



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2025-0070405
(43) 공개일자 2025년05월20일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01R 31/12 (2006.01) G01R 19/00 (2021.01)
G01R 23/00 (2006.01) G01R 23/165 (2006.01)
G01R 27/26 (2006.01) G01R 31/08 (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01R 31/1272 (2013.01)
G01R 19/0053 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2023-0156568
(22) 출원일자 2023년11월13일
심사청구일자 2023년11월13일

(71) 출원인
국립부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 용소로 45, 부경대학교내 (대연동)
동국대학교 와이즈캠퍼스 산학협력단
경상북도 경주시 동대로 123 (석장동)
국립한밭대학교 산학협력단
대전광역시 유성구 동서대로 125 (덕명동)
(72) 발명자
이춘권
부산광역시 수영구 남천바다로21번길 24, 801호(광안동)
권구영
경기도 화성시 동탄순환대로20길 13, 2146동 1601호(목동, 동탄2신도시 베라체)
장승진
대전광역시 유성구 동서대로 125, N3동 208호(덕명동)
(74) 대리인
오위환, 박진기, 정기택

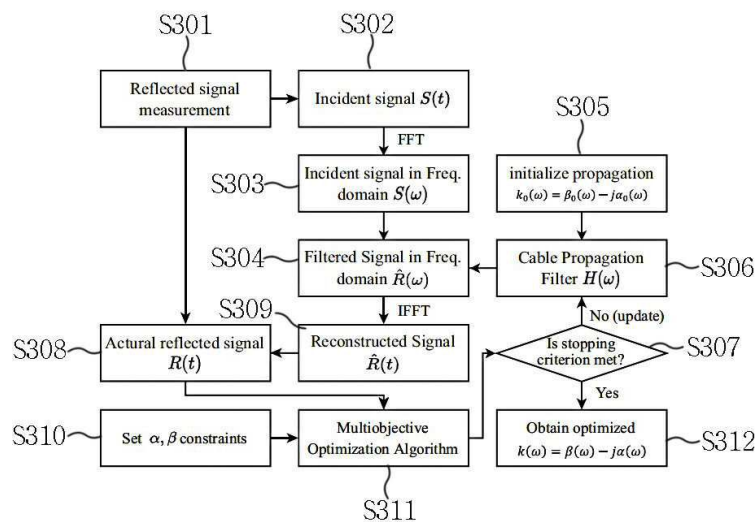
전체 청구항 수 : 총 13 항

(54) 발명의 명칭 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법

(57) 요약

본 발명은 케이블 끝지점 또는 결함에서 반사된 신호를 이용하여 케이블 절연에 따른 감쇠 및 위상변이를 추정하여 효율적인 열화 진단이 가능하도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법에 관한 것으로, 실제 측정된 반사신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 전파상수 추정부; 추정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 잡음 제거부; 전파 상수를 이용하여 케이블 내부 유전손실을 추정하는 유전손실 추정부;를 포함하는 것이다.

대표도 - 도3



(52) CPC특허분류

G01R 23/005 (2013.01)

G01R 23/165 (2013.01)

G01R 27/2617 (2013.01)

G01R 31/083 (2013.01)

G01R 31/1209 (2013.01)

이 발명을 지원한 국가연구개발사업

과제고유번호	1711181445
과제번호	2021R1G1A1093407
부처명	과학기술정보통신부
과제관리(전문)기관명	한국연구재단
연구사업명	개인기초연구(과기정통부)
연구과제명	딥러닝 기반 전력 설비 상태 모니터링 및 추정 기법 개발
기 여 율	1/1
과제수행기관명	부경대학교 산학협력단
연구기간	2023.03.01 ~ 2024.02.29

명세서

청구범위

청구항 1

실제 측정된 반사신호와 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 전파상수 추정부;

측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 잡음 제거부;

전파 상수를 이용하여 케이블 내부 유전손실을 추정하는 유전손실 추정부;를 포함하는 것을 특징으로 하는 반사 측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 2

제 1 항에 있어서, 전파상수 추정부는 전파상수 추정을 위하여,

각 단일 주파수를 가지는 인가 신호를 케이블에 인가하고 계측되는 신호를 주파수 별로 취득하고,

케이블에 인가하는 신호를 $S(t)$, 끝점에서 반사되는 신호를 $R(t)$ 라고 하면, 각 신호는,

$$S(t) = A \sin(\omega t) \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{2\tau}\right)$$

$$R(t, z) = A \sin(\omega t) \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{2\tau}\right) e^{-jk(\omega)z}$$

으로 정의되고,

여기서, A , ω , τ 는 각각 입사 신호의 크기, 주파수, 신호의 시간폭인 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 3

제 2 항에 있어서, 전파상수 추정부는 전파상수 추정을 위하여,

케이블 끝점에서 입사 신호 $S(t)$ 와 반사 신호 $R(t)$ 를 모두 식별하여 측정하고,

반사된 신호는 주파수 영역 $k_0(\omega)$ 에서 초기화된 전파 상수를 기반으로 신호 필터 $H(\omega)$ 를 통해 신호를 통

과시켜 케이블 끝점에서 전파상수 $\hat{R}(t)$ 를 추정하고,

추정된 반사 신호와 실제 반사 신호의 에너지 및 위치 차이를 목적 함수로 설정하고,

각 주파수별로 목적 함수의 가중 합이 최소화될 때까지 전파 상수를 최적화하는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 4

제 3 항에 있어서, 추정된 전파 상수 $\hat{R}(t)$ 를 기반으로 재구성된 신호는,

$$\hat{R}(t, \alpha(\omega), \beta(\omega)) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(S(t))e^{-j(\beta(\omega) - \alpha(\omega))2l})$$

으로 정의되고,

여기서, $\mathcal{F}$ 는 푸리에 변환이고, 케이블 내부 전파 상수 $\alpha(\omega)$ 는 케이블 내부의 신호 감쇄와 관련된 감쇄 상

수, $\beta(\omega)$ 는 신호의 위상 변화, 속도의 변화와 관련된 위상 상수인 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파 상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 5

제 4 항에 있어서, 재구성한 신호와 실제 반사된 신호와의 에너지 차이, 위치 차이를 최소화 하기 위한 목적 함수(objective function)는,

$$\min_{\alpha, \beta} \left\{ \int |\hat{R}(t, \alpha(\omega), \beta(\omega)) - R(t)|^2 dt \right\}$$

$$s.t. \quad 2l/(t_d + \tau) \leq 1/\beta(\omega) \leq 2l/(t_d - \tau)$$

$$0 \leq \alpha(\omega)$$

이고,

ΔE_R 는 신호간 에너지 차이, ΔT_r 는 신호 간 시간 차이이고,

t_d 는 상호상관에 의해 계산된 입사 신호와 반사 신호 사이의 시간 지연, K 는 두 목적 함수의 스케일을 조정하기 위한 가중치이고, t_0 는 반사된 신호의 중심 시간인 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 6

