(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2023-0089981
(43) 공개일자 2023년06월21일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 27/02 (2006.01) *G06F 30/30* (2020.01)
H02J 50/10 (2016.01)
(52) CPC특허분류
G01R 27/02 (2013.01)
G06F 30/30 (2020.01)
(21) 출원번호 10-2021-0178820
(22) 출원일자 2021년12월14일
심사청구일자 2021년12월14일

(71) 출원인
한국과학기술원
대전광역시 유성구 대학로 291(구성동)
경희대학교 산학협력단
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732 (서천동, 경희대학교 국제캠퍼스내)
(72) 발명자
안승영
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)
김종욱
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
김연권

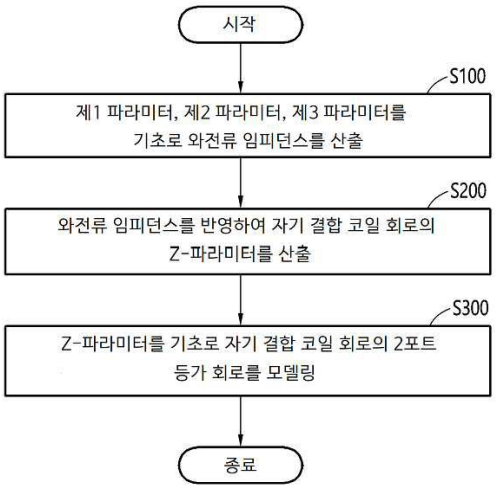
전체 청구항 수 : 총 10 항

(54) 발명의 명칭 **전도성 매질에서 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법, 및 이를 이용하는 무선 전력 전송 시스템**

(57) 요 약

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계, 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계, 및 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계를 포함한다. 상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함한다. 상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출된다.

대 표 도 - 도5



(52) CPC특허분류
H02J 50/10 (2016.02)
(72) 발명자
이범선
경기도 용인시 기흥구 신촌로47번길 11, 307동 1602호(보정동, 신촌마을 포스홈타운2단지)
김해림
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)
박범진
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)
허성렬
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)
박동렬
대전광역시 유성구 문지로 193 (문지동)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711125879
과제번호 2020-0-00839-002
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 방송통신산업기술개발(R&D,정보화)
연구과제명 초연결 E-Vehicle 전력 및 신호 EMC 고도화 기술 개발
기 여 율 35/100
과제수행기관명 한국과학기술원
연구기간 2021.01.01 ~ 2021.12.31
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711132295
과제번호 2017R1A5A1015596
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 한국연구재단
연구사업명 집단연구지원(R&D)
연구과제명 지능형 바이오메디컬 무선전력전송 연구센터
기 여 율 35/100
과제수행기관명 숭실대학교
연구기간 2017.06.01 ~ 2024.02.29
이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1711125809
과제번호 2016-0-00291-006
부처명 과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명 정보통신기획평가원
연구사업명 (혁신법)정보통신기술인력양성/대학ICT연구센터육성지원
연구과제명 LOS/NLOS 환경에서 3차원 선택적 공간 무선전력전송 기술 연구
기 여 율 30/100
과제수행기관명 경희대학교 산학협력단
연구기간 2020.01.01 ~ 2021.12.31

명 세 서

청구범위

청구항 1

자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계;

상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계; 및

상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계를 포함하고,

상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함하고,

상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출되는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 2

제1항에 있어서,

상기 수신 코일의 상기 탄젠셜 성분 전기장은 아래 [수식 1]에 기초하여 산출되는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

[수식 1]

$$E_{\phi}(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_{\phi}} \cdot \overrightarrow{e_{\theta}} = E_{\phi}(a_{rx}, \phi, d_1)\cos(\alpha) = E_{\theta}(a_{rx}, \theta, d_1)$$

청구항 3

제2항에 있어서,

상기 제3 와전류 임피던스는 아래 [수식 2]에 기초하여 산출되는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

[수식 2]

$$\boldsymbol{Z_{21_eddy}} = \frac{1}{I_{tx}}\oint_0^{2\pi} E_{\phi}(\rho', \phi, d_1) \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot a_{rx}\, d\theta$$

청구항 4

제1항에 있어서,

상기 제1 파라미터는 동작 주파수, 상기 송신 코일의 턴수, 상기 수신 코일의 턴수, 상기 송신 코일의 반경, 상기 수신 코일의 반경, 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 거리를 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 5

제1항에 있어서,

상기 제2 파라미터는 상기 전도성 매질의 전기 전도도를 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 6

제1항에 있어서,

상기 제3 파라미터는 상기 송신 코일과 상기 수신 코일의 수평 오정렬 거리를 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 7

제1항에 있어서,

상기 전도성 매질은 해수이고,

상기 자기 결합 코일 회로는 상기 해수에 완전히 잠겨서 배치되는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 8

제1항에 있어서,

상기 와전류 임피던스를 이용하여 전력 전송 효율을 산출하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 9

제1항에 있어서,

상기 와전류 임피던스를 이용하여 와전류 손실을 산출하는 단계를 더 포함하는 것을 특징으로 하는,

자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법.

청구항 10

AC 전원을 입력받고, 송신 코일을 포함하는 송신부;

상기 송신부로부터 무선 전력을 전송받고, 수신 코일을 포함하는 수신부; 및

상기 수신부와 전기적으로 연결되는 부하 기기를 포함하고,

상기 송신 코일 및 상기 수신 코일은 자기 결합 코일 회로를 구성하고,

상기 자기 결합 코일 회로는,

상기 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계;

상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계; 및

상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계에 의해 등가 회로로 모델링되고,

상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함하고,

상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출되는 것을 특징으로 하는,

무선 전력 전송 시스템.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법에 관한 것으로, 보다 상세하게는 전도성 매질에서 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법, 및 이를 이용하는 무선 전력 전송 시스템에 관한 것이다.

배 경 기 술

[0002] 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer; WPT) 기술은 이식형 의료 기기, 모바일 기기 및 자동차와 같은 다양한 응용 분야에서 연구되어 왔다. 그러나 대부분의 연구는 공기 매질에서의 자기 커플링을 사용하는 IPT(Inductive Power Transfer)에 중점을 둔다는 한계가 있다. 이러한 IPT 방법은 송신(Tx) 코일에 의해 생성된 시변(time-varying) 자기장을 사용하여 수신(Rx) 코일에 전압을 유도하는 방식이다.

[0003] 최근 무인 수중 로봇, 자율 수중 차량(AUB) 등의 수요가 증가하면서, 기존의 전력 케이블을 이용한 에너지 공급 방식의 단점을 보완하기 위해 무선 전력 전송(Wireless Power Transfer; WPT) 기술이 도입되고 있다. 특히, 물의 경우 투자율이 공기와 마찬가지로 1에 가깝기 때문에, 이러한 물 내에서 자기장을 이용한 자기 결합 방식의 무선 전력 전송 기술이 고려되고 있다.

