(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0054523
(43) 공개일자 2025년04월23일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 33/02 (2006.01) *G01R 13/20* (2006.01)
G01R 15/18 (2006.01) *G01R 19/165* (2006.01)
G01R 33/12 (2006.01) *H01F 3/14* (2006.01)
H01F 38/30 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 33/02 (2021.05)
G01R 13/20 (2021.05)
(21) 출원번호 10-2023-0137862
(22) 출원일자 2023년10월16일
심사청구일자 2023년10월16일

(71) 출원인
국립한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
주식회사 코아칩스
경기도 수원시 권선구 오목천로132번길 33, 415호 (고색동, 휴먼스카이밸리)
(72) 발명자
송지환
서울특별시 성북구 길음로9길 50 길음뉴타운 906동 302호
이제윤
서울특별시 서초구 효령로 164 신동아아파트 2동 1112호
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인도담

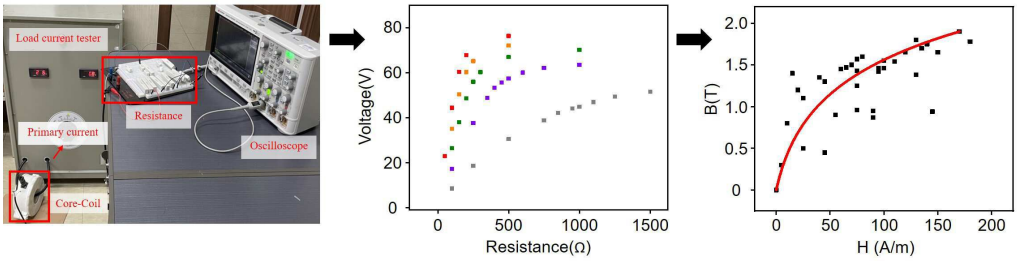
전체 청구항 수 : 총 9 항

(54) 발명의 명칭 **에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 설계 방법**

(57) 요 약

본 발명은, 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법 및 이를 이용한 변류기 코어의 설계 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, 변류기 코어의 다양한 저항 및 전류 조건하에서의 측정된 전압 데이터를 기반으로 B-H 커브를 간단히 예측할 수 있는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법 및 이를 이용한 변류기 코어의 설계 방법에 관한 것이다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G01R 15/18 (2013.01)
G01R 19/16528 (2013.01)
G01R 33/1223 (2013.01)
H01F 3/14 (2013.01)
H01F 38/30 (2013.01)

(72) 발명자
이명서
전라북도 전주시 완산구 용머리로 194 효자주공아파트3단지 119동 502호

김민중
대전광역시 유성구 학하서로 140-7 304호

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1615012593
과제번호	164547
부처명	국토교통부
과제관리(전문)기관명	국토교통과학기술진흥원
연구사업명	철도 배전선로 케이블 무전원 무선 안전 감시 기술 개발
연구과제명	철도시설물 전력설비 배전선로에 대한 무전원·무선 안전감시 기술 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	(주)코아칩스
연구기간	2023.01.01 ~ 2023.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

부하 전류 테스터를 사용하여 도전선에 일차 전류가 인가되는 테스트 전류 인가 단계;

상기 도전선이 통과되는 변류기(CT: Current transformer) 코어의 코일에 이차 전류가 유도되면 상기 코일에 연결된 저항으로부터 전압이 발생되고, 상기 전압이 오실로스코프에 의해 취득되는 전압 측정 단계;

복수의 저항 및 전류 조건에서 상기 전압 측정 단계가 실시되어 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터가 누적되는 전압 데이터 획득 단계;

상기 전압 데이터 획득 단계의 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터를 기반으로 추세선 형태의 B-H 커브가 획득되는 B-H 커브 획득 단계;

를 포함하는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 B-H 커브 획득 단계는,

설정 전류하의 복수의 상대 투자율 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계;

상기 전압 데이터 획득 단계의 전압 데이터와 상기 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계의 시뮬레이션 전압 데이터가

$$F(b)=F(c)+\frac{F(a)-F(c)}{a-c}(b-c)$$

F(a), F(c): 서로 다른 상대 투자율 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터

F(b): 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터

a, b, c: 상대 투자율 조건

의 식을 통해 계산되어 상기 코어의 복수의 저항 조건에 대한 상대 투자율이 산출되는 상대 투자율 산출 단계;

를 포함하는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법.

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 B-H 커브 획득 단계는,

복수의 자속밀도 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계;

상기 전압 데이터 획득 단계의 전압 데이터와 상기 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계의 시뮬레이션 전압 데이터가

$$F(b)=F(c)+\frac{F(a)-F(c)}{a-c}(b-c)$$

F(a), F(c): 서로 다른 자속밀도 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터

F(b): 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터

a, b, c: 자속밀도 조건

의 식을 통해 계산되어 상기 코어의 복수의 저항 조건에 대한 자속밀도가 산출되는 자속밀도 산출 단계;

를 포함하는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법.

청구항 4

제3항에 있어서,

상기 B-H 커브 획득 단계는,

상기 상대 투자율 산출 단계와 상기 자속밀도 산출 단계에서 얻어진 복수의 저항 조건에 대한 상대 투자율 및 자속밀도가,

$B = \mu_r \mu_0 H$

B: 자속밀도

μ_r*: 상대 투자율*

μ_0*: 공간 투자율(≒*$4\pi * 10^{-7}$*H/m)*

H: 자계강도

의 식을 통해 계산되어 자계강도가 산출되는 자계강도 산출 단계;

를 포함하는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법.

청구항 5

제4항에 있어서,

상기 B-H 커브 획득 단계는,

복수의 설정 전류하에서 상기 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 상기 상대 투자율 산출 단계, 상기 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 상기 자속밀도 산출 단계, 상기 자계강도 산출 단계를 수행하여, 복수의 설정 전류하에서 자속밀도와 자계강도의 매칭 데이터가 취득되는 B-H 매칭 데이터 취득 단계;

상기 B-H 매칭 데이터 취득 단계에서 취득된 자속밀도와 자계강도의 매칭 데이터를 토대로 추세선 형태의 B-H 커브를 획득하는 추세선 획득 단계;

를 포함하는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법.

청구항 6

스플릿 코어 형태의 변류기의 복수의 공극(air gap) 조건하에서 제5항의 상기 테스트 전류 인가 단계, 상기 전압 측정 단계, 상기 전압 데이터 획득 단계 및 상기 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 공극 조건에 대한 자속 밀도가 획득되는 공극 분석 단계;

를 포함하는 변류기 코어의 설계 방법.

청구항 7

제6항에 있어서,

링 코어 형태의 변류기 대비 설정 비율 이상의 유사도를 보여주는 스플릿 코어 형태의 변류기의 공극은 6um 이하인 변류기 코어의 설계 방법.

청구항 8

변류기 코어의 복수의 외경, 복수의 내경 및 복수의 높이 조건하에서 제5항의 상기 테스트 전류 인가 단계, 상기 전압 측정 단계, 상기 전압 데이터 획득 단계 및 상기 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 외경, 복수의 내경 및 복수의 높이 조건에 대한 B-H 커브가 획득되고, 획득된 B-H 커브를 이용하여 최대 전력이 계산되는 코어 형상별 최대 전력 산출 단계;를 포함하는 변류기 코어의 설계 방법.

청구항 9

제8항에 있어서,

상기 변류기 코어의 내경에 대한 외경의 비가 높을수록 최대 전력이 높게 형성되는 변류기 코어의 설계 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은, 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법 및 이를 이용한 변류기 코어의 설계 방법에 관한 것으로서, 더욱 상세하게는, 변류기 코어의 다양한 저항 및 전류 조건하에서의 측정된 전압 데이터를 기반으로 B-H 커브를 간단히 예측할 수 있는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법 및 이를 이용한 변류기 코어의 설계 방법에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0003] 에너지 하베스팅(Energy harvesting)은 자연 또는 외부로부터 유실되는 에너지를 변환하여 소형 전기 장치에 에너지를 저장하고 사용하는 과정을 뜻한다. 에너지 하베스팅은 장치에 지속 가능한 전력을 공급하는 방법으로 무선 센싱 분야에서 주목을 받고 있다. 무선 감지 장치는 온도, 구조적 변형 및 전기 부하와 같은 조건을 모니터링하기 위해 변전소, 전력선 및 건물과 같은 구조물에 사용된다.