제 5 항에 있어서, 최적화 과정에서 국소 최소값에 도달하는 것을 방지하기 위해 전파 상수의 상한 및 하한 기준을 결정하고 해당 범위 내에서 $\alpha(\omega)$ 및 $\beta(\omega)$ 값을 먼저 초기화하고,

단계 간 목적함수 값의 변화 하한 임계값은 10^{-6} 으로 설정하고, 최적화 도중 목적함수가 임계값 이하로 떨어지면 최적화가 완료된 것으로 간주하고 과정을 중단하는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 7

제 5 항에 있어서, 측정 신호를 중심 값 ω_k 주위에 집중된 K 개의 주파수 협대역을 갖는 고유 모드 함수(intrinsic mode function; IMF) $u(k)$ 로 구성되는 것으로 가정하면,

$$R(t) = \sum_{k=1}^K u(k) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(\phi_k(t))$$

으로 정의되고.

여기서, $A_k(t)$ 와 $\phi_k(t)$ 는 IMF의 포락선과 위상인 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 8

제 7 항에 있어서, 각 IMF를 얻기 위해,

신호를 양의 주파수만을 갖는 해석적 신호로 변환하기 위해 힐베르트 변환이 사용하고,

각 IMF에 대한 신호의 주파수를 복조하여 IMF의 주파수가 0에 가까워지도록하고.

IMF의 주파수와 대역폭은 복조된 분석 신호 기울기의 L2-norm 제곱으로 추정하고, IMF가 도출되는 과정은,

$$\min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \frac{d}{dt} \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}$$

$$s.t. \sum_{k=1}^K u_k(t) = R(t)$$

으로 정의되는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 9

제 4 항에 있어서, 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 유전 손실을 추정하기 위하여, 케이블 내부의 저항률, 전도도, 유전율과 전파 상수와의 관계를

$$\alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \omega \sqrt{\mu \left(j\frac{\sigma}{\omega} - \epsilon \right)} = \omega \sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')}$$

으로 정의하고,

여기서, ϵ , μ , σ 는 유전율, 투자율 및 전도성인 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 10

제 9 항에 있어서, α 와 β 는,

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right)}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}$$

으로 정의되고,

케이블 내부의 유전 손실은,

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{2\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2}$$

으로 추정되는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치.

청구항 11

각 단일 주파수를 가지는 인가 신호를 케이블에 인가하고 계측되는 신호를 주파수 별로 취득하는 단계;

케이블의 인가하는 신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성 신호를 만드는 단계;

실제 측정된 반사신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 단계;

측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 단계;

추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 유전 손실을 추정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 방법.

청구항 12

제 11 항에 있어서, 잡음을 제거하는 단계에서,

계측 신호에서 취득되는 원하는 신호 외의 다른 주파수의 잡음들을 제거하기 위하여 VMD 알고리즘을 이용하여 신호를 필터링하는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 방법.

청구항 13

제 12 항에 있어서, 반사 신호의 주파수 대역폭을 나누고 신호의 에너지가 모여있는 구간에 집중하여 다른 주파수 대역폭에서 계측되는 신호를 제거하는 것을 특징으로 하는 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 방법.

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 케이블 열화 진단에 관한 것으로, 구체적으로 케이블 끝지점 또는 결함에서 반사된 신호를 이용하여 케이블 절연에 따른 감쇠 및 위상변이를 추정하여 효율적인 열화 진단이 가능하도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 케이블을 따라 전파되는 신호는 케이블의 전파 특성(전파상수)에 따라 크기 감쇄, 분산, 위상 변화를 거친다. 케이블에 결함이 있을 경우, 결함지점에서 반사되는 신호는 결함의 크기 및 종류에 대응하여 변화된 후 계측된다.

[0003] 종래 기술의 반사파 계측법은 계측된 반사파를 이용하여 분석하기 때문에 케이블의 길이 및 결함의 정도에 대응하는 결함의 정확한 정량화가 어려웠다. 케이블 결함을 정확히 정량화하기 위해서는 케이블 내 신호가 전파되면서 발생하는 정상적인 영향과 결함에 의한 영향을 분리해야 하지만, 이는 용이하지 않다.

[0004] 종래 기술의 시간-주파수 영역 반사파 처리법의 경우, 디지털 오실로스코프를 이용하여 반사 신호를 취득하고, 기준신호와 유사성을 평가하여 케이블을 진단하고 있다.

[0005] 이때, 상기 반사 신호는 케이블을 통과한 후의 신호를 계측한 것이기 때문에 케이블의 길이, 종류에 따라 감쇄 및 왜곡되므로, 긴 케이블일수록 오차 및 허위 경보율이 증가된다.

[0006] 따라서, 종래 기술들은 결함의 규모나 종류를 판단하기 보다는 케이블 내 결함 지점의 위치탐지에 초점을 맞추고 있는 상황이다.

[0007] 또한, 반사파 계측법으로 케이블 전체의 노화, 혹은 장기간 운영으로 인한 열경화 상태를 추정하는 것은 어렵다.

[0008] 현재, 케이블 전체 상태를 진단할 수 있는 상용화되어 한국전력공사에서 유일하게 사용되는 기법은 VLF tandelta으로서 고전압을 케이블에 인가하고 이를 통하여 유전손실을 전류의 비로 측정한다.

[0009] 하지만, 이 기술은 케이블 길이가 길어지면(약 1.5km) 결과값의 신뢰도가 굉장히 떨어지며(케이블 길이가 길어지면 모두다 상태 값이 정상으로 나옴) 인건비 및 고가의 고전압 인가 장비가 필요하다.

[0010] 따라서, 저전압 인가 및 신호의 인가 및 계측 장비만 필요하며 인건비 또한 절감이 가능한 반사파 계측법으로 케이블 전체의 노화, 혹은 장기간 운영으로 인한

[0011] 열경화 상태를 추정할 수 있도록 하는 새로운 기술의 개발이 요구되고 있다.