[0004] 한편, 해수는 이온이 녹아 있으므로, 공기와는 달리 이온에 의한 전기 전도도를 가진다. 시변 자기장이 해수와 같은 전도성 매질을 통과할 때에는 와전류(Eddy current)가 발생될 수 있다. 이러한 와전류는 무선 전력 전송 시스템에 있어서 손실로 작용할 수 있다. 와전류에 의한 손실은 등가 회로 모델에서 저항 성분으로 표현될 수 있으나, 이를 정확하게 계산하여 등가 회로에서 표현하기는 어렵다. 따라서, 이러한 와전류에 의한 손실을 정확하게 고려하여 전도성 매질 내에서의 자기 결합 코일의 등가 회로를 모델링할 필요가 있다.

[0005] 특히, 이러한 전도성 매질에서 사용되는 무선 전력 전송 기기들은 송신 코일과 수신 코일이 정렬되어 있는 경우보다, 송신 코일과 수신 코일이 오정렬(misaligned) 되어있는 경우가 더 많다. 송신 코일과 수신 코일의 오정렬은 와전류에 의한 손실에 영향을 미치므로, 자기 결합 코일의 등가 회로를 모델링하는 경우에는 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 따른 영향을 고려할 필요가 있다.

선행기술문헌

발명의 내용

해결하려는 과제

[0006] 본 발명의 일 목적은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성, 전도성 매질의 특성, 및 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 모두 반영한 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 제공하는 것이다.

[0007] 본 발명의 다른 목적은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성, 전도성 매질의 특성, 및 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 모두 반영한 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하는 무선 전력 전송 시스템을 제공하는 것이다.

[0008] 다만, 본 발명이 해결하고자 하는 과제는 상기 언급된 과제에 한정되는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위에서 다양하게 확장될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

[0009] 본 발명의 일 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계, 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계, 및 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계를 포함할 수 있다. 상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함할 수 있다. 상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄

젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출될 수 있다.

[0010] 일 실시예에서, 상기 수신 코일의 상기 탄젠셜 성분 전기장은 아래 [수식 1]에 기초하여 산출될 수 있다.

[0011] [수식 1]

[0012] $$E_{\phi}(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_{\phi}} \cdot \overrightarrow{e_{\theta}} = E_{\phi}(a_{rx}, \phi, d_1)\cos(\alpha) = E_{\theta}(a_{rx}, \theta, d_1)$$

[0013] 일 실시예에서, 상기 제3 와전류 임피던스는 아래 [수식 2]에 기초하여 산출될 수 있다.

[0014] [수식 2]

[0015] $$Z_{21_eddy} = \frac{1}{I_{tx}} \oint_0^{2\pi} E_{\phi}(\rho', \phi, d_1) \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot a_{rx}\, d\theta$$

[0016] 일 실시예에서, 상기 제1 파라미터는 동작 주파수, 상기 송신 코일의 턴수, 상기 수신 코일의 턴수, 상기 송신 코일의 반경, 상기 수신 코일의 반경, 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 거리를 포함할 수 있다.

[0017] 일 실시예에서, 상기 제2 파라미터는 상기 전도성 매질의 전기 전도도를 포함할 수 있다.

[0018] 일 실시예에서, 상기 제3 파라미터는 상기 송신 코일과 상기 수신 코일의 수평 오정렬 거리를 포함할 수 있다.

[0019] 일 실시예에서, 상기 전도성 매질은 해수일 수 있다. 상기 자기 결합 코일 회로는 상기 해수에 완전히 잠겨서 배치될 수 있다.

[0020] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 상기 와전류 임피던스를 이용하여 전력 전송 효율을 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0021] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 상기 와전류 임피던스를 이용하여 와전류 손실을 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다.

[0022] 본 발명의 다른 목적을 달성하기 위하여, 본 발명의 실시예들에 따른 무선 전력 전송 시스템은 AC 전원을 입력받고, 송신 코일을 포함하는 송신부, 상기 송신부로부터 무선 전력을 전송받고, 수신 코일을 포함하는 수신부, 및 상기 수신부와 전기적으로 연결되는 부하 기기를 포함할 수 있다. 상기 송신 코일 및 상기 수신 코일은 자기 결합 코일 회로를 구성할 수 있다. 상기 자기 결합 코일 회로는 상기 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계, 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계, 및 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계에 의해 등가 회로로 모델링될 수 있다. 상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함할 수 있다. 상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출될 수 있다.

발명의 효과

[0023] 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성, 전도성 매질의 특성, 및 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 모두 반영한 자기 결합 코일 회로의 등가 회로를 모델링할 수 있다.

[0024] 본 발명의 자기 결합 코일 회로의 등가 회로의 모델링을 이용하여 전도성 매질에서 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 경우, 자기 결합 코일 회로의 전력 전송 효율 및 와전류 손실을 간단하고 정확하게 산출할 수 있다.

[0025] 다만, 본 발명의 효과는 상술한 효과에 한정되는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 영역으로부터 벗어나지 않는 범위에서 다양하게 확장될 수 있을 것이다.

도면의 간단한 설명

[0026] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 무선 전력 전송을 나타내는 도면이다.

도 2는 도 1의 자기 결합 코일 회로의 송신 코일과 수신 코일이 오정렬되는 경우를 나타내는 도면이다.

도 3은 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로의 일 예시를 나타내는 도면이다.

도 4는 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 나타내는 개념도이다.

도 5는 도 4의 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 나타내는 순서도이다.

도 6은 도 4의 등가 회로 모델링 방법에 따른 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 나타내는 도면이다.

도 7은 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 경우, 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장을 나타내는 도면이다.

도 8은 도 6에서 0'F0'' 삼각형을 확대한 도면이다.

도 9는 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장을 산출하기 위한 수식, 및 제3 와전류 임피던스를 산출하기 위한 수식이다.

도 10은 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하여 산출된 전력 전송 효율과 실제 측정된 전력 전송 효율을 비교하는 그래프이다.

도 11은 본 발명의 실시예들에 따른 무선 전력 전송 시스템을 나타내는 도면이다.

도 11은 도 10의 무선 전력 전송 시스템이 자기 결합 코일 회로의 등가 회로를 모델링하는 방법을 나타내는 순서도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0027] 본 명세서에 개시되어 있는 본 발명의 개념에 따른 실시예들에 대해서 특정한 구조적 또는 기능적 설명들은 단지 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 설명하기 위한 목적으로 예시된 것으로서, 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 형태로 실시될 수 있으며 본 명세서에 설명된 실시예들에 한정되지 않는다.