[0004] 일반적으로 사용되는 에너지 하베스팅 방법에는 태양광 발전기, 풍력 발전기, 압전, 진동, 자기장과 같은 에너지원이 포함된다. 그러나, 태양광 및 풍력 발전기는 기상 조건에 크게 의존하기 때문에 지속 가능한 전력 공급에 어려움이 있고, 진동 에너지나 압전 에너지 하베스터는 기상 조건의 영향을 받지 않는 대신 특정 조건이 충족되지 않으면 생성되는 전력 밀도가 감소하는 단점이 있다.

[0005] 따라서, 기상 조건에 영향을 미치지 않으며 동작을 위한 조건이 까다롭지 않은 변류기(CT: Current transformer) 방식의 에너지 하베스터가 개발되었다. 변류기 방식의 에너지 하베스터는 전력선의 외주를 코어로 감싸 전력선의 주변에 발생되는 전자기장을 이용하여 유도 기전력을 통해 전력을 생성하는 방식을 사용하며, 이에 따라 기상 조건의 영향을 받지도 않고 전력선에 교류의 전기가 흐르기만 하면 고밀도의 전기 에너지를 수확할 수 있게 된다. 이러한 장점을 바탕으로 전력선 주변의 유지보수, 조명기기와 같은 저전력 장치에 변류기 기반의 에너지 하베스팅 장치가 적용되고 있다.

[0006] 이러한 변류기는 다양한 분야에서 전력원으로서 필수적인 역할을 한다. 따라서, 고성능 변류기를 설계하려면 재료의 자기 거동을 이해하는 것이 중요하며, 재료의 자기 거동과 밀접하게 일치하는 B-H(자속밀도 B, 자계의 세기 H)커브를 정확하게 예측하는 것이 무엇보다 중요하다.

[0007] 초기 단계에서는 B-H커브를 멱급수와 지수 및 쌍곡선 함수와 같은 간단한 함수를 사용하여 근사화하는 시도가 있었다. 그러나, 이러한 단일 피팅 함수는 B-H커브의 전체 영역을 효과적으로 근사화할 수 없었고, 따라서, B-H

커브는 각 구간에 적절한 함수를 적용하여 스플라인 곡선으로 나누어 적용하였다. 또한, 정확한 B-H커브를 얻기 위해 퍼지 모델을 기반으로 한 예측 방법이 제안되었으나, 이 절차는 복잡한 규칙과 사용자의 주관적 판단에 의존하는 등 몇 가지 제한 사항이 있는 문제가 있었다.

[0008] 이러한 문제를 해결하기 위하여, 진동시료 자력계(VSM) 또는 Epstein squares 등의 실험장비를 개선하여 정확한 B-H커브를 얻을 수 있게 되었다. 그러나VSM 장비는 비싸고 작동 중 온도와 같은 실험 조건을 유지하기 위한 추가 제어 장치가 요구되는 문제가 있었다. Epstein squares는 자기장 생성 능력으로 인해 2T(Tesla) 영역에서 신뢰에 한계를 갖는 문제가 있었다.

[0009] 따라서, 값비싼 실험 장비를 구비하지 않고도 간단한 측정 장치만으로 B-H커브를 소정 이상의 근사치로 도출할 수 있고, 이 과정에 사용자의 주관적 판단을 배제할 수 있는 B-H커브 도출 방법의 창안이 필요로 하게 되었다.

선행기술문헌

특허문헌

[0011] (특허문헌 0001) 한국등록특허공보 제10-2180016호(2020.11.11)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명은, 변류기 코어의 다양한 저항 및 전류 조건하에서의 측정된 전압 데이터를 기반으로 B-H 커브를 간단히 예측할 수 있는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0013] 또한, 본 발명은, 간단한 과정으로 예측된 B-H 커브가 변류기 코어의 실제 B-H 커브에 비하여 비교적 적은 오차율을 나타내는 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0014] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 스플릿 코어가 링 코어와 유사한 효율을 내는 공극의 범위를 설계할 수 있는 변류기 코어의 설계 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0015] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 최대 전력이 산출되는 변류기 코어의 형상을 설계할 수 있는 변류기 코어의 설계 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

과제의 해결 수단

[0017] 본 발명은, 부하 전류 테스터를 사용하여 도전선에 일차 전류가 인가되는 테스트 전류 인가 단계; 상기 도전선이 통과되는 변류기(CT: Current transformer) 코어의 코일에 이차 전류가 유도되면 상기 코일에 연결된 저항으로부터 전압이 발생되고, 상기 전압이 오실로스코프에 의해 취득되는 전압 측정 단계; 복수의 저항 및 전류 조건에서 상기 전압 측정 단계가 실시되어 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터가 누적되는 전압 데이터 획득 단계; 상기 전압 데이터 획득 단계의 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터를 기반으로 추세선 형태의 B-H 커브가 획득되는 B-H 커브 획득 단계;를 포함한다.

[0018] 또한, 본 발명의 상기 B-H 커브 획득 단계는, 설정 전류하의 복수의 상대 투자율 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계; 상기 전압 데이터 획득 단계의 전압 데이터와 상기 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계의 시뮬레이션 전압 데이터가

[0019] $$F(b)=F(c)+\frac{F(a)-F(c)}{a-c}(b-c)$$

[0020] *F(a), F(c): 서로 다른 상대 투자율 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터, F(b): 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터, a, b, c: 상대 투자율 조건* 의 식을 통해 계산되어 상기 코어의 복수의 저항 조건에 대한 상대 투자율이 산출되는 상대 투자율 산출 단계;를 포함한다.

[0021] 또한, 본 발명의 상기 B-H 커브 획득 단계는, 복수의 자속밀도 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계; 상기 전압 데이터 획득 단계의 전압 데이터와 상기 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계의 시뮬레이션 전압 데이터가

[0022] $$F(b)=F(c)+\frac{F(a)-F(c)}{a-c}(b-c)$$

[0023] *F(a), F(c): 서로 다른 자속밀도 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터, F(b): 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터, a, b, c: 자속밀도 조건* 의 식을 통해 계산되어 상기 코어의 복수의 저항 조건에 대한 자속밀도가 산출되는 자속밀도 산출 단계;를 포함한다.

[0024] 또한, 본 발명의 상기 B-H 커브 획득 단계는, 상기 상대 투자율 산출 단계와 상기 자속밀도 산출 단계에서 얻어진 복수의 저항 조건에 대한 상대 투자율 및 자속밀도가,

[0025] $$B=\mu_r \mu_0 H$$

[0026] *B: 자속밀도, μ_r: 상대 투자율, μ_0: 공간 투자율($\fallingdotseq 4\pi*10^{-7}$H/m), H: 자계강도* 의 식을 통해 계산되어 자계강도가 산출되는 자계강도 산출 단계;를 포함한다.

[0027] 또한, 본 발명의 상기 B-H 커브 획득 단계는, 복수의 설정 전류하에서 상기 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 상기 상대 투자율 산출 단계, 상기 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 상기 자속밀도 산출 단계, 상기 자계강도 산출 단계를 수행하여, 복수의 설정 전류하에서 자속밀도와 자계강도의 매칭 데이터가 취득되는 B-H 매칭 데이터 취득 단계; 상기 B-H 매칭 데이터 취득 단계에서 취득된 자속밀도와 자계강도의 매칭 데이터를 토대로 추세선 형태의 B-H 커브를 획득하는 추세선 획득 단계;를 포함한다.

[0028] 또한, 본 발명은, 스플릿 코어 형태의 변류기의 복수의 공극(air gap) 조건하에서 상기 테스트 전류 인가 단계, 상기 전압 측정 단계, 상기 전압 데이터 획득 단계 및 상기 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 공극 조건에 대한 자속 밀도가 획득되는 공극 분석 단계;를 포함한다.

[0029] 또한, 본 발명의 링 코어 형태의 변류기 대비 설정 비율 이상의 유사도를 보여주는 스플릿 코어 형태의 변류기의 공극은 6um 이하이다.

[0030] 또한, 본 발명은, 상기 변류기 코어의 복수의 외경, 복수의 내경 및 복수의 높이 조건하에서 상기 테스트 전류 인가 단계, 상기 전압 측정 단계, 상기 전압 데이터 획득 단계 및 상기 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 외경, 복수의 내경 및 복수의 높이 조건에 대한 B-H 커브가 획득되고, 획득된 B-H 커브를 이용하여 최대 전력이 계산되는 코어 형상별 최대 전력 산출 단계;를 포함한다.

