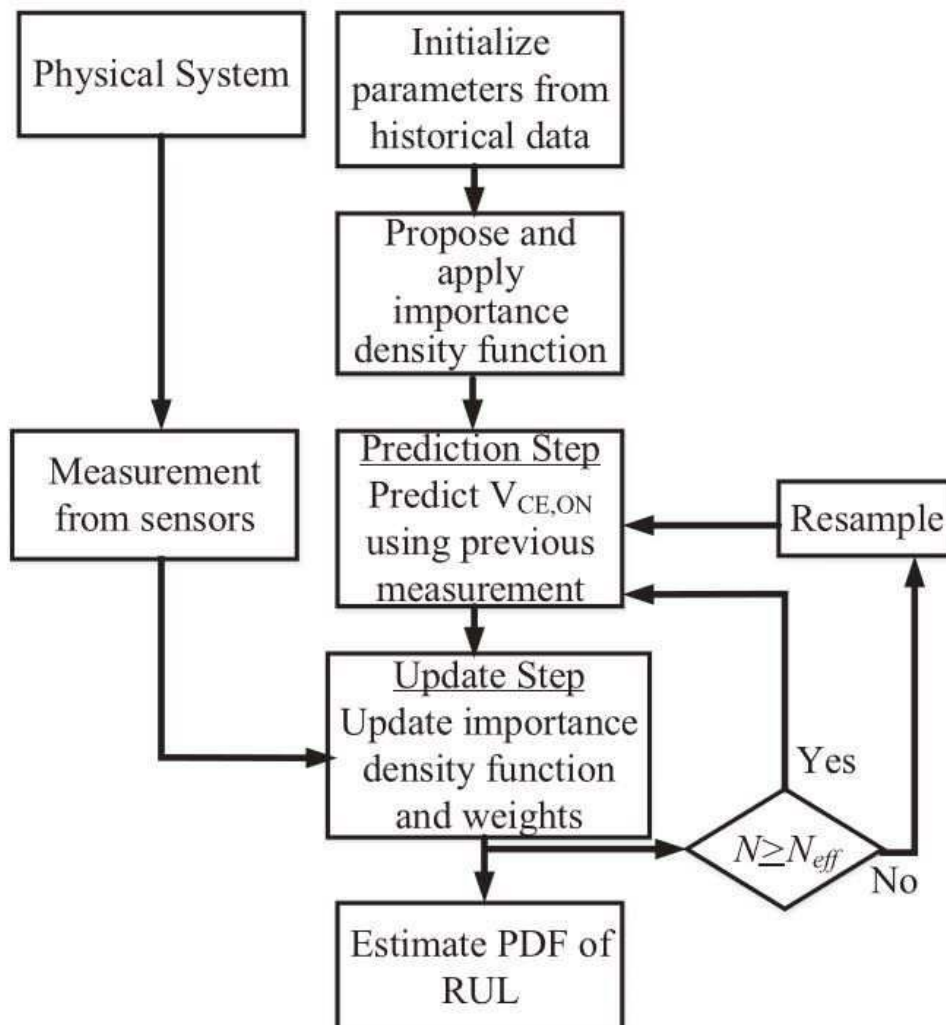
도면6



도면7



도면8



도면9