선행기술문헌

특허문헌

- [0012] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허 제10-1926995호
(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허 제10-2036790호
(특허문헌 0003) 대한민국 공개특허 제10-2023-0097961호

발명의 내용

해결하려는 과제

- [0013] 본 발명은 종래 기술의 케이블 열화 진단 기술의 문제점을 해결하기 위한 것으로, 케이블 끝지점 또는 결함에서 반사된 신호를 이용하여 케이블 절연에 따른 감쇠 및 위상변이를 추정하여 효율적인 열화 진단이 가능하도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0014] 본 발명은 케이블의 상태 이상 혹은 전체적인 노화로 인하여 열화되는 절연체의 상태를 케이블 끝지점에서 반사되어 계측되는 신호를 이용하여 케이블내 신호가 감쇄하고 위상이 변화하는 것에 관여하는 케이블 고유의 전파상수의 변화를 추정하고 이를 이용하여 전체적인 케이블 상태를 정확하게 판별할 수 있도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0015] 본 발명은 초저주파 탄텔타에 비해 저전압 및 고주파 신호를 사용하여 진단장비를 소형화할 수 있고, 현장 포설 케이블에 적용하기에 유리하도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0016] 본 발명은 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 것에 의해 케이블 절연의 무결성을 평가하고 국부적인 결함 및 장기 운전에 따른 전체 케이블 절연의 변화를 모두 정밀하게 진단할 수 있도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0017] 본 발명은 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 것에 의해 진단 비용 및 인건비를 감소시키고, 저전압을 인가하여 시험이 가능하여 안전확보 및 케이블 실험으로 인하여 장비 자체 내부가 받는 스트레스를 줄일 수 있도록 한 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법을 제공하는데 그 목적이 있다.
- [0018] 본 발명의 다른 목적들은 이상에서 언급한 목적으로 제한되지 않으며, 언급되지 않은 또 다른 목적들은 아래의 기재로부터 당업자에게 명확하게 이해될 수 있을 것이다.

과제의 해결 수단

- [0019] 상기와 같은 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치는 실제 측정된 반사신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 전파상수 추정부; 측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 잡음 제거부; 전파 상수를 이용하여 케이블 내부 유전손실을 추정하는 유전손실 추정부;를 포함하는 것을 특징으로 한다.
- [0020] 다른 목적을 달성하기 위한 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 방법은 각 단일 주파수를 가지는 인가 신호를 케이블에 인가하고 계측되는 신호를 주파수 별로 취득하는 단계; 케이블의 인가하는 신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성 신호를 만드는 단계; 실제 측정된 반사신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 단계; 측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 단계; 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 유전 손실을 추정하는 단계;를 포함하는 것을 특징으로 한다.

발명의 효과

- [0021] 이상에서 설명한 바와 같은 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법은 다음과 같은 효과가 있다.
- [0022] 첫째, 케이블 끝지점 또는 결함에서 반사된 신호를 이용하여 케이블 절연에 따른 감쇠 및 위상변이를 추정하여

효율적인 열화 진단이 가능하도록 한다.

- [0023] 둘째, 케이블의 상태 이상 혹은 전체적인 노화로 인하여 열화되는 절연체의 상태를 케이블 끝지점에서 반사되어 계측되는 신호를 이용하여 케이블내 신호가 감쇄하고 위상이 변화하는 것에 관여하는 케이블 고유의 전파 상수의 변화를 추정하고 이를 이용하여 전체적인 케이블 상태를 정확하게 판별할 수 있도록 한다.
- [0024] 셋째, 초저주파 탄델타에 비해 저전압 및 고주파 신호를 사용하여 진단장비를 소형화할 수 있고, 현장 포설 케이블에 적용하기에 유리하도록 한다.
- [0025] 넷째, 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 것에 의해 케이블 절연의 무결성을 평가하고 국부적인 결함 및 장기 운전에 따른 전체 케이블 절연의 변화를 모두 정밀하게 진단할 수 있도록 한다.
- [0026] 다섯째, 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 것에 의해 진단 비용 및 인건비를 감소시키고, 저전압을 인가하여 시험이 가능하여 안전확보 및 케이블 실험으로 인하여 장비 자체 내부가 받는 스트레스를 줄일 수 있도록 한다.

도면의 간단한 설명

- [0027] 도 1은 케이블 RLGC 모델 구성도
- 도 2는 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치의 구성도
- 도 3은 반사 신호 초기화 및 재구성을 포함하는 전파 상수 최적화 프로세스 구성도
- 도 4a와 도 4b는 원시 반사 신호 및 VMD 결과를 나타낸 것으로, (a)280kHz, 25 μ s 기준 신호의 반사 신호 (b)VMD는 IMF 1~9의 결과 그래프
- 도 5는 VMD에 의한 반사 신호 필터링 결과를 나타낸 것으로, (a)반사 신호의 VMD 모드, (b)VMD 1~4의 합(고주파), (c)VMD 5~8(관심주파수)의 합과, (d)VMD 9(저주파) 그래프
- 도 6은 전파상수 추정 결과를 나타낸 것으로, (a)10MHz 제곱 정현파 신호 재구성 결과, (b)60MHz 제곱 정현파 신호 재구성 결과, (c)감쇠상수 추정 결과, 그리고 (d)위상상수 추정 결과 그래프
- 도 7은 전파상수 추정 결과 검증 결과를 나타낸 것으로, (a)가우스 선형 처프 신호 및 (b)임펄스 신호 그래프
- 도 8은 각 선트 오류에서 측정된 신호 결과 그래프
- 도 9는 시뮬레이션된 각 선트 결함의 손실 탄젠트 값을 나타낸 그래프
- 도 10은 3상 감쇠상수 추정 결과 그래프

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0028] 이하, 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법의 바람직한 실시 예에 관하여 상세히 설명하면 다음과 같다.
- [0029] 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법의 특징 및 이점들은 이하에서의 각 실시 예에 대한 상세한 설명을 통해 명백해질 것이다.
- [0030] 도 1은 케이블 RLGC 모델 구성도이고, 도 2는 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치의 구성도이다.
- [0031] 본 개시에서 사용되는 용어는 본 개시에서의 기능을 고려하면서 가능한 현재 널리 사용되는 일반적인 용어들을 선택하였으나, 이는 당 분야에 종사하는 기술자의 의도 또는 관례, 새로운 기술의 출현 등에 따라 달라질 수 있다. 또한, 특정한 경우는 출원인이 임의로 선정한 용어도 있으며, 이 경우 해당되는 발명의 설명 부분에서 상세히 그 의미를 기재할 것이다. 따라서 본 개시에서 사용되는 용어는 단순한 용어의 명칭이 아닌, 그 용어가 가지는 의미와 본 개시의 전반에 걸친 내용을 토대로 정의되어야 한다.
- [0032] 명세서 전체에서 어떤 부분이 어떤 구성요소를 "포함"한다고 할 때, 이는 특별히 반대되는 기재가 없는 한 다른 구성요소를 제외하는 것이 아니라 다른 구성요소를 더 포함할 수 있음을 의미한다. 또한, 명세서에 기재된 "...부", "모듈" 등의 용어는 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위를 의미하며, 이는 하드웨어 또는

소프트웨어로 구현되거나 하드웨어와 소프트웨어의 결합으로 구현될 수 있다.