[0031] 또한, 본 발명의 상기 변류기 코어의 내경에 대한 외경의 비가 높을수록 최대 전력이 높게 형성된다.

발명의 효과

[0033] 본 발명은, 변류기 코어의 다양한 저항 및 전류 조건하에서의 측정된 전압 데이터를 기반으로 B-H 커브를 간단히 예측할 수 있는 효과가 있다.

[0034] 또한, 본 발명은, 간단한 과정으로 예측된 B-H 커브가 변류기 코어의 실제 B-H 커브에 비하여 비교적 적은 오차율을 나타내는 효과가 있다.

[0035] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 스플릿 코어가 링 코어와 유사한 효율을 내는 공극의 범위를 설계할 수 있는 효과가 있다.

[0036] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 최대 전력이 산출되는 변류기 코어의 형상을 설계할 수 있는 효과가 있다.

도면의 간단한 설명

[0038] 도1은 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 B-H 커브 도출 과

정을 도시한 예시도.

도2는 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 자속밀도 및 전력 분석 예시도.

도3은 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 변류기 코어의 사시도 및 평면도.

도4는 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 상대 투자율 산출 단계를 도시한 예시도.

도5는 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 자속밀도 산출 단계를 도시한 예시도.

도6은 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 추세선 획득 단계를 도시한 예시도.

도7은 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 B-H 커브를 사용한 코어 전력과 시뮬레이션의 코어 전력을 비교 도시한 그래프.

도8은 본 발명의 실시예에 따른 에너지 하베스팅을 위한 변류기 코어의 B-H 커브 도출 방법의 실험적으로 예측된 B-H 커브를 사용한 코어 전력과 시뮬레이션을 통해 획득된 코어 전력의 오차율을 산출한 그래프.

도9는 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 복수의 코어 형상 조건에 대한 최대 전력을 도시한 그래프.

도10은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 복수의 코어 형상 조건하의 복수의 저항 조건하에서의 전력 그래프.

도11은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 복수의 코어 체적 조건하의 최대 전력을 도시한 그래프.

도12는 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 변류기 코어의 복수의 내경에 대한 외경의 비율을 도시한 그래프.

도13은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 복수의 공극 조건에 대한 자속밀도 분포의 시뮬레이션 결과를 도시한 예시도.

도14는 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 복수의 전류 및 저항 조건 및 복수의 공극 조건하에서의 전력 그래프.

도15는 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 스플릿 코어의 단위 면적 표면 특성 측정을 위한 측정 포인트의 예시도.

도16은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 스플릿 코어의 표면 특성을 도시한 예시도.

도17은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 링 코어와 단면이 연마된 스플릿 코어의 최대 전력 차이 비교 그래프.

도18은 본 발명의 실시예에 따른 변류기 코어의 설계 방법의 다양한 코어 형상에 대한 공극의 영향을 도시한 그래프.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0039] 이하에서, 본 발명의 실시예에 대하여 첨부한 도면을 참조하여 상세히 설명한다.

[0041] 본 발명은, 부하 전류 테스터를 사용하여 도전선에 일차 전류가 인가되는 테스트 전류 인가 단계와, 도전선이 통과되는 변류기(CT: Current transformer) 코어의 코일에 이차 전류가 유도되면 코일에 연결된 저항으로부터 전압이 발생되고 전압이 오실로스코프에 의해 취득되는 전압 측정 단계와, 복수의 저항 및 전류 조건에서 전압 측정 단계가 실시되어 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터가 누적되는 전압 데이터 획득 단계와, 전압 데이터 획득 단계의 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터를 기반으로 추세선 형태의 B-H 커브가 획

득되는 B-H 커브 획득 단계를 포함하여 구성된다.

[0044] 우선, 도1에는 변류기 코어의 B-H커브를 획득하는 과정이 도시되어 있다. 부하 전류 테스터를 사용하여 도전선에 일차 전류가 인가되는 테스트 전류 인가 단계가 수행되면, 도전선이 통과하는 변류기 코어의 코일에 이차 전류가 유도된다. 이후 코일에 연결된 저항에 이차 전류가 통과되면 전압이 발생된다. 그리고, 이 전압이 오실로스코프에 의해 측정되어 취득되는 전압 측정 단계가 수행된다.

[0045] 이후, 복수의 저항 및 전류 조건에서 전압 측정 단계가 반복 수행되어 복수의 저항 및 전류 조건에 대한 전압 데이터가 누적되는 전압 데이터 획득 단계가 수행된다.

[0046] 마지막으로 전압 데이터 획득 단계에서 누적된 복수의 전류 및 저항 조건에 대한 전압 데이터를 기반으로 추세선 형태의 B-H커브가 획득되는 B-H 커브 획득 단계가 수행된다.

[0047] 이렇게 도출된 B-H커브를 이용하여 다양한 전류 및 저항 조건에 대한 전자기장 분석을 수행할 수 있고, 이 분석을 기반으로 도2와 같은 자속 밀도 및 전력 분포와 같은 코어의 성능의 분석이 가능하다. 이때, 취득된 전압 데이터 및 이러한 전압 데이터의 조건인 저항 및 전류의 값이 저장되고, 저장된 전압 데이터를 이용하여 B-H 커브를 획득하는 주체는 PC, 랩탑, 태블릿 등의 연산 장치가 구비된 단말 기기로부터 수행될 수 있다.

[0049] B-H 커브 획득 단계는 다시 여러 단계의 세부 단계로 구분되어 B-H 커브가 획득되도록 구성된다. 이를 좀 더 상세히 설명하면, 우선, 설정 전류하의 복수의 상대 투자율 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계가 수행된다. 이를 위하여 ANSYS Maxwell 3D를 사용하여 전자기 시뮬레이션을 수행하였다.

[0050] 시뮬레이션에 적용된 링 코어는 실리콘강으로 만들어진 원통형으로 모델링되었으며, 도3과 같이 외부 반경 R_o는 62.5mm, 내부 반경 R_i는 37.5mm, 높이 h는 60mm로 설정되었다. 적용될 입력 전류는 10A에서 50A까지이며, 100회권선을 기준으로 60Hz의 주파수가 적용되었다.

[0051] 도4에는 10A에서 50A의 입력 전류 조건 중 우선 입력 전류가 10A일 때 코어의 상대 투자율 μ_r을 결정하기 위한 상대 투자율 산출 단계의 절차가 도시되어 있다. 시뮬레이션에 적용될 상대 투자율 μ_{r_a}의 값은 5000, 10000, 15000, 20000, 25000으로 가정하여 시뮬레이션에 적용하고, μ_{r_a}를 사용하여 유도 전압 데이터를 획득하였다. 그리고 획득된 유도 전압 데이터와 실험 데이터를 이용하여 코어의 μ_r이 획득될 수 있다.

[0052] 상대 투자율 산출 단계는, 도4와 같이 두 개의 지정된 점에 근거한 수학식1의 보간법을 사용하여 각 저항 조건에서 코어의 μ_r이 산출된다.

수학식 1

[0054] $$F(b)=F(c)+\frac{F(a)-F(c)}{a-c}(b-c)$$

[0055] 여기에서, F(a)와 F(c)는 서로 다른 상대 투자율 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터이고, F(b)는 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터이며, a, b, c: 상대 투자율 조건이다.

[0057] B-H 커브를 획득하기 위해서는 각 전류, 저항 조건하에서의 상대 투자율(μ_r)뿐만아니라, 자속밀도(B)와, 상대 투자율 및 자속밀도를 토대로 산출된 자계강도(H) 데이터가 필요하다.

[0058] 따라서, 복수의 자속밀도 조건하에서 복수의 저항 조건에 대한 시뮬레이션 전압 데이터가 취득되는 자속밀도 시

뮬레이션 데이터 획득 단계가 수행된다.

[0059] 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계에서는, 도5와 같이 시뮬레이션에 적용될 자속밀도 B_a의 값을 0.2, 0.6, 1.0, 1.4, 1.8T로 설정하여 자속밀도 B를 구하였다. 유도 전압은 B_a를 사용하여 획득하였고, 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터를 이용하여 자속밀도 B가 산출될 수 있다. 자속밀도 산출 단계는, 수학식1의 보간법을 사용하여 각 저항 조건에서 자속밀도 B가 산출된다. 자속밀도 산출 단계의 수학식1에서 F(a)와 F(c)는 서로 다른 자속밀도 조건하에서의 시뮬레이션 전압 데이터이고, F(b)는 전압 데이터 획득 단계에서 실험적으로 취득된 전압 데이터이며, a, b, c: 자속밀도 조건으로 적용된다.