[0028] 본 발명의 개념에 따른 실시예들은 다양한 변경들을 가할 수 있고 여러 가지 형태들을 가질 수 있으므로 실시예들을 도면에 예시하고 본 명세서에 상세하게 설명하고자 한다. 그러나, 이는 본 발명의 개념에 따른 실시예들을 특정한 개시형태들에 대해 한정하려는 것이 아니며, 본 발명의 사상 및 기술 범위에 포함되는 변경, 균등물, 또는 대체물을 포함한다.

[0029] 제1 또는 제2 등의 용어를 다양한 구성요소들을 설명하는데 사용될 수 있지만, 구성요소들은 용어들에 의해 한정되어서는 안 된다. 용어들은 하나의 구성요소를 다른 구성요소로부터 구별하는 목적으로만, 예를 들면 본 발명의 개념에 따른 권리 범위로부터 이탈되지 않은 채, 제1 구성요소는 제2 구성요소로 명명될 수 있고, 유사하게 제2 구성요소는 제1 구성요소로도 명명될 수 있다.

[0030] 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "연결되어" 있다거나 "접속되어" 있다고 언급된 때에는, 그 다른 구성요소에 직접적으로 연결되어 있거나 또는 접속되어 있을 수도 있지만, 중간에 다른 구성요소가 존재할 수도 있다고 이해되어야 할 것이다. 반면에, 어떤 구성요소가 다른 구성요소에 "직접 연결되어" 있다거나 "직접 접속되어" 있다고 언급된 때에는, 중간에 다른 구성요소가 존재하지 않는 것으로 이해되어야 할 것이다. 구성요소들 간의 관계를 설명하는 표현들, 예를 들면 "~사이에"와 "바로~사이에" 또는 "~에 직접 이웃하는" 등도 마찬가지로 해석되어야 한다.

[0031] 본 명세서에서 사용한 용어는 단지 특정한 실시예들을 설명하기 위해 사용된 것으로, 본 발명을 한정하려는 의도가 아니다. 단수의 표현은 문맥상 명백하게 다르게 뜻하지 않는 한, 복수의 표현을 포함한다. 본 명세서에서, "포함하다" 또는 "가지다" 등의 용어는 설시된 특징, 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것이 존재함으로 지정하려는 것이지, 하나 또는 그 이상의 다른 특징들이나 숫자, 단계, 동작, 구성요소, 부분품 또는 이들을 조합한 것들의 존재 또는 부가 가능성을 미리 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다.

[0032] 다르게 정의되지 않는 한, 기술적이거나 과학적인 용어를 포함해서 여기서 사용되는 모든 용어들은 본 발명이 속하는 기술 분야에서 통상의 지식을 가진 자에 의해 일반적으로 이해되는 것과 동일한 의미를 가진다. 일반적으로 사용되는 사전에 정의되어 있는 것과 같은 용어들은 관련 기술의 문맥상 가지는 의미와 일치하는 의미를 갖는 것으로 해석되어야 하며, 본 명세서에서 명백하게 정의하지 않는 한, 이상적이거나 과도하게 형식적인 의미로 해석되지 않는다.

[0033] 이하, 실시예들을 첨부된 도면을 참조하여 상세하게 설명한다. 그러나, 특허출원의 범위가 이러한 실시예들에

의해 제한되거나 한정되는 것은 아니다. 각 도면에 제시된 동일한 참조 부호는 동일한 부재를 나타낸다.

[0034] 도 1은 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 무선 전력 전송을 나타내는 도면이고, 도 2는 도 1의 자기 결합 코일 회로의 송신 코일과 수신 코일이 오정렬되는 경우를 나타내는 도면이다.

[0035] 도 1을 참조하면, 자기 결합 코일 회로는 송신 코일 및 수신 코일을 포함할 수 있다. 송신 코일과 수신 코일은 자기적으로 결합될 수 있다.

[0036] 자기 결합 코일 회로에서, 송신 코일 측에 흐르는 전류에 의해 시변 자기장(Time-varying magnetic field)이 발생할 수 있다. 상기 시변 자기장의 영향에 따라 수신 코일 측에 유도 전압이 발생할 수 있다. 상기 유도 전압에 의해 수신 코일 측에 유도 전류가 흐를 수 있다.

[0037] 이와 같이, 송신 코일 측에 흐르는 전류에 의해 수신 코일 측에 유도 전류가 흐르게 됨에 따라, 송신 코일에서 수신 코일로 무선 전력 전송(Wireless Power Tranfer)이 이루어질 수 있다.

[0038] 자기 결합 코일 회로는 공기가 아닌 전도성 매질 내에 배치될 수 있다. 공기는 전기 전도도(σ)가 0일 수 있다. 반면, 전도성 매질은 공기와 달리 전기 전도도(σ)가 0이 아닐 수 있다.

[0039] 전도성 매질에는 이온이 녹아 있으므로, 전도성 매질은 이온에 의한 전기 전도도를 가질 수 있다. 상기 자기 결합 코일 회로는 상기 전도성 매질에 완전히 잠겨서 배치될 수 있다.

[0040] 상기 전도성 매질은 소금물, 기타 유체, 및 고체 중 어느 하나일 수 있다. 예를 들어, 상기 전도성 매질은 해수일 수 있다. 다른 예를 들어, 상기 전도성 매질은 인체 조직일 수 있다.

[0041] 무선 전력 전송을 위한 시변 자기장이 전도성 매질을 통과할 때, 와전류(Eddy current)가 발생할 수 있다. 이러한 와전류의 영향으로 무선 전력 전송 과정에서 와전류 손실(Eddy current loss)이 발생할 수 있다.

[0042] 이러한 와전류 손실은 자기 결합 코일의 등가 회로 모델에 임피던스 성분으로 반영될 수 있다.

[0043] 한편, 전도성 매질에서 사용되는 무선 전력 전송 기기들은 송신 코일과 수신 코일이 정렬되어 있는 경우보다, 송신 코일과 수신 코일이 오정렬(misaligned) 되어있는 경우가 더 많다. 예를 들어, 도 2에서 보듯이, 송신 코일과 수신 코일은 수평 방향으로 오정렬될 수 있다.

[0044] 송신 코일과 수신 코일의 오정렬은 와전류에 의한 와전류 손실에 영향을 미치므로, 자기 결합 코일의 등가 회로를 모델링하는 경우에는 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 따른 영향을 고려할 필요가 있다.

[0045] 도 3은 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로의 일 예시를 나타내는 도면이다.

[0046] 도 3을 참조하면, 자기 결합 코일 회로의 송신 코일과 수신 코일은 2포트 등가 회로로 간단하게 구현될 수 있다. 2포트 등가 회로를 이용하는 경우, Z-파라미터를 통해 자기 결합 코일 회로의 전기적 요소가 쉽게 분석될 수 있다.