[0033] 특히, 적어도 하나의 기능이나 동작을 처리하는 단위들은 적어도 하나의 프로세서를 포함하는 전자 장치로 구현될 수 있고, 기능이나 동작을 처리하는 방식에 따라 전자 장치에 적어도 하나의 주변 장치가 연결될 수 있다. 주변 장치들은 데이터 입력 장치, 데이터 출력 장치, 데이터 저장 장치를 포함할 수 있다.

[0034] 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법은 케이블 끝지점 또는 결함에서 반사된 신호를 이용하여 케이블 절연에 따른 감쇠 및 위상변이를 추정하여 효율적인 열화 진단이 가능하도록 한 것이다.

[0035] 이를 위하여, 본 발명은 케이블의 상태 이상 혹은 전체적인 노화로 인하여 열화되는 절연체의 상태를 케이블 끝지점에서 반사되어 계측되는 신호를 이용하여 케이블내 신호가 감쇄하고 위상이 변화하는 것에 관여하는 케이블 고유의 전파 상수의 변화를 추정하고 이를 이용하여 전체적인 케이블 상태를 정확하게 판별할 수 있도록 하는 구성을 포함할 수 있다.

[0036] 도 1은 dz 길이의 케이블 RLGC 모델을 나타낸 것으로, 케이블의 등가회로는 도체의 저항(R), 케이블 주변의 자기장으로 인한 고주파 인덕턴스(L), 기하학적으로 관련된 정전 용량(C), 도체 또는 도체와 피복층 사이의 셉트 컨덕턴스(G)이다.

[0037] 이상적인 케이블 또는 사운드 케이블은 C에 비해 G가 작으므로 도체에서 전달되는 전력 손실이 거의 없다.

[0038] 그러나 장기간의 운전이나 고장으로 인해 도체와 외장층 사이 또는 도체와 접지 사이의 절연성이 저하되면 G와 C의 비율이 증가하여 케이블 내부의 전력 손실이 증가한다.

[0039] RLGC의 관계와 비율은 케이블의 전파 상수를 결정한다.

[0040] 전압과 전류에 관한 텔레그래프 방정식은 다음과 같다.

수학식 1

$$\begin{aligned}\frac{\partial}{\partial z}V(z,t) &= -L\frac{\partial}{\partial t}I(z,t) - RI(z,t) \\ \frac{\partial}{\partial z}I(z,t) &= -C\frac{\partial}{\partial t}V(z,t) - GV(z,t)\end{aligned}$$

[0041]

[0042] 케이블의 주파수 종속 RLGC 값을 알고 있는 경우 전파 상수(k)와 특성 임피던스(Zc)는 다음과 같이 얻을 수 있다.

수학식 2

$$\begin{aligned}k(\omega) &= \sqrt{(R(\omega) + j\omega L(\omega))(G(\omega) + j\omega C(\omega))} \\ Z_c &= \sqrt{\frac{R(\omega) + j\omega L(\omega)}{G(\omega) + j\omega C(\omega)}}\end{aligned}$$

[0043]

[0044] 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치는 도 2에서와 같이, 실제 측정된 반사신호와 추정한 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 전파상수 추정부(10)와, 측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 잡음 제거부(20)와, 전파 상수를 이용하여 케이블 내부 유전손실을 추정하는 유전손실 추정부(30)를 포함한다.

[0045] 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 방법은 각 단일 주파수를 가지는 인가 신호를 케이블에 인가하고 계측되는 신호를 주파수 별로 취득하는 단계와, 케이블의 인가하

는 신호와 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성 신호를 만드는 단계와, 실제 측정된 반사신호와 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 재구성한 신호를 비교하여 최적 케이블 내 전파 상수를 추정하는 단계와, 측정 신호에 포함되어 있는 잡음을 제거하는 단계와, 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 유전 손실을 추정하는 단계를 포함한다.

[0046] 잡음을 제거하는 단계에서, 측정 신호에서 취득되는 원하는 신호 외의 다른 주파수의 잡음들을 제거하기 위하여 VMD 알고리즘을 이용하여 신호를 필터링 한다.

[0047] 반사 신호의 주파수 대역폭을 나누고 신호의 에너지가 모여있는 구간에 집중하여 다른 주파수 대역폭에서 측정되는 신호를 없앤다.

[0048] 구체적으로, 먼저 각 단일 주파수를 가지는 인가 신호를 케이블에 인가하고 측정되는 신호를 주파수 별로 취득한다.

[0049] 이때 케이블에 인가하는 신호를 $S(t)$, 끝점에서 반사되는 신호를 $R(t)$ 라고 하면, 각 신호는 다음과 같다.

수학식 3

$$S(t) = A \sin(\omega t) \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{2\tau}\right)$$

[0050]

[0051] 입사 신호가 케이블에 적용되면 전파된 신호는 케이블의 전파 상수로 인해 크기 감쇠 및 위상 변이를 겪는다.

[0052] 케이블의 끝점에서 반사되어 되돌아오는 측정된 신호는 다음과 같이 표현될 수 있습니다.

수학식 4

$$R(t, z) = A \sin(\omega t) \text{rect}\left(\frac{t - \tau}{2\tau}\right) e^{-jk(\omega)z}$$

[0053]

[0054] 여기서, A, ω_0 , τ 는 각각 입사 신호의 크기, 주파수, 신호의 시간폭이다.

[0055] 도 3은 반사 신호 초기화 및 재구성을 포함하는 전파 상수 최적화 프로세스 구성도이다.

[0056] 전체 케이블에 대한 전파 상수를 추정하는 절차는 다음과 같다.

[0057] 먼저 케이블 끝점에서 입사 신호 S(t)와 반사 신호 R(t)를 모두 식별하고 측정한다.(S301)(S302)(S308)

[0058] 그런 다음, 반사된 신호는 주파수 영역 $k_0(\omega)$ 에서 초기화된 전파 상수를 기반으로 신호 필터 $H(\omega)$ 를 통해 신호를 통과시켜 케이블 끝점에서 전파 상수 $\hat{R}(t)$ 가 추정된다.(S305)(S306)

[0059] 감쇠 상수는 신호의 에너지 손실과 관련이 있고 위상 상수는 신호의 위치와 관련이 있다.

[0060] 따라서 추정된 반사 신호와 실제 반사 신호의 에너지 및 위치 차이를 목적 함수로 설정하고, 각 주파수별로 목적 함수의 가중 합이 최소화될 때까지 전파 상수를 튜닝한다.