[0061] 그리고, 상대 투자율 산출 단계에서 얻어진 상대 투자율 μ_r과 자속밀도 산출 단계에서 산출된 자속밀도 B를 이용하여 자계강도 H가 산출되는 자계강도 산출 단계가 수행된다. 자계강도 산출 단계는 수학식2를 이용하여 계산되며, μ_0는 공간 투자율을 나타내고, 코어의 투자율 μ와의 상관 관계는 $\mu=\mu_r\mu_0$이다. 공간투자율 μ_0는 자유공간에서의 자기장과 자속밀도의 비율을 나타내는 상수이며, 그 값은 약 $4\pi*10^{-7}$H/m이다. 상대 투자율 μ_r은 물질의 자기 투자율을 공간 투자율과 비교했을 때 얼마나 큰지를 나타내는 값이며, 물질의 투자율 μ는 수학식2와 같이 상대 투자율과 공간 투자율의 곱으로 나타낼 수 있다.

수학식 2

[0062] $$B=\mu_r\mu_0 H$$

[0064] 마지막으로, 복수의 설정 전류하에서 투자율 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 상대 투자율 산출 단계, 자속밀도 시뮬레이션 데이터 획득 단계, 자속밀도 산출 단계, 자계강도 산출 단계가 반복 수행되고, 이를 통해 복수의 설정 전류하에서 자속밀도와 자계강도의 매칭데이터가 취득되는 B-H 매칭 데이터 취득 단계가 수행되며, B-H 매칭 데이터 취득 단계에서 취득된 자속밀도와 자계강도의 매칭 데이터를 토대로 추세선 형태의 B-H 커브가 획득되는 추세선 획득 단계가 수행된다.

[0065] 표1 내지 표5는 10A에서 50A까지 10A 단위의 전류에 대해 유도된 μ, B 및 H의 결과가 기재되어 있다. 그리고 도6에는 이러한 B 및 H를 하나의 그래프에 통합하여 도시하고, 이를 통해 B-H 커브가 획득된 결과가 도시되어 있다.

표 1

[0067]

Resistance(Ω)	B(T)	μ(H/m)	H(A/m)
100	0.312024	0.010098365	30.89842832
250	0.490094	0.015726055	31.16445704
500	0.802388	0.02119596	37.8557054
750	0.974049	0.024722639	39.39906748
850	1.114388	0.026409327	42.19677319
950	1.187652	0.027111434	43.79894321
1000	1.211986	0.027355333	44.30857888
1100	1.280107	0.028289038	45.25097655
1250	1.350349	0.029278755	46.1204458
1500	1.410778	0.029901527	47.18080565

[0068] <Simulation data for 10A>

표 2

[0070]

Resistance(Ω)	B(T)	μ(H/m)	H(A/m)
100	0.554138	0.009694	57.16586
250	1.027697	0.01564	65.70924
350	1.302964	0.018602	70.04556
400	1.480848	0.019479	76.02242
450	1.512196	0.019335	78.20839
500	1.528276	0.019116	79.94874
600	1.559904	0.018879	82.62645
750	1.585917	0.018555	85.46949
1000	1.609251	0.018197	88.43406

[0071] <Simulation data for 20A>

표 3

[0073]

Resistance(Ω)	B(T)	μ(H/m)	H(A/m)
100	0.740754	0.010446	70.91098
150	1.100415	0.013107	83.95471
200	1.403484	0.015164	92.55102
250	1.559418	0.015318	101.8023
300	1.580451	0.014749	107.1577
500	1.718299	0.013578	126.5475
1000	1.779239	0.013071	136.1242

[0074] <Simulation data for 30A>

표 4

[0076]

Resistance(Ω)	B(T)	μ(H/m)	H(A/m)
100	0.998137	0.010125	98.57907
150	1.542517	0.012713	121.3312
200	1.694261	0.01252	125.3276
250	1.694246	0.011692	144.9111
500	1.823907	0.010495	173.7799

[0077] <Simulation data for 40A>

표 5

[0079]

Resistance(Ω)	B(T)	μ(H/m)	H(A/m)
50	0.73209	0.006627	110.4713
100	1.17501	0.010634	110.4936
150	1.58031	0.011211	140.9569
200	1.75686	0.01011	173.7755
500	1.90784	0.008713	218.9732

[0080] <Simulation data for 50A>

[0082] 도7은 입력 전류 범위가 10A 내지 50A인 경우에 대하여 통합 B-H 커브를 사용한 코어 전력과 시뮬레이션의 코어 전력을 함께 나타낸다. 그 결과 모든 경우에서 시뮬레이션 결과와 실험 데이터의 결과가 유사한 값을 나타내는 것이 확인되었다. 획득된 B-H커브의 유효성은 도8의 곡선 아래 면적의 차이로 얻은 시뮬레이션과 실험 사이의 오차를 계산하여 검증되었고, 그 결과 오차는 약 15%로 추정되었다. 이는 예측된 B-H커브가 고려된 코어의 자화 특성을 효과적으로 반영하고 있음을 나타낸다.

[0085] 한편, 하기에서는 상술한 B-H 커브 도출 방법을 이용한 변류기 코어의 설계 방법에 대해 서술한다.

[0086] 코어 형상에 따른 효과를 분석하기 위하여 R_o, R_i, h와 같은 형상 매개변수를 사용하여 코어를 모델링하였다. 이때, R_o는 코어의 외경, R_i는 코어의 내경, h는 코어의 높이, 즉, 코어의 폭이다. R_o는 45㎜, 50㎜, 55㎜ 의 조건을 적용하였고, R_i는 35㎜, 37.5㎜, 40㎜의 조건을 적용하였으며, h는 55㎜, 60㎜, 65㎜의 조건을 적용하였다.

[0087] 그리고 이러한 조건하에서 테스트 전류 인가 단계, 전압 측정 단계, 전압 데이터 획득 단계 및 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 외경, 복수의 내경 및 복수의 높이 조건에 대한 B-H 커브가 획득되고, 획득된 B-H 커브를 이용하여 최대 전력이 계산되는 코어 형상별 최대 전력 산출 단계가 수행된다.

[0088] 도9는 이러한 최대 전력 산출 단계에 의한 코어의 R_o, R_i 및 h에 대한 최대 전력을 나타낸다. 도10a는 R_o가 45㎜일 때에 R_i 및 h의 조건을 가변시켜가면서 전력을 측정한 그래프이고, 도10b는 R_o가 50㎜일 때에 R_i 및 h의 조건을 가변시켜가면서 전력을 측정한 그래프이며, 도10c는 R_o가 55㎜일 때에 R_i 및 h의 조건을 가변시켜가면서 전력을 측정한 그래프이다. 이러한 각 조건하에서의 최대 전력을 요약하여 도9에 도시하였다. 요약하면, R_o와 R_i가 증가함에 따라, 즉 코어의 둘레가 확장됨에 따라 최대 전력이 증가하는 것이 확인되었다. 그러나, 1-1', 6-6'으로 표기된 부분의 경우에는 코어의 둘레가 확장되었음에도 불구하고 최대 전력의 크기가 역전된 결과가 나타났다. 반전의 원인을 확인하기 위하여 도11과 같이 코어의 볼륨을 계산하고 최대 전력과 비교하였다. 코어의 볼륨, 즉, 체적은 R_o, R_i, h가 증가함에 따라 점진적으로 증가하였다. 즉, 레이블이 지정된 코어는 부피가 작은 코어가 부피가 큰 코어보다 더 높은 최대 전력을 갖는 것을 볼 수 있다. 예를 들어, 1(11.151W)은 1'(10.904W)보다 더 높은 최대 전력을 갖지만, 1(552.920cm3)은 1'(662.035cm3)보다 부피가 작다. 이는 코어의 최대 전력이 코어의 체적에 의존하지 않는다는 것을 의미한다. 이러한 결과는 수학식3과 같이 유도 전압이 코어의 부피만이 아닌 다양한 변수에 따라 달라지는 것으로 설명될 수 있다.