[0047] 예를 들어, Z-파라미터는 제1 Z-파라미터(Z_{11}), 제2 Z-파라미터(Z_{22}), 및 제3 Z-파라미터(Z_{21})를 포함할 수 있다.

[0048] 도 3의 경우, 제1 Z-파라미터(Z_{11}), 제2 Z-파라미터(Z_{22}), 및 제3 Z-파라미터(Z_{21})는 아래 수식과 같이 계산될 수 있다.

[0049] [수식]

[0050] $$Z_{11} = \frac{\boldsymbol{V_1}}{\boldsymbol{I_1}}\bigg|_{I_2=0} = R_1 + j\omega L_1$$

[0051] $$Z_{22} = \frac{\boldsymbol{V_2}}{\boldsymbol{I_2}}\bigg|_{I_1=0} = R_2 + j\omega L_2$$

[0052] $$Z_{21} = \frac{\boldsymbol{V_2}}{\boldsymbol{I_1}}\bigg|_{I_2=0} = j\omega M$$

[0053] 한편, 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일의 등가 회로 모델링 방법은 와전류 손실에 의한 영향과 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 의한 영향을 모두 반영하여 와전류 임피던스를 산출할 수 있다.

[0054] 예를 들어, 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함할 수 있다.

[0055] 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일의 등가 회로 모델링 방법은 와전류 임피던스를 반영하여 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출할 수 있다.

[0056] 와전류 임피던스가 Z-파라미터에 반영된 경우, 제1 Z-파라미터(Z_{11}), 제2 Z-파라미터(Z_{22}), 및 제3 Z-파라미터(Z_{21})는 아래 수식과 같이 계산될 수 있다.

[0057] [수식]

[0058] $$Z_{11} = R_1 + j\omega L_1 + Z_{11_eddy}$$

[0059] $$Z_{22} = R_2 + j\omega L_2 + Z_{22_eddy}$$

[0060] $$Z_{21} = j\omega M + Z_{21_eddy}$$

[0061] 도 4는 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 나타내는 개념도이고, 도 5는 도 4의 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 나타내는 순서도이며, 도 6은 도 4의 등가 회로 모델링 방법에 따른 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 나타내는 도면이다.

[0062] 도 4 내지 6을 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출(S100)하고, 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출(S200)하며, 및 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링(S300)할 수 있다.

[0063] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출(S100)할 수 있다.

[0064] 제1 파라미터는 자기 결합 코일 회로의 구성 상 특성을 나타낼 수 있다. 예를 들어, 제1 파라미터는 동작 주파수(f), 상기 송신 코일의 턴수(N_{tx}), 상기 수신 코일의 턴수(N_{rx}), 상기 송신 코일의 반경(a_{tx_m}), 상기 수신 코일의 반경(a_{rx_m}), 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 거리(d_1)를 포함할 수 있다.

[0065] 제2 파라미터는 자기 결합 코일 회로가 배치된 전도성 매질의 특성을 나타낼 수 있다. 예를 들어, 제2 파라미터는 상기 전도성 매질의 전기 전도도(σ)를 포함할 수 있다.

[0066] 제3 파라미터는 자기 결합 코일에 포함된 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타낼 수 있다. 예를 들어, 제3 파라미터는 상기 송신 코일과 상기 수신 코일의 수평 오정렬 거리(L)를 포함할 수 있다.

[0067] 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 제1 파라미터, 제2 파라미터, 및 제3 파라미터를 이용하여 와전류 임피던스를 산출할 수 있다. 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함할 수 있다.

[0068] 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

[0069] [수식]

[0070] $$Z_{11_eddy} = R_{11e} + R_{21e} - j\omega L_1' - j\omega M'$$

[0071] $$Z_{22_eddy} = R_{22e} + R_{21e} - j\omega L_2' - j\omega M'$$

[0072] $$Z_{21_eddy} = R_{21e} - j\omega M'$$

[0073] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출(S200)할 수 있다.

[0074] 예를 들어, 와전류의 영향이 반영되지 않은 Z-파라미터에 와전류 임피던스를 추가함으로써, 와전류 손실에 의한 영향과 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 의한 영향이 반영된 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터가 산출될 수 있다.

[0075] 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법에 따라 산출된 Z-파라미터는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

[0076] [수식]

[0077] $$Z_{11} = R_1 + R_{11e} + R_{21e} + j\omega L_1 - j\omega L_1' - j\omega M'$$

[0078] $$Z_{22} = R_2 + R_{22e} + R_{21e} + j\omega L_2 - j\omega L_2' - j\omega M'$$

[0079] $$Z_{21} = R_{21e} + j\omega M - j\omega M'$$

[0080] 일 실시예에서, 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링(S300)할 수 있다.

[0081] 도 6에서 보듯이, 와전류 손실에 의한 영향과 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 의한 영향이 반영된 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터에 기초하여 2포트 등가 회로가 설계될 수 있다.

[0082] 이러한 2포트 등가회로는 와전류 손실에 의한 영향과 송신 코일과 수신 코일의 오정렬에 의한 영향이 반영되어 있으므로, 자기 결합 코일 회로의 전력 전송 효율 및 와전류 손실을 간단하고 정확하게 산출할 수 있다.

[0083] 도 7은 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 경우, 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장을 나타내는 도면이고, 도 8은 도 6에서 O'FO'' 삼각형을 확대한 도면이며, 도 9는 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장을 산출하기 위한 수식, 및 제3 와전류 임피던스를 산출하기 위한 수식이다.

[0084] 도 7을 참조하면, (ρ', Φ, d1)는 임의의 포인트이고, F는 임의의 전기장 포인트이고, atx는 송신 코일의 반경이고, arx는 수신 코일의 반경이고, d1은 송신 코일과 수신 코일 사이의 거리이고, L은 송신 코일과 상기 수신 코일의 수평 오정렬 거리일 수 있다.

[0085] 여기서, 송신 코일 측에 흐르는 전류에 의한 전기장은 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

[0086] [수식]

[0087] $$\text{electric field intensity} = E_{\phi}(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_{\phi}}$$

[0088] 도 8을 참조하면, O'FO'' 삼각형을 이용하여 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장이 산출될 수 있다. 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장은 송신 코일 측에 흐르는 전류에 의한 전기장과 수신 코일의 경로를 벡터 내적(dot product)함으로서 산출될 수 있다.