[0061] 대상 케이블은 결함이 없다고 가정하고, 케이블에 결함이 있더라도 케이블 끝에서 반사되는 신호의 에너지가 감소하여 결함이 전파 상수에 미치는 영향을 고려할 수 있다.

[0062] 추정된 전파 상수 $\hat{R}(t)$ 를 기반으로 재구성된 신호는 다음과 같다.(S309)

수학식 5

$$\hat{R}(t, \alpha(\omega), \beta(\omega)) = \mathcal{F}^{-1}(\mathcal{F}(S(t))e^{-j(\beta(\omega) - j\alpha(\omega))2l})$$

여기서, $\mathcal{F}$ 는 푸리에 변환이다.

이때, 케이블 내부 전파 상수 $\alpha(\omega)$ 는 케이블 내부의 신호 감쇄와 관련된 감쇄 상수, $\beta(\omega)$ 는 신호의 위상 변화, 속도의 변화와 관련된 위상 상수이다.(S310)

재구성한 신호와 실제 반사된 신호와의 에너지 차이, 위치 차이를 최소화 하기 위한 목적 함수(objective function)는 다음과 같다.

수학식 6

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, \beta} & \left\{ \int |\hat{R}(t, \alpha(\omega), \beta(\omega)) - R(t)|^2 dt \right\} \\ \text{s.t.} & \quad 2l/(t_d + \tau) \leq 1/\beta(\omega) \leq 2l/(t_d - \tau) \\ & \quad 0 \leq \alpha(\omega) \end{aligned}$$

ΔE_R 는 신호간 에너지 차이, ΔT_r 는 신호 간 시간 차이이다.

t_d 는 상호상관에 의해 계산된 입사 신호와 반사 신호 사이의 시간 지연, K 는 두 목적 함수의 스케일을 조정하기 위한 가중치이고, t_0 는 반사된 신호의 중심 시간이다.

도 3의 최적화 과정에서 국소 최소값에 도달하는 것을 방지하기 위해 전파 상수의 상한 및 하한 기준을 결정하고 해당 범위 내에서 $\alpha(\omega)$ 및 $\beta(\omega)$ 값을 먼저 초기화한다.

단계 간 목적함수 값의 변화 하한 임계값은 10^{-6} 으로 설정하고, 최적화 도중 목적함수가 임계값 이하로 떨어지면 최적화가 완료된 것으로 간주하고 과정을 중단한다.

각 주파수에 대한 시간 영역에서 반사 신호의 크기와 위상을 정확하게 측정함으로써 전파 상수 추정 알고리즘의 정확도가 향상된다.

각각의 반사된 신호는 입사된 신호와 동일한 주파수를 공유하므로 주파수 정보를 고려한 VMD 기반으로 신호 잡음이 감소된다.

먼저, 원래의 측정 신호는 다음과 같이 표현되는 중심 값 ω_k 주위에 집중된 K 개의 주파수 협대역을 갖는 고유 모드 함수(intrinsic mode function; IMF) $u(k)$ 로 구성된다고 가정한다.

수학식 7

$$R(t) = \sum_{k=1}^K u(k) = \sum_{k=1}^K A_k(t) \cos(\phi_k(t))$$

여기서, $A_k(t)$ 와 $\phi_k(t)$ 는 IMF의 포락선과 위상이다.

각 IMF를 얻기 위해 다음 프로세스가 수행된다.

먼저, 신호를 양의 주파수만을 갖는 해석적 신호로 변환하기 위해 힐베르트 변환이 사용한다.

그런 다음 각 IMF에 대한 신호의 주파수를 복조하여 IMF의 주파수가 0에 가까워지도록 한다.

IMF의 주파수와 대역폭은 복조된 분석 신호 기울기의 L2-norm 제곱으로 추정된다.

IMF가 도출되는 과정은 다음 방정식으로 표현될 수 있다.

수학식 8

$$\min_{u_k, \omega_k} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \frac{d}{dt} \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}$$

$$s.t. \sum_{k=1}^K u_k(t) = R(t)$$

도 4a와 도 4b는 원시 반사 신호 및 VMD 결과를 나타낸 것으로, (a)280kHz, 25 μ s 기준 신호의 반사 신호 (b)VMD 는 IMF 1~9의 결과 그래프이다.

케이블은 주파수와 관련하여 손실이 많은 매체이므로 기준 신호의 크기만 균일하게 감쇠되지 않으며 다양한 감쇠/위상 편이가 주파수 범위에 걸쳐 반사 신호에 영향을 미친다.

도 4b는 반사신호를 시간영역에서 기준신호의 주파수인 280kHz를 포함한 9개의 IMF로 나눈 결과이다.

고주파 대역의 IMF는 신호가 인가되거나 끝나는 가장자리에 에너지가 집중되는 경향이 있으며, 외부 환경에서 측정된 노이즈를 포함하고 있다.(IMF 1~4)

또한, 신호 인가를 위한 커넥터의 영향으로 인해 반사된 신호의 저주파 대역은 전파된 신호가 고주파 대역에 비해 훨씬 덜 감쇠되므로 반사 신호의 왜곡을 유발한다.

따라서, 따라서 저주파 대역의 IMF도 필터링해야 한다.(IMF 9).

도 5는 VMD에 의한 반사 신호 필터링 결과를 나타낸 것으로, (a)반사 신호의 VMD 모드, (b)VMD 1~4의 합(고주파), (c)VMD 5~8(관심주파수)의 합과, (d)VMD 9(저주파) 그래프이다.

도 5는 반사신호의 FFT 결과와 주파수 범위에 따른 IMF 분류를 보여준다.

도 5b에서 대부분의 신호 에너지는 IMF 5~8에 집중되어 있다.

반면, IMF 1~4는 입사 신호가 갑자기 상승 및 하강하는 0.3×10^{-4} 및 0.55×10^{-4} 지점의 고주파 신호로 주로 구성된다.(도 5a).

저주파 대역의 IMF는 반사신호가 발생하는 구간에서 신호의 왜곡을 발생시켜 전파상수가 명확하다.(도 5c)

[0094] 신호 필터링을 위한 임계값은 각 측정 신호로부터 기준 신호 주파수의 $\pm 10\%$ 이내의 IMF만을 구하여 고주파수 대역의 노이즈와 저주파 대역의 신호 왜곡 성분을 제거한다.

[0095] 추정된 케이블 내부 전파 상수를 이용하여 유전 손실을 추정한다.

[0096] 케이블 내부의 저항률, 전도도, 유전율과 전파 상수와의 관계는 다음과 같다.