수학식 3

[0089] $$Induced\ Voltage[V] = N*\mu*h*f*I*\ln\left(\frac{R_o}{R_i}\right)$$

[0090] (N:권선밀도, μ:투자율, h:코어 높이, f:유기 전류 주파수, I:전류, R_o:코어의 외경, R_i:코어의 내경)

[0092] 도12는 내경에 대한 외경의 비율인 R_o/R_i를 나타내며, 최대 전력의 비율과 유사한 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다.

[0093] 이러한 변수 중 코어의 높이 h와, 내경에 대한 외경의 비율인 R_o/R_i는 코어의 형상을 나타낸다. 도9를 참조하면, 전력의 증가는 R_o/R_i의 변화가 h의 변화보다 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났으며, 이는 R_o/R_i가 코어의 기하학적 변형 중에서 코어 성능에서 더 우세함을 나타낸다.

[0096] 한편, 변류기 코어는 연속된 환형으로 형성된 링 코어가 가장 전력 효율이 좋으나, 기 가설된 전력선에 결합하기 위해서는 2개의 피스가 하나의 고리를 이루도록 분리된 스플릿 코어가 보다 현장에서 활용하기 용이한 형태이다. 이러한 스플릿 코어 형태의 변류기 코어는 필연적으로 분리/결합 부위에 공극(Air gap)이 형성된다. 이러한 공극은 변류기 코어의 자속 밀도 분포에 영향을 주며 결과적으로 생성 전력에 영향을 주게 된다.

[0097] 따라서, 본 발명은, 스플릿 코어 형태의 변류기의 복수의 공극 조건하에서 테스트 전류 인가 단계, 전압 측정 단계, 전압 데이터 획득 단계 및 B-H 커브 획득 단계가 수행되어, 복수의 공극 조건에 대한 자속 밀도가 획득되는 공극 분석 단계가 수행된다. 이를 위하여 공극의 폭을 2um, 4um, 6um, 8um, 10um로 변경해가면서 B-H커브를 산출하여 어느 공극 범위에서 스플릿 코어가 안정적인 전력 생성이 가능한지 여부를 실험하였다.

[0098] 도13은 외부 반경(R_o) 62.5mm, 내부 반경(R_i) 37.5mm, 높이(h) 60mm인 링 코어와 스플릿 코어의 30A의 입력 전류하에서의 자속 밀도 분포를 시뮬레이션한 결과이다. 스플릿 코어의 공극은 각각 2um, 4um, 6um, 8um, 10um로 적용하였다. 그 결과 공극이 6um 이하인 스플릿 코어의 자속 밀도는 링 코어와 유사한 분포를 보여주는 것을 확인하였다. 그러나, 스플릿 코어의 공극이 6um를 초과하면 자기 회로 차단이 증가하여 전력 효율이 저하되는 것이 확인되었다.

[0099] 도14는 공극이 2um 내지 10um인 스플릿 코어와 링 코어의 입력 전류 10A 내지 50A 조건하에서 B-H 커브를 획득하고 이를 통해 계산된 전력을 나타낸다. 그 결과 모든 전류 조건하에서 공극이 6um 이하인 스플릿 코어가 링 코어와 유사한 수준의 최대 전력 출력을 달성한 것으로 나타났다. 그러나, 공극이 8um, 10um인 스플릿 코어는 링 코어에 비해 성능이 크게 저하된 것으로 나타났다. 이러한 감소는 도13의 자속 밀도 분포에서 볼 수 있듯이 8um 이상의 공극이 존재할 때 코어 내부의 자속이 명확하게 차단되어 성능이 크게 저하되기 때문인 것으로 유추된다.

[0100] 도15 내지 도18은 링 코어의 성능과 동일하도록 스플릿 코어의 공극을 최소화해야 함을 보여준다. 이 효과를 얻기 위해 스플릿 코어의 단면을 연마하였고, 도15와 같이 연마된 단면의 단위면적 표면 특성을 분석하기 위해 스플릿 코어의 단면의 표면 거칠기를 측정하였다. 도16은 실험에 사용된 스플릿 코어 단면의 표면 거칠기 분포를 보여주며, 단면의 최대 높이는 스플릿 코어 단면의 높이와 피트 길이의 합으로 결정된다. 그리고 공극은 스플릿 코어의 상하부 단면이 만나 형성하므로 최대 높이의 두 배로 정의된다. 예를 들어, 2um의 공극은 스플릿 코어의 상단 및 하단 구성 요소의 최대 높이가 각각 1um임을 나타낸다. 도17은 연마된 스플릿 코어와 링 코어의 실험적으로 측정된 최대 전력 차이를 비교한 결과이다. 시뮬레이션을 통해 예측한 바와 같이, 연마를 통해 6um 이하의 공극을 형성한 스플릿 코어가 링 코어와 매우 유사한 성능을 보이는 것을 관찰할 수 있다.

[0101] 도18은 다양한 코어 형상에 대한 공극의 영향을 보여준다. 3개의 다른 외부 반경(45, 50, 55mm)과, 내부 반경 35mm 및 높이 65mm를 사용하여 시뮬레이션한 결과, 모든 경우에 공극이 6um 이하인 스플릿 코어의 성능이 링 코어와 유사한 성능을 나타내었다. 그러나, 코어의 외경이 커질수록, 공극이 커질수록 성능 저하가 커지는 경향을 보였다. 이는 코어의 외경이 커지면서 공극 역시 커진 결과로 유추된다. 최종적으로, 6um 이하의 공극이 링 코어의 성능에 필적하는 성능을 달성하기 위한 스플릿 코어의 공극 유효 범위임을 알 수 있다.

[0104] 상술한 구성으로 이루어진 본 발명은, 변류기 코어의 다양한 저항 및 전류 조건하에서의 측정된 전압 데이터를 기반으로 B-H 커브를 간단히 예측할 수 있는 효과가 있다.

[0105] 또한, 본 발명은, 간단한 과정으로 예측된 B-H 커브가 변류기 코어의 실제 B-H 커브에 비하여 비교적 적은 오차율을 나타내는 효과가 있다.

[0106] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 스플릿 코어가 링 코어와 유사한 효율을 내는 공극의 범위를 설계할 수 있는 효과가 있다.

[0107] 또한, 본 발명은, B-H 커브 예측 방법을 통해 최대 전력이 산출되는 변류기 코어의 형상을 설계할 수 있는 효과가 있다.