[0089] 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장은 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

[0090] [수식]

$$\text{electric field of tangential component} = E_{\phi}(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_{\phi}} \cdot \overrightarrow{e_{\theta}}$$
$$= E_{\phi}(a_{rx}, \phi, d_1)\cos(\alpha)$$
$$= E_{\theta}(a_{rx}, \theta, d_1)$$

[0091]

[0092] 일 실시예에서, 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})는 송신 코일과 수신 코일의 오정렬 특성에 따른 영향을 포함할 수 있다. 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})는 상기 수신 코일의 탄젠셜 성분 전기장을 선적분하여 산출될 수 있다.

[0093] 예를 들어, 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})는 아래 수식과 같이 나타낼 수 있다.

[0094] [수식]

$$\boldsymbol{Z_{21_eddy}} = \frac{1}{I_{tx}}\oint_0^{2\pi} E_{\phi}(\rho', \phi, d_1) \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot a_{rx}\, d\theta$$

[0095]

[0096] 여기서, ρ'는 아래 수식으로 산출될 수 있다.

[0097] [수식]

$$\rho' = \sqrt{L^2 + a_{rx}^2 - 2 \cdot L \cdot a_{rx} \cdot \cos(\pi - \theta)}$$
$$= \sqrt{L^2 + a_{rx}^2 + 2 \cdot L \cdot a_{rx} \cdot \cos\theta}$$

[0098]

[0099] 또한, Φ는 아래 수식으로 산출될 수 있다.

[0100] [수식]

$$\cos\phi = \frac{L - a_{rx} \cdot \cos(\pi - \theta)}{\rho'} = \frac{L + a_{rx} \cdot \cos\theta}{\rho'}$$

[0101]

$$\phi = \cos^{-1}\left(\frac{L + a_{rx} \cdot \cos\theta}{\rho'}\right) \qquad \phi \in [0, \pi]$$

[0102]

[0103] 이와 같이, 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성, 전도성 매질의 특성, 및 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 모두 반영한 자기 결합 코일 회로의 등가 회로를 모델링함으로써, 자기 결합 코일 회로의 전력 전송 효율 및 와전류 손실을 간단하고 정확하게 산출할 수 있다.

[0104] 도 10은 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하여 산출된 전력 전송 효율과 실제 측정된 전력 전송 효율을 비교하는 그래프이다.

[0105] 도 10을 참조하면, 자기 결합 코일 회로가 공기 중에 배치되는 경우 전력 전송 효율, 자기 결합 코일 회로가 전도성 매질에 배치되는 경우 전력 전송 효율, 및 와전류 손실 비율에 대한 데이터가 그래프화되어 있다.

[0106] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 상기 와전류 임피던스를 이용하여 전도성 매질에서 전력 전송 효율(η_{cond})을 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다. 상기 전력 전송 효율(η_{cond})은 아래 수식과 같이 산출될 수 있다.

[0107] [수식]

$$\eta_{cond.} = \frac{\bar{I_o}^2 R_L}{\bar{I_1}^2(R_1 + R_{11e}) + \bar{I_2}^2(R_2 + R_{22e}) + \overline{I_2 - I_1}^2(R_{21e}) + \bar{I_o}^2 R_L}$$

[0108]

[0109] 일 실시예에서, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법은 상기 와전류 임피던스를 이용하여 와전류 손실(P_{eddy})을 산출하는 단계를 더 포함할 수 있다. 상기 와전류 손실(P_{eddy})은 아래 수식과 같이 산출될 수 있다.

[0110] [수식]

$$P_{eddy} = \bar{I_1}^2 R_{11e} + \bar{I_2}^2 R_{22e} + \overline{I_2 - I_1}^2 R_{21e}$$

[0111]

[0112] 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하여 측정한 전력 전송 효율은 실제 측정값과 근소한 차이를 보일 뿐, 거의 같은 것을 확인할 수 있다.

[0113] 또한, 본 발명의 실시예들에 따른 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하여 측정한 와전류 손실 비율은 실제 측정값과 근소한 차이를 보일 뿐, 거의 같은 것을 알 수 있다.

[0114] 이와 같이, 자기 결합 코일 회로의 등가 회로 모델링 방법을 이용하는 경우, 빠르고 정확하게 전력 전송 효율 및 와전류 손실을 산출할 수 있다.

[0115] 도 11은 본 발명의 실시예들에 따른 무선 전력 전송 시스템을 나타내는 도면이다.

[0116] 도 11을 참조하면, 본 발명의 실시예들에 따른 무선 전력 전송 시스템은 AC 전원을 입력받고, 송신 코일을 포함하는 송신부(100), 상기 송신부(100)로부터 무선 전력을 전송받고, 수신 코일을 포함하는 수신부(200), 및 상기 수신부(200)와 전기적으로 연결되는 부하 기기(300)를 포함할 수 있다.

[0117] 송신부(100)와 수신부(200)는 TX 안테나(110) 및 RX 안테나(210)를 이용하여 무선 전력을 송수신할 수 있다.

[0118] 송신부(100)의 상기 송신 코일 및 수신부(200)의 상기 수신 코일은 자기 결합 코일 회로를 구성할 수 있다. 상기 자기 결합 코일 회로는 상기 자기 결합 코일 회로의 구성 특성을 나타내는 제1 파라미터, 전도성 매질의 특성을 나타내는 제2 파라미터, 및 상기 송신 코일과 상기 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 나타내는 제3 파라미터를 기초로 와전류 임피던스를 산출하는 단계, 상기 와전류 임피던스를 반영하여 상기 자기 결합 코일 회로의 Z-파라미터를 산출하는 단계, 및 상기 Z-파라미터를 기초로 상기 자기 결합 코일 회로의 2포트 등가 회로를 모델링하는 단계에 의해 등가 회로로 모델링될 수 있다.

[0119] 상기 와전류 임피던스는 제1 와전류 임피던스(Z_{11_eddy}), 제2 와전류 임피던스(Z_{22_eddy}), 및 제3 와전류 임피던스(Z_{21_eddy})를 포함할 수 있다. 특히, 상기 제3 와전류 임피던스는 상기 수신 코일의 탄젠셜(tangential) 성분 전기장을 선적분하여 산출될 수 있다.

[0120] 무선 전력 전송 시스템은 자기 결합 코일 회로의 구성 특성, 전도성 매질의 특성, 및 송신 코일과 수신 코일 사이의 오정렬 특성을 모두 반영한 자기 결합 코일 회로의 등가 회로를 모델링할 수 있다.

[0121] 무선 전력 전송 시스템은 자기 결합 코일 회로의 등가 회로의 모델링을 이용하여, 전도성 매질에서 송신 코일과 수신 코일이 오정렬된 경우 자기 결합 코일 회로의 전력 전송 효율 및 와전류 손실을 간단하고 정확하게 산출할 수 있다. 다만, 이에 대해서는 상술한 바 있으므로, 그에 대한 중복되는 설명은 생략하기로 한다.