수학식 9

$$\alpha(\omega) + j\beta(\omega) = \omega \sqrt{\mu \left(j \frac{\sigma}{\omega} - \epsilon \right)} = \omega \sqrt{\mu(\epsilon' - j\epsilon'')}$$

[0097]

[0098] 여기서, ϵ , μ , σ 는 유전율, 투자율 및 전도성이다.

[0099] 식을 이용하여 α 와 β 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

수학식 10

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} - 1 \right)}$$

$$\beta = \omega \sqrt{\frac{\mu\epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon} \right)^2} + 1 \right)}$$

[0100]

[0101] 케이블 내부의 유전 손실은 케이블을 통하여 전력을 보낼 때의 감쇄되는 영향과 관련이 있다.

[0102] 이는 다음과 같이 추정된다.

수학식 11

$$\tan\delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{2\alpha\beta}{\beta^2 - \alpha^2}$$

[0103]

[0104] 따라서, 케이블이 전체적으로 열경화 되거나 장기간 운영으로 인한 노화가 발생하는 경우 유전 손실값인 $\tan\delta$ 가 증가하게 되고 이를 이용하여 케이블 상태 값을 추정할 수 있다.

수학식 12

$$\frac{\partial \tan\delta}{\partial \alpha} = -\frac{2\beta(\alpha^2 + \beta^2)}{\alpha^2 - \beta^2}$$

$$\frac{\partial \tan\delta}{\partial \beta} = \frac{2\alpha(\alpha^2 + \beta^2)}{\alpha^2 - \beta^2}$$

[0105]

- [0106] 유전 특성의 측면에서, α 에 대한 손실 탄젠트의 부분 도함수는 항상 양수이기 때문에 열적 열화가 악화되고 전파 중 신호 감쇠가 증가하고, 그에 따라서 손실 탄젠트도 그에 따라 증가한다.
- [0107] 반대로, β 에 대한 손실 탄젠트의 부분 도함수는 항상 음수이고, β 의 역수는 전파 속도와 관련이 있다.
- [0108] 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법의 성능 검증하기 위하여 다음과 같은 실험을 진행하였다.
- [0109] 실험에 사용되는 일반 계측 및 제어(I&C) 케이블은 길이 70m, 클래스 1E 등급이며 전체 크기가 16AWG인 2개의 도체로 구성된다.
- [0110] 원전에서 많이 사용되는 EPR과 CSPE(클로로술폰화 폴리에틸렌)를 케이블 절연재와 자켓으로 제조한다.
- [0111] 케이블의 길이를 고려하여 입사신호와 반사신호가 중첩되지 않는 시간으로 200ns를 선택하였다.
- [0112] 지속 시간은 일반 케이블의 전파 속도(1.6×10^8 m/s)를 고려하면 약 16m에 해당한다.
- [0113] 입사 신호의 주파수는 10MHz에서 60MHz로 1MHz 증가했고, 이는 다음의 저주파가 케이블 끝에서 충분히 전파 및 반사되고, 고주파가 해당 시간 내에 최소 2주기를 갖게 된다는 점을 고려한 것이다.
- [0114] 도 6은 전파상수 추정 결과를 나타낸 것으로, (a)10MHz 제곱 정현파 신호 재구성 결과, (b)60MHz 제곱 정현파 신호 재구성 결과, (c)감쇠상수 추정 결과, 그리고 (d)위상상수 추정 결과 그래프이다.

표 1

Type of incident signal	Location			Energy		
	Measurement [s]	Estimation [s]	Error [%]	Measurement [J]	Estimation [J]	Error [%]
Sinusoidal Signals	1.584e-6	1.592e-6	0.505	908.81	972.52	7.010
Gaussian Linear Chirp Signal	1.946e-6	1.949e-6	0.103	8.1758	8.6334	5.597
Impulse Signal	1.245e-6	1.257e-6	0.964	0.5737	0.5552	3.225

- [0115]
- [0116] 표 1은 추정된 위치와 에너지를 나타낸 것이다.
- [0117] 도 7은 전파상수 추정 결과 검증 결과를 나타낸 것으로, (a)가우스 선형 처프 신호 및 (b)임펄스 신호 그래프이다.
- [0118] 그리고 도 8은 각 섀트 오류에서 측정된 신호 결과 그래프이고, 도 9는 시뮬레이션된 각 섀트 결함의 손실 탄젠트 값을 나타낸 그래프이다.

표 2

	Phase	Proposed Algorithm	VLF TD	DeltaG
Short Probe	A	0.0178	0.199	18.6
	B	0.0186	0.209	18.7
	C	0.0175	0.213	19.6
Long Probe	A	0.0234	0.353	28.7
	B	0.0249	0.358	29.9
	C	0.0263	0.405	29.5

- [0119]
- [0120] 도 10은 3상 감쇠상수 추정 결과 그래프이다.
- [0121] 표 2는 본 발명에서 제안된 알고리즘과 VLF TD, DeltaG의 프로브 길이에 따른 케이블 유전손실 진단 결과를 보

여준다.

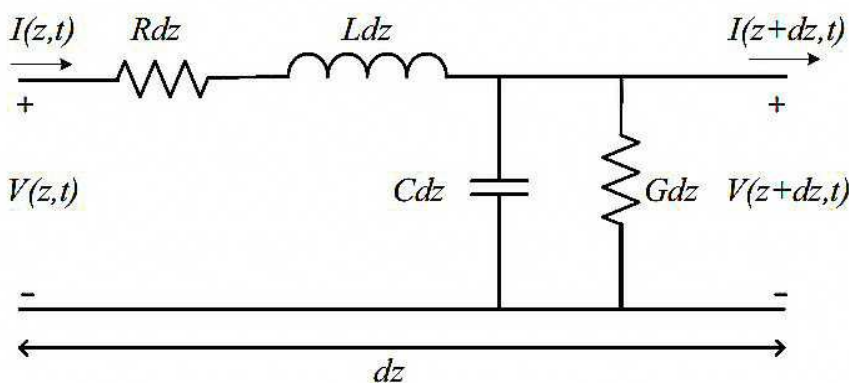
- [0122] 3상 케이블의 경우 세 가지 진단 방법 모두 서로 다른 규모에서 유사한 유전 손실 값을 갖는다.
- [0123] 프로브 길이가 길어질수록 신호가 더 감쇠되고, 케이블 끝에서 반사되는 신호의 크기도 더 감쇠된다. 따라서 케이블의 유전 손실은 짧은 프로브보다 긴 프로브에서 더 컸다.
- [0124] 또한, 제안된 알고리즘을 기반으로 한 손실탄젠트는 IV-B절의 손실탄젠트 값에 비해 약 절반 정도 감소하였다.
- [0125] 100m 케이블에 비해 케이블 길이가 8km로 늘어나면서 주파수 범위가 1/100 정도로 줄어들었기 때문이다.
- [0126] 제안된 알고리즘의 유전 손실 값과 VLF TD 및 DeltaG 결과의 Pearson 상관 계수는 각각 0.9889 및 0.9707이다.
- [0127] 따라서, 제안된 알고리즘은 유전손실에 따른 케이블의 절연 건전성을 평가하는데 사용될 수 있다.
- [0128] 이상에서 설명한 본 발명에 따른 반사측정 기반의 전파상수 및 유전손실을 이용하는 케이블 열화 진단을 위한 장치 및 방법은 케이블의 상태 이상 혹은 전체적인 노화로 인하여 열화되는 절연체의 상태를 케이블 끝지점에서 반사되어 계속되는 신호를 이용하여 케이블내 신호가 감쇄하고 위상이 변화하는 것에 관여하는 케이블 고유의 전파 상수의 변화를 추정하고 이를 이용하여 전체적인 케이블 상태를 정확하게 판별할 수 있도록 한 것이다.
- [0129] 이상에서의 설명에서와 같이 본 발명의 본질적인 특성에서 벗어나지 않는 범위에서 변형된 형태로 본 발명이 구현되어 있음을 이해할 수 있을 것이다.
- [0130] 그러므로 명시된 실시 예들은 한정적인 관점이 아니라 설명적인 관점에서 고려되어야 하고, 본 발명의 범위는 전술한 설명이 아니라 특허청구 범위에 나타나 있으며, 그와 동등한 범위 내에 있는 모든 차이점은 본 발명에 포함된 것으로 해석되어야 할 것이다.