부호의 설명

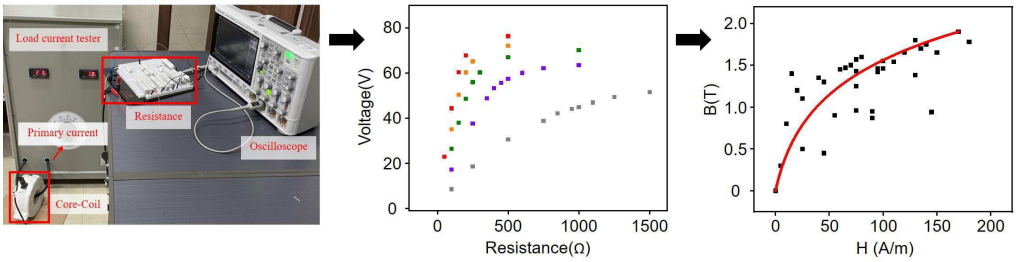
[0109] R_o : 변류기 코어의 외경

R_i : 변류기 코어의 내경

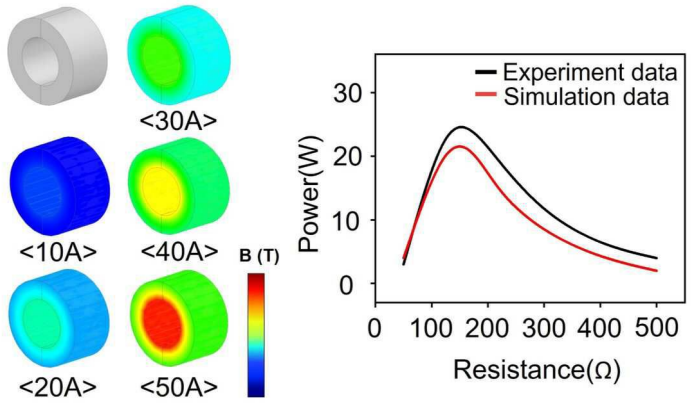
h : 변류기 코어의 높이

도면

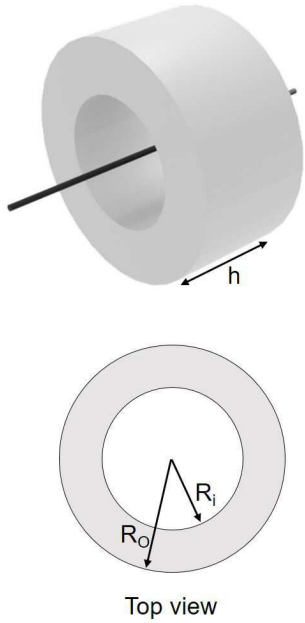
도면1



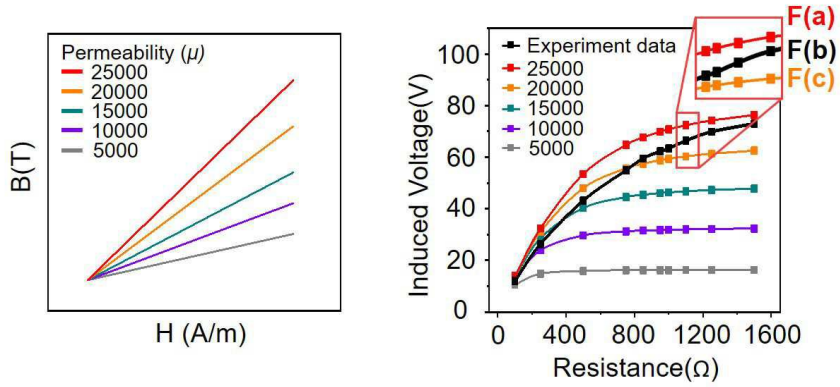
도면2



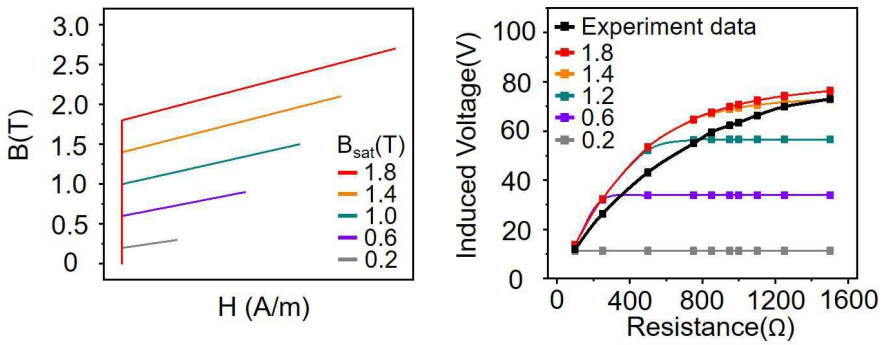
도면3


h
R_i
R_O
Top view

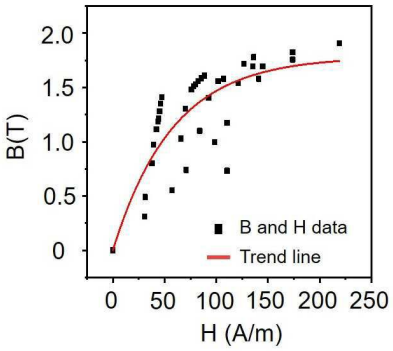
도면4


Permeability (μ)
25000
20000
15000
10000
5000
B(T)
H (A/m)
Experiment data
25000
20000
15000
10000
5000
F(a)
F(b)
F(c)
Induced Voltage(V)
Resistance(Ω)

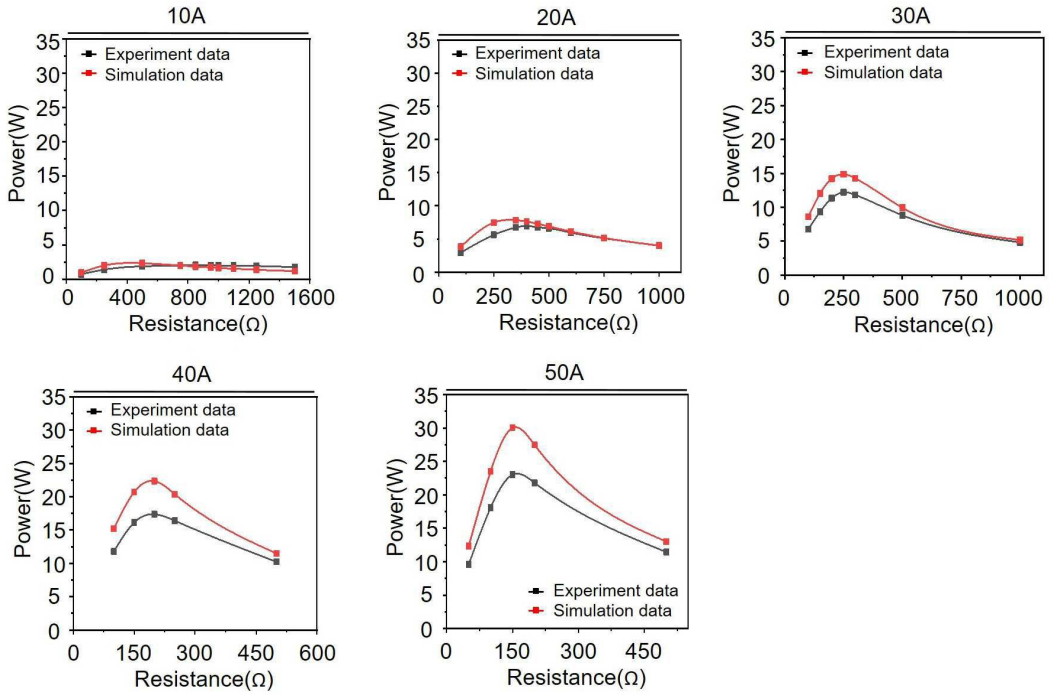
도면5


B(T)
H (A/m)
B_{sat}(T)
1.8
1.4
1.0
0.6
0.2
Experiment data
1.8
1.4
1.2
0.6
0.2
Induced Voltage(V)
Resistance(Ω)

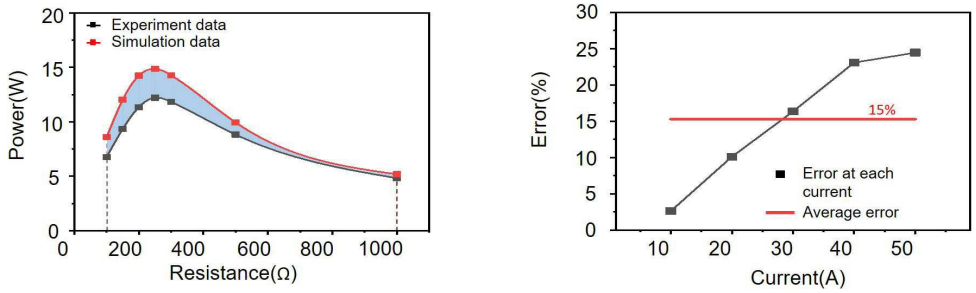
도면6


B(T)
H (A/m)
B and H data
Trend line

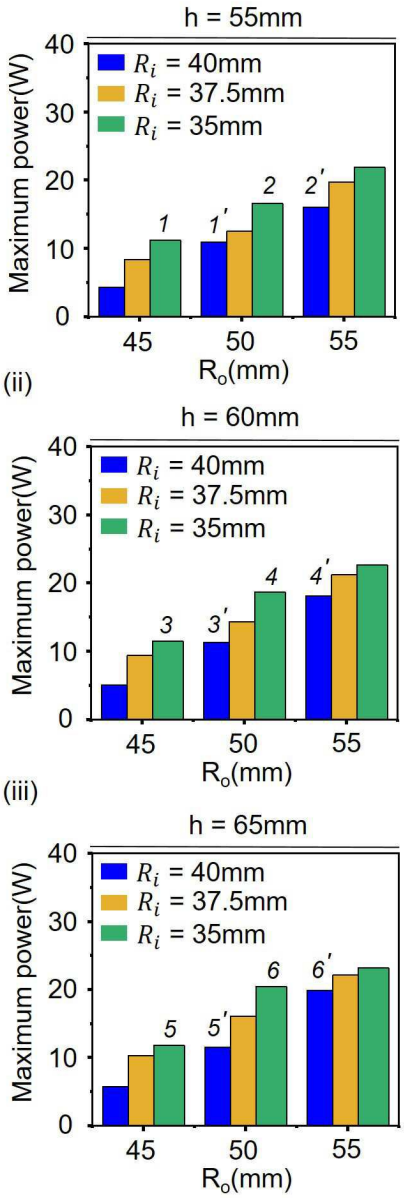
도면7


10A
20A
30A
40A
50A
Experiment data
Simulation data
Power(W)
Resistance(Ω)