[0122] 이상에서 설명된 장치는 하드웨어 구성요소, 소프트웨어 구성요소, 및/또는 하드웨어 구성요소 및 소프트웨어 구성요소의 조합으로 구현될 수 있다. 예를 들어, 실시예들에서 설명된 장치 및 구성요소는, 예를 들어, 프로세서, 콘트롤러, ALU(arithmetic logic unit), 디지털 신호 프로세서(digital signal processor), 마이크로컴퓨터, FPA(field programmable array), PLU(programmable logic unit), 마이크로프로세서, 또는 명령(instruction)을 실행하고 응답할 수 있는 다른 어떠한 장치와 같이, 하나 이상의 범용 컴퓨터 또는 특수 목적 컴퓨터를 이용하여 구현될 수 있다. 처리 장치는 운영 체제(OS) 및 상기 운영 체제 상에서 수행되는 하나 이상의 소프트웨어 애플리케이션을 수행할 수 있다. 또한, 처리 장치는 소프트웨어의 실행에 응답하여, 데이터를 접근, 저장, 조작, 처리 및 생성할 수도 있다. 이해의 편의를 위하여, 처리 장치는 하나가 사용되는 것으로 설명된 경우도 있지만, 해당 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자는, 처리 장치가 복수 개의 처리 요소(processing

element) 및/또는 복수 유형의 처리 요소를 포함할 수 있음을 알 수 있다. 예를 들어, 처리 장치는 복수 개의 프로세서 또는 하나의 프로세서 및 하나의 콘트롤러를 포함할 수 있다. 또한, 병렬 프로세서(parallel processor)와 같은, 다른 처리 구성(processing configuration)도 가능하다.

[0123] 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.

[0124] 이상과 같이 실시예들이 비록 한정된 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. 그러므로, 다른 구현들, 다른 실시예들 및 특허청구범위와 균등한 것들도 후술하는 특허청구범위의 범위에 속한다.