부호의 설명

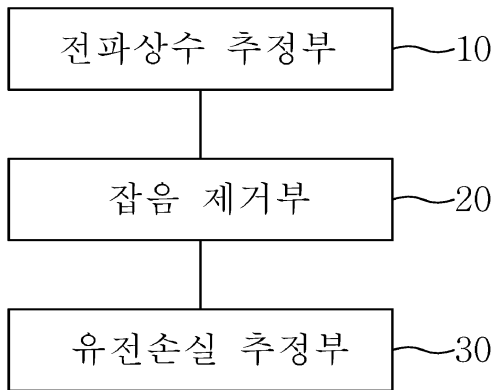
- [0131] 10. 전파상수 추정부
20. 잡음 제거부
30. 유전손실 추정부

도면

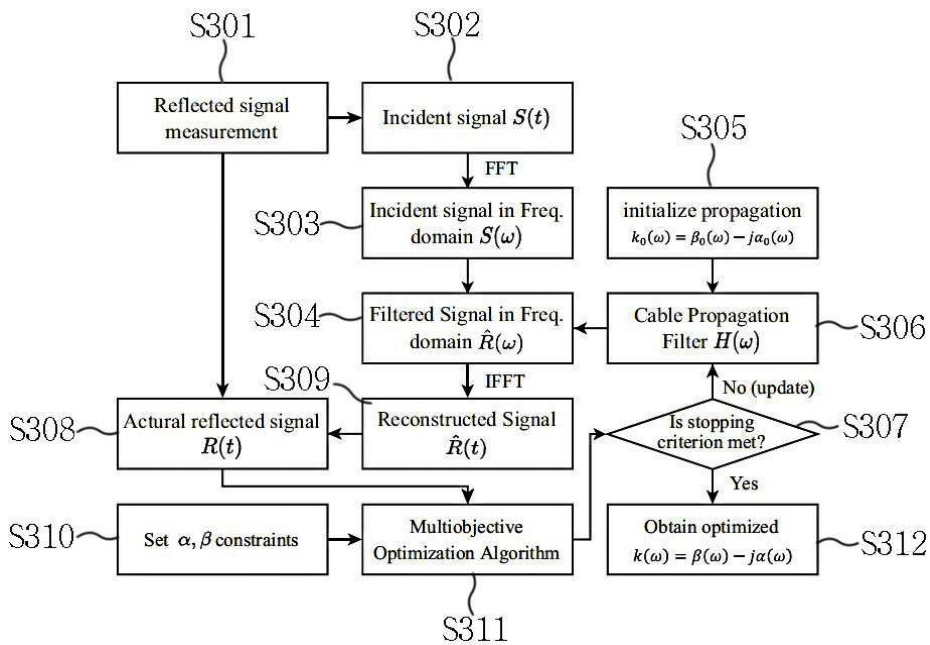
도면1



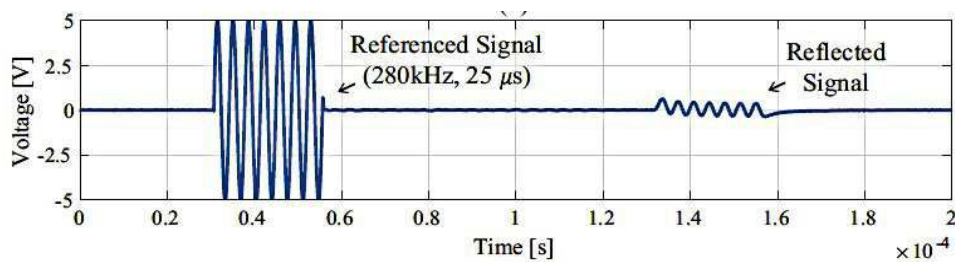