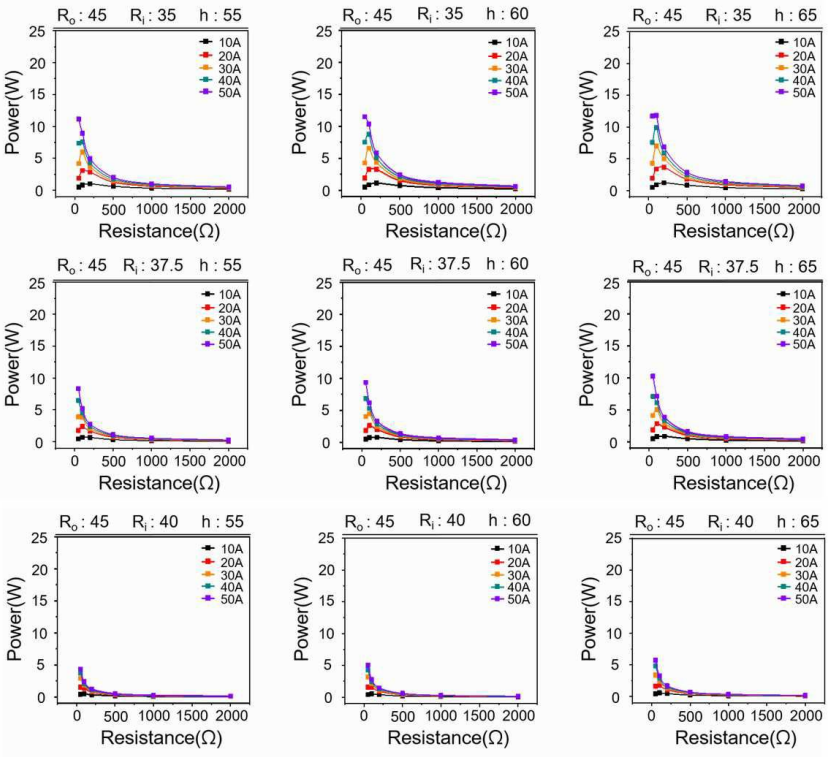
도면8


Experiment data
Simulation data
Power(W)
Resistance(Ω)
Error(%)
15%
Error at each current
Average error
Current(A)

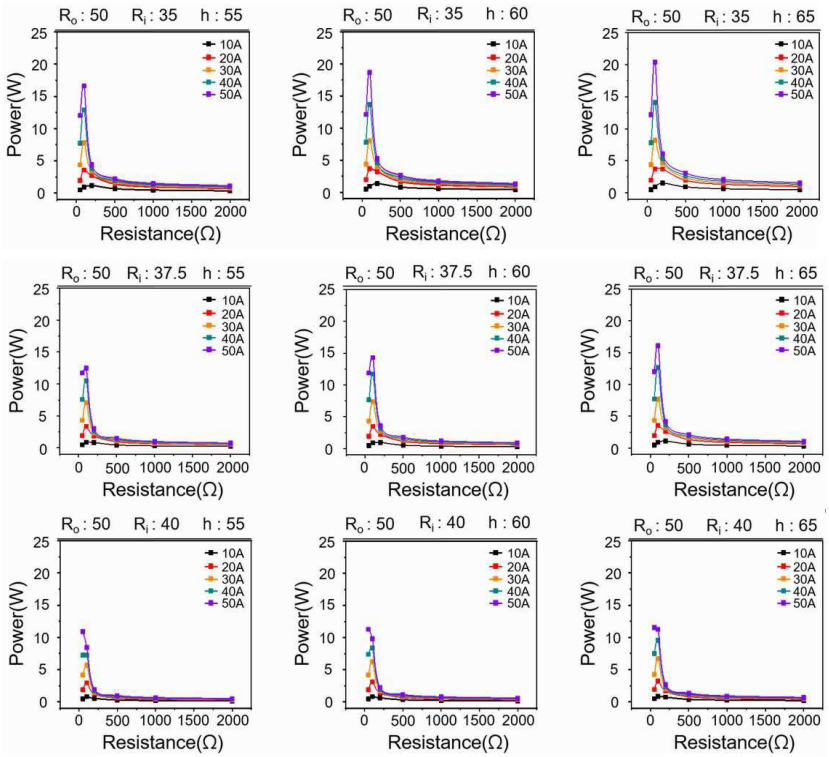
도면9


h = 55mm
Maximum power(W)
R_i = 40mm
R_i = 37.5mm
R_i = 35mm
1
1′
2
2′
0
10
20
30
40
45
50
55
R_o(mm)
(ii)
h = 60mm
Maximum power(W)
R_i = 40mm
R_i = 37.5mm
R_i = 35mm
3
3′
4
4′
0
10
20
30
40
45
50
55
R_o(mm)
(iii)
h = 65mm
Maximum power(W)
R_i = 40mm
R_i = 37.5mm
R_i = 35mm
5
5′
6
6′
0
10
20
30
40
45
50
55
R_o(mm)

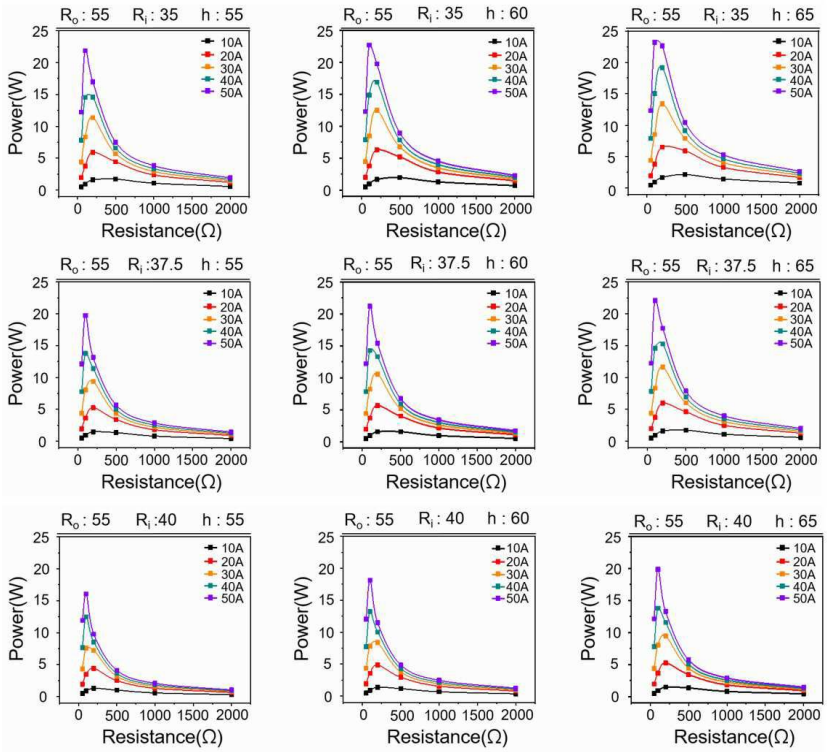
도면10a


Ro : 45 Ri : 35 h : 55
Ro : 45 Ri : 35 h : 60
Ro : 45 Ri : 35 h : 65
Ro : 45 Ri : 37.5 h : 55
Ro : 45 Ri : 37.5 h : 60
Ro : 45 Ri : 37.5 h : 65
Ro : 45 Ri : 40 h : 55
Ro : 45 Ri : 40 h : 60
Ro : 45 Ri : 40 h : 65
10A
20A
30A
40A
50A
Power(W)
Resistance(Ω)