부호의 설명

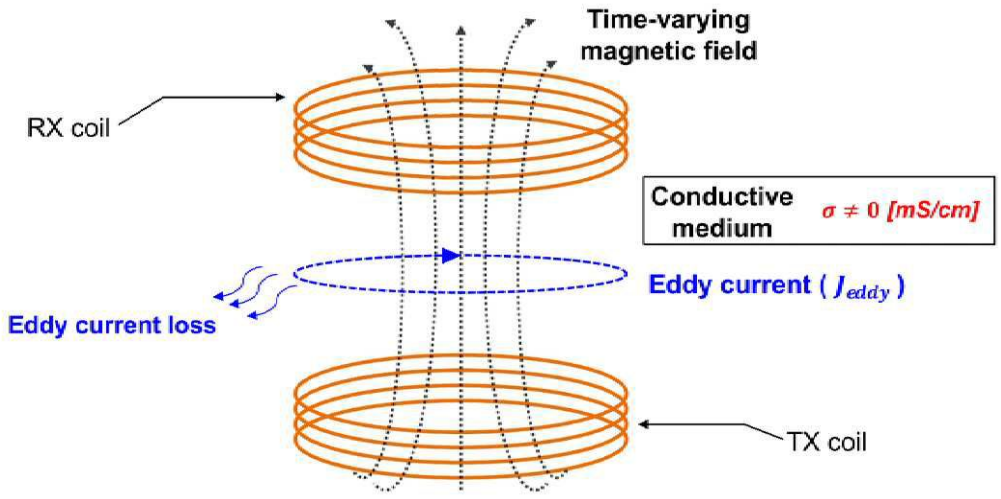
[0125] 100: 송신부

200: 수신부

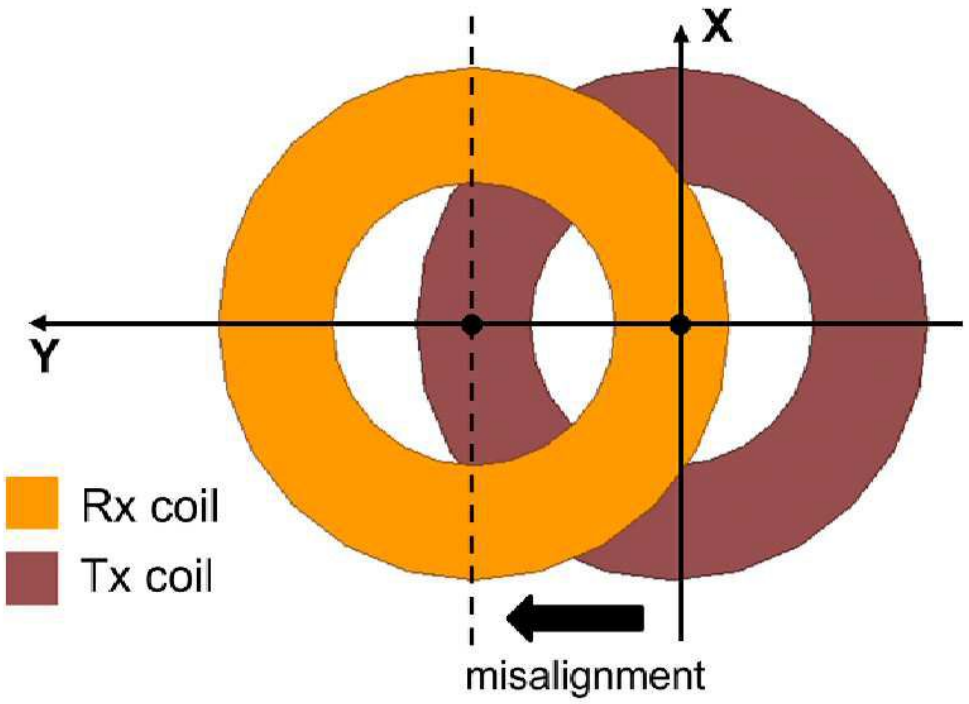
300: 부하 기기

도면

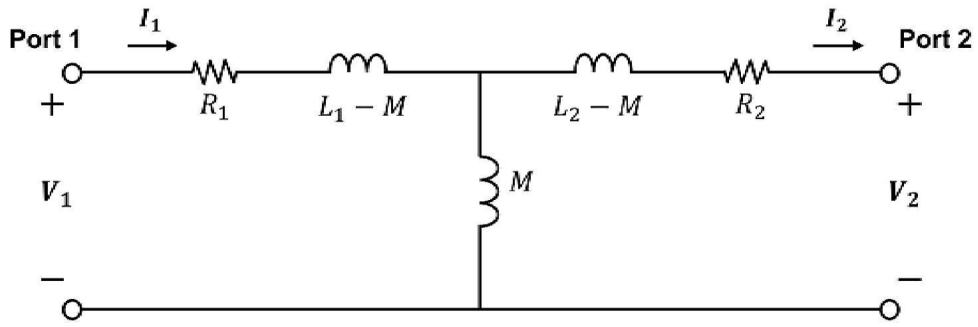
도면1



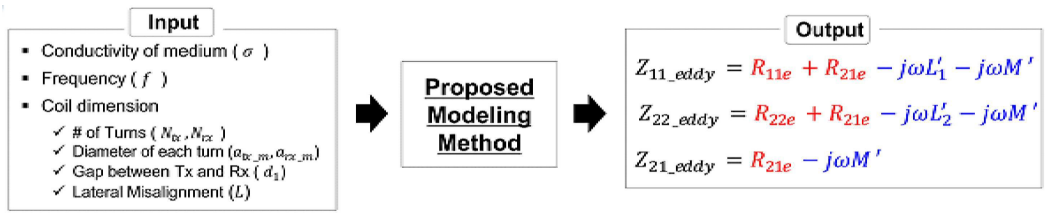
도면2


X
Y
Rx coil
Tx coil
misalignment

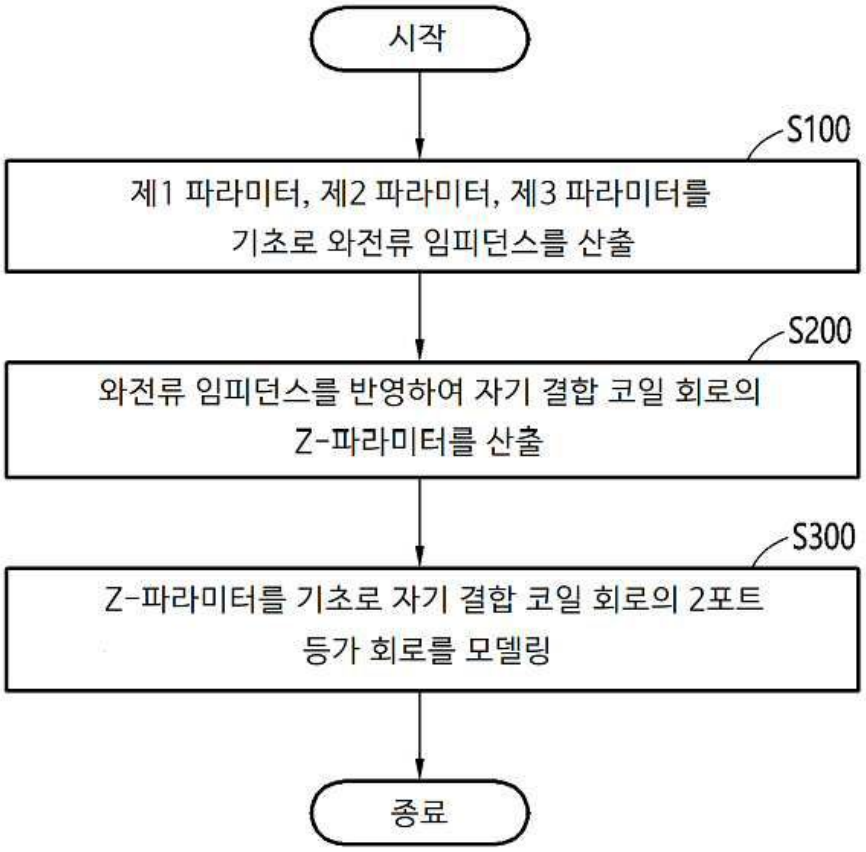
도면3


Port 1
I_1
R_1
$L_1 - M$
$L_2 - M$
R_2
I_2
Port 2
V_1
M
V_2

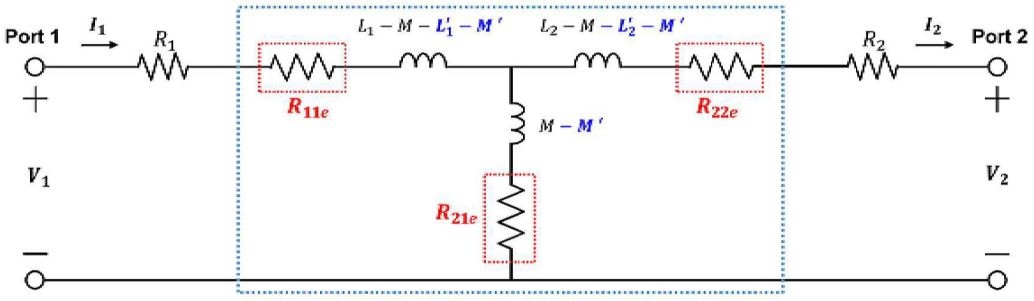
도면4


Input
Conductivity of medium (σ)
Frequency (f)
Coil dimension
# of Turns (N_{tx}, N_{rx})
Diameter of each turn (a_{tx_m}, a_{rx_m})
Gap between Tx and Rx (d_1)
Lateral Misalignment (L)
Proposed Modeling Method
Output
$Z_{11_eddy} = R_{11e} + R_{21e} - j\omega L_1' - j\omega M'$
$Z_{22_eddy} = R_{22e} + R_{21e} - j\omega L_2' - j\omega M'$
$Z_{21_eddy} = R_{21e} - j\omega M'$