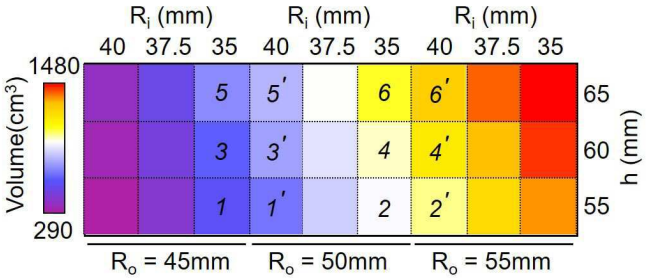
도면10b

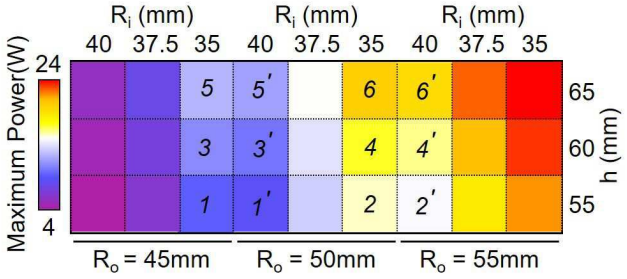

Ro : 50 Ri : 35 h : 55
Ro : 50 Ri : 35 h : 60
Ro : 50 Ri : 35 h : 65
Ro : 50 Ri : 37.5 h : 55
Ro : 50 Ri : 37.5 h : 60
Ro : 50 Ri : 37.5 h : 65
Ro : 50 Ri : 40 h : 55
Ro : 50 Ri : 40 h : 60
Ro : 50 Ri : 40 h : 65
10A
20A
30A
40A
50A
Power(W)
Resistance(Ω)

도면10c

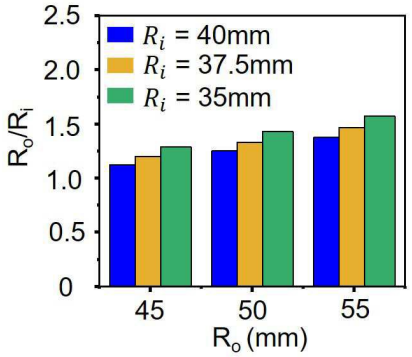

Ro : 55 Ri : 35 h : 55
Ro : 55 Ri : 35 h : 60
Ro : 55 Ri : 35 h : 65
Ro : 55 Ri :37.5 h : 55
Ro : 55 Ri : 37.5 h : 60
Ro : 55 Ri : 37.5 h : 65
Ro : 55 Ri :40 h : 55
Ro : 55 Ri : 40 h : 60
Ro : 55 Ri : 40 h : 65
10A
20A
30A
40A
50A
Power(W)
Resistance(Ω)
0 500 1000 1500 2000
0 5 10 15 20 25

도면11

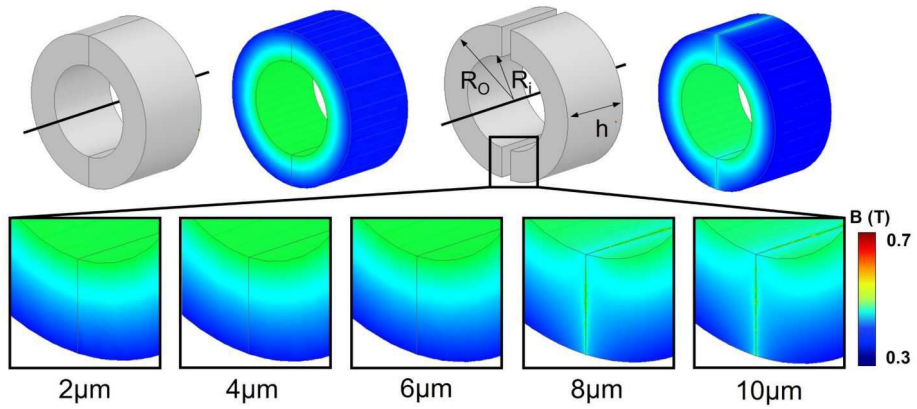

Ri (mm)
40 37.5 35 40 37.5 35 40 37.5 35
1480
290
Volume(cm3)
5 5′ 6 6′
3 3′ 4 4′
1 1′ 2 2′
65
60
55
h (mm)
Ro = 45mm
Ro = 50mm
Ro = 55mm


Ri (mm)
40 37.5 35 40 37.5 35 40 37.5 35
24
4
Maximum Power(W)
5 5′ 6 6′
3 3′ 4 4′
1 1′ 2 2′
65
60
55
h (mm)
Ro = 45mm
Ro = 50mm
Ro = 55mm

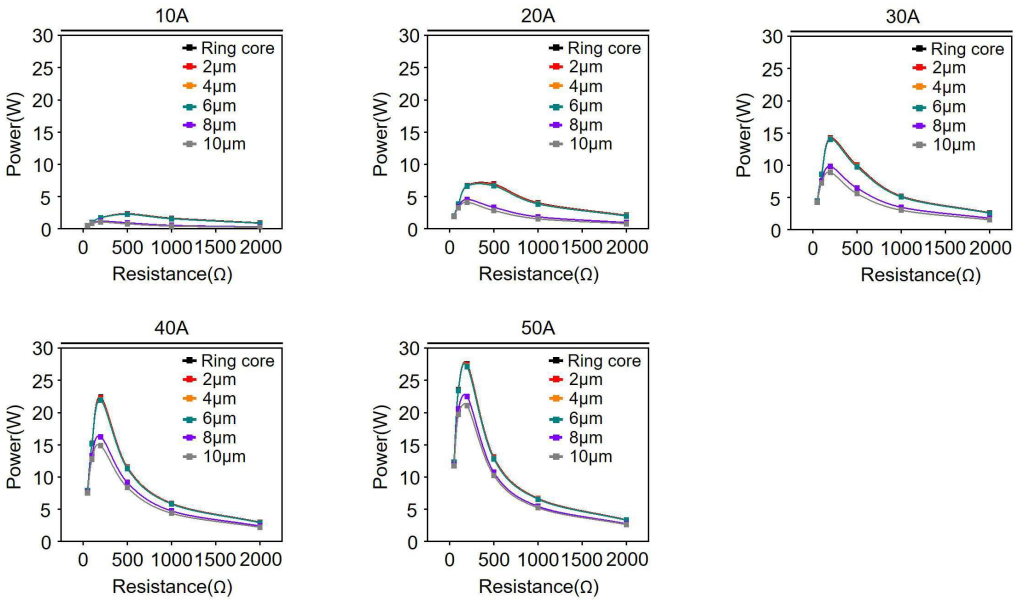
도면12



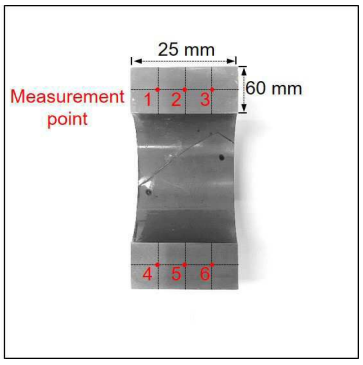
도면13



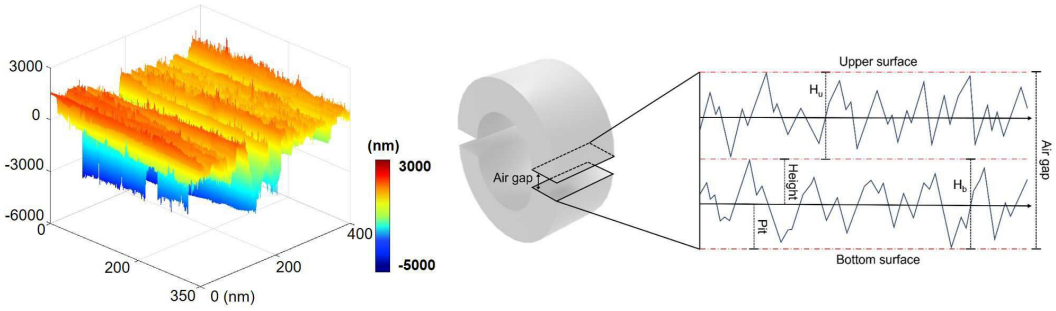
도면14



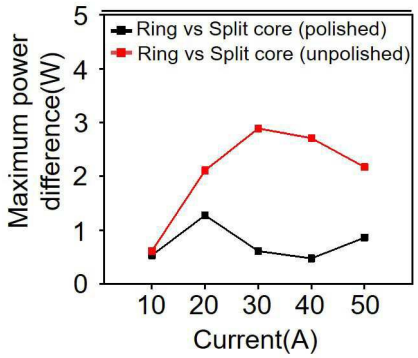
도면15



도면16



도면17



도면18