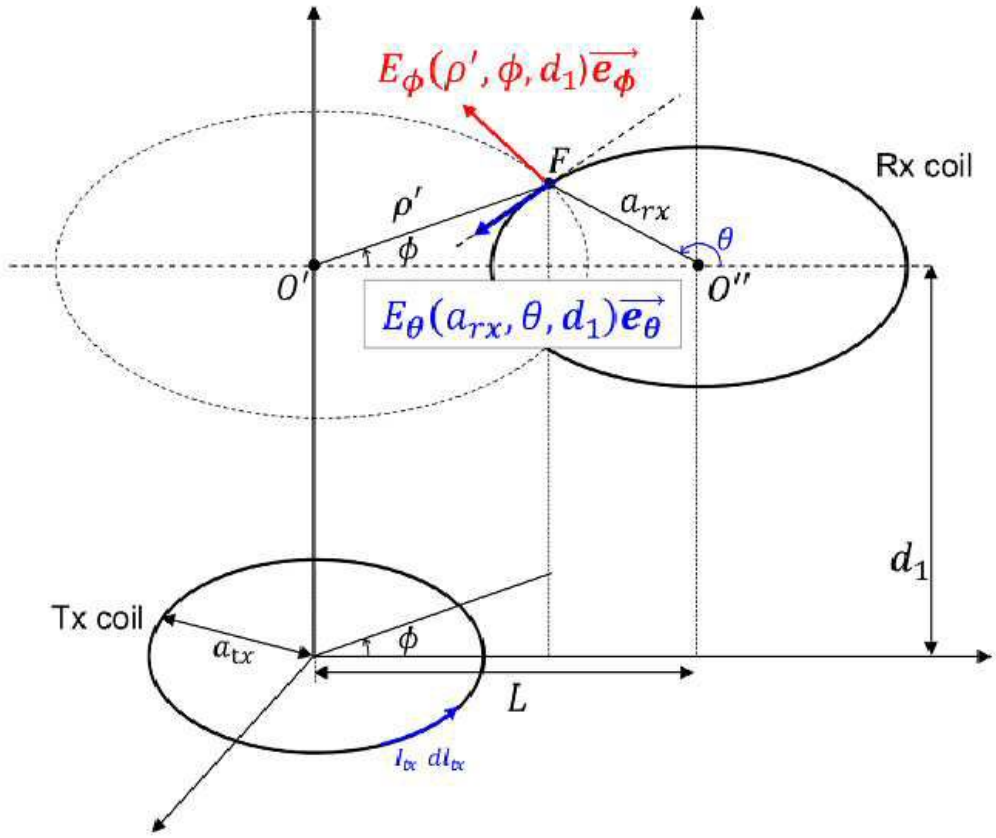
도면5


시작
S100
제1 파라미터, 제2 파라미터, 제3 파라미터를
기초로 와전류 임피던스를 산출
S200
와전류 임피던스를 반영하여 자기 결합 코일 회로의
Z-파라미터를 산출
S300
Z-파라미터를 기초로 자기 결합 코일 회로의 2포트
등가 회로를 모델링
종료

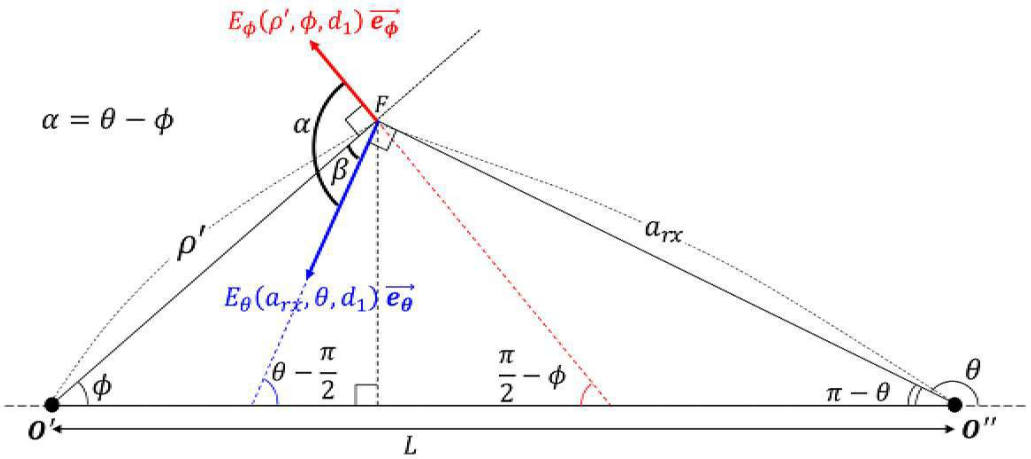
도면6


Port 1
I_1
R_1
$L_1 - M - L_1' - M'$
$L_2 - M - L_2' - M'$
R_2
I_2
Port 2
R_{11e}
$M - M'$
R_{22e}
V_1
R_{21e}
V_2

도면7


$E_\phi(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_\phi}$
F
Rx coil
ρ'
a_{rx}
ϕ
θ
O'
O''
$E_\theta(a_{rx}, \theta, d_1)\overrightarrow{e_\theta}$
d_1
Tx coil
a_{tx}
ϕ
L
$I_{tx}\ dl_{tx}$

도면8


$E_\phi(\rho', \phi, d_1)\ \overrightarrow{e_\phi}$
$\alpha = \theta - \phi$
α
F
β
ρ'
a_{rx}
$E_\theta(a_{rx}, \theta, d_1)\ \overrightarrow{e_\theta}$
$\theta - \frac{\pi}{2}$
$\frac{\pi}{2} - \phi$
$\pi - \theta$
θ
ϕ
O'
O''
L

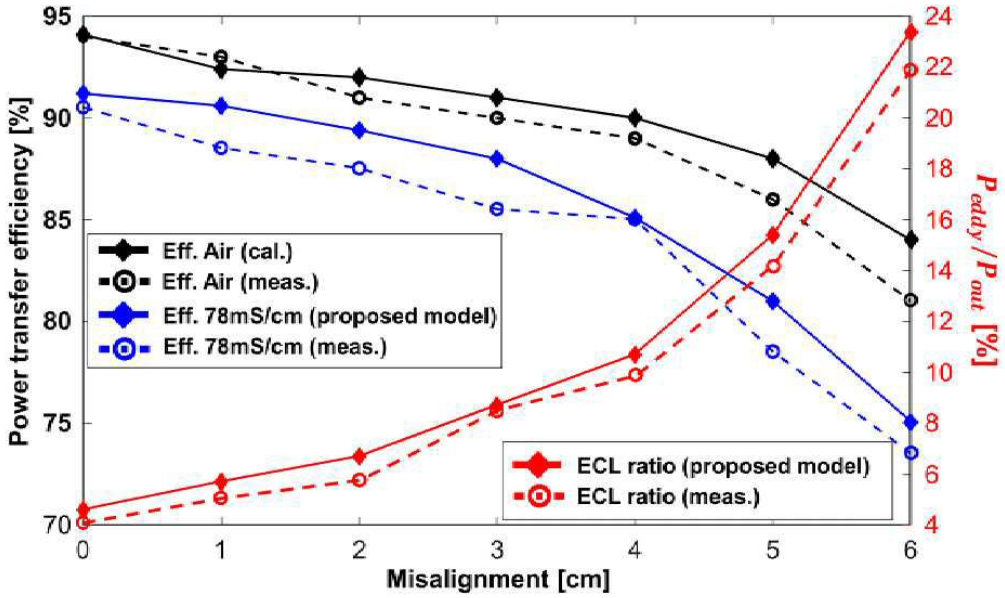
도면9

➢ **Tangential component of Rx coil path :**

$$E_\phi(\rho', \phi, d_1)\overrightarrow{e_\phi} \cdot \overrightarrow{e_\theta} = E_\phi(a_{rx}, \phi, d_1)\cos(\alpha) = E_\theta(a_{rx}, \theta, d_1) \quad \text{(eq.1)}$$

$$Z_{21_eddy} = \frac{1}{I_{tx}} \oint_0^{2\pi} E_\phi(\rho', \phi, d_1) \cdot \cos(\theta - \phi) \cdot a_{rx}\, d\theta \quad \text{(eq.2)}$$

도면10



도면11