도면2



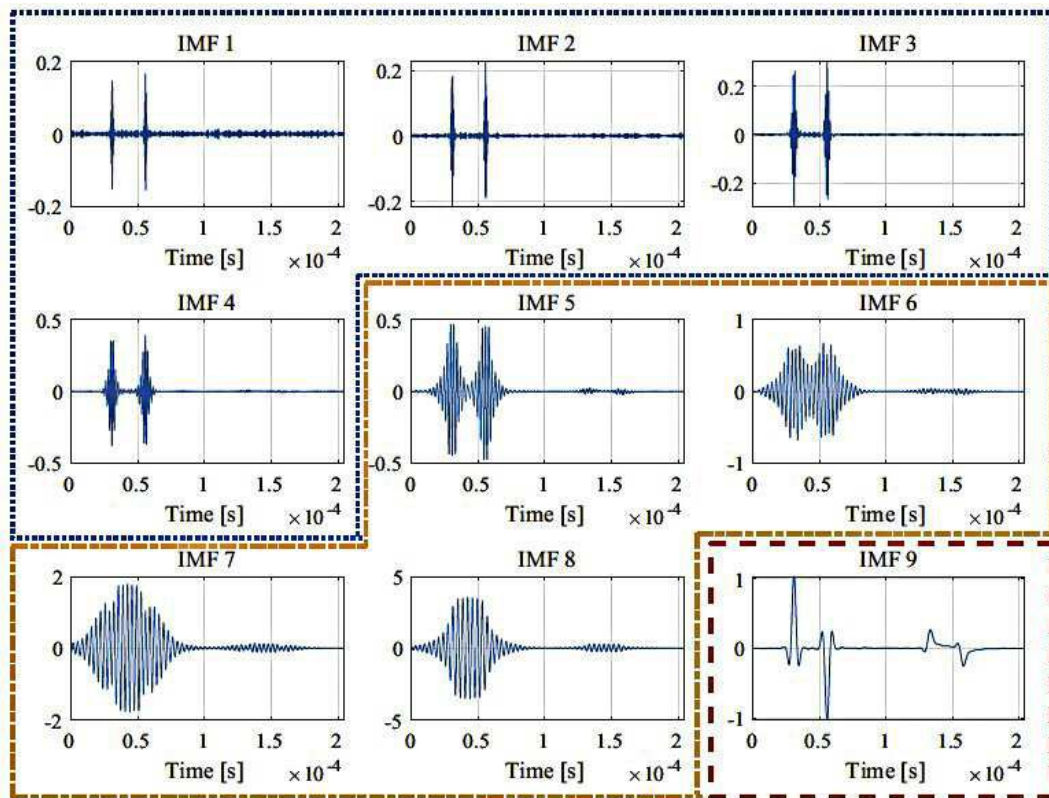
도면3



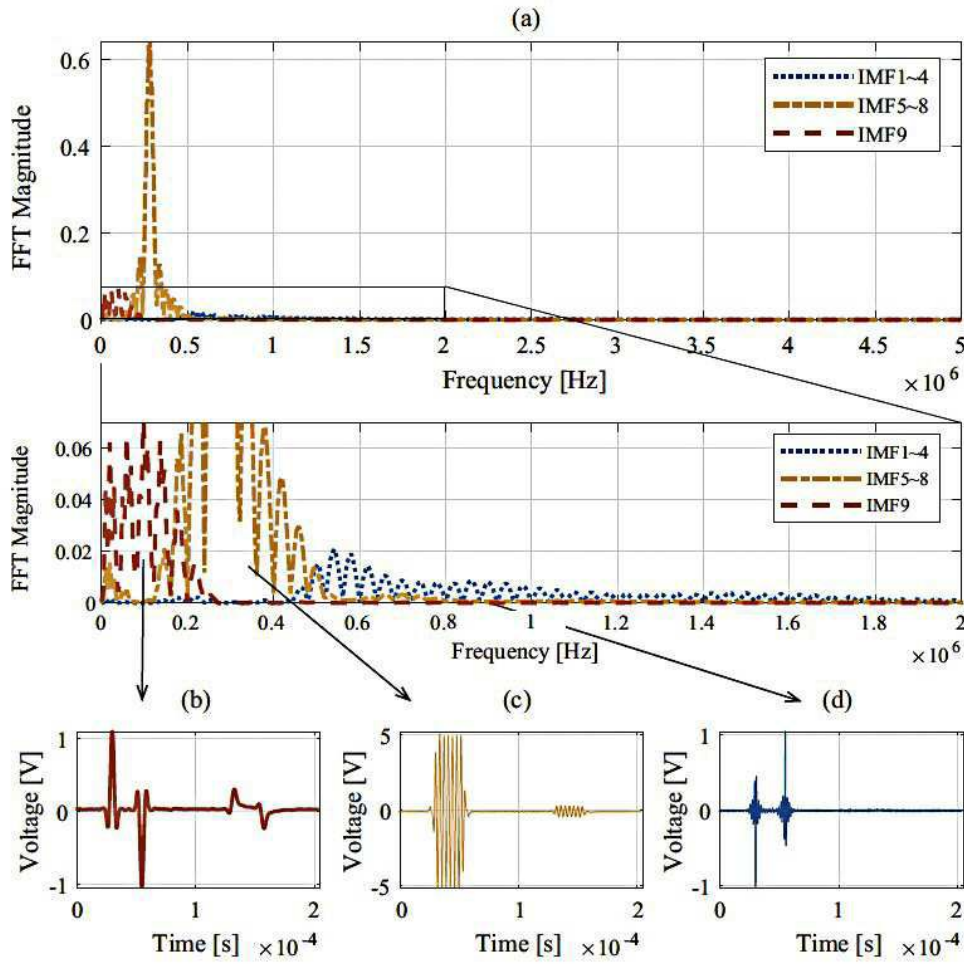
도면4a



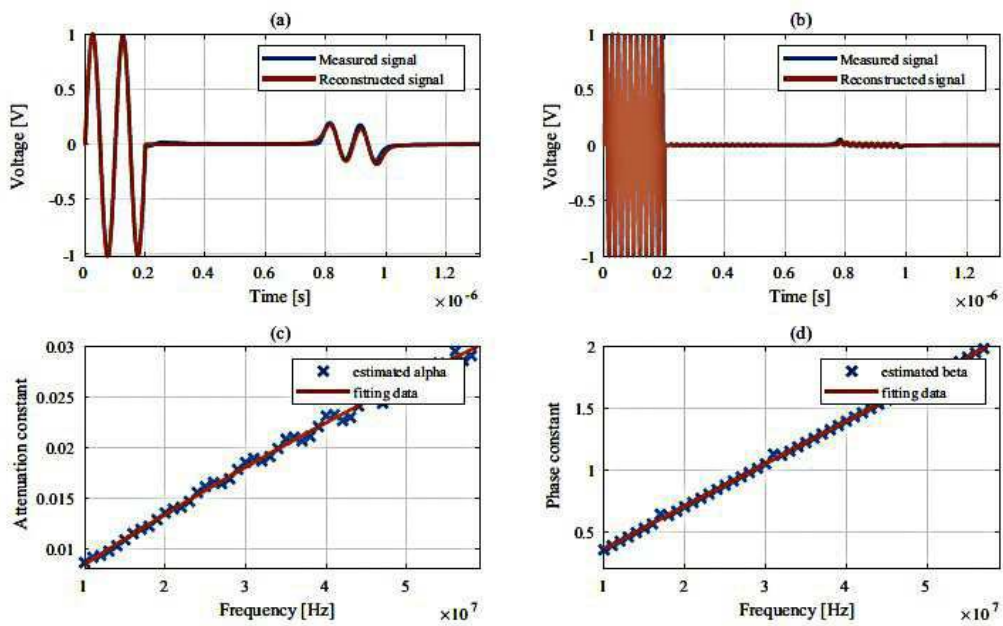
도면4b



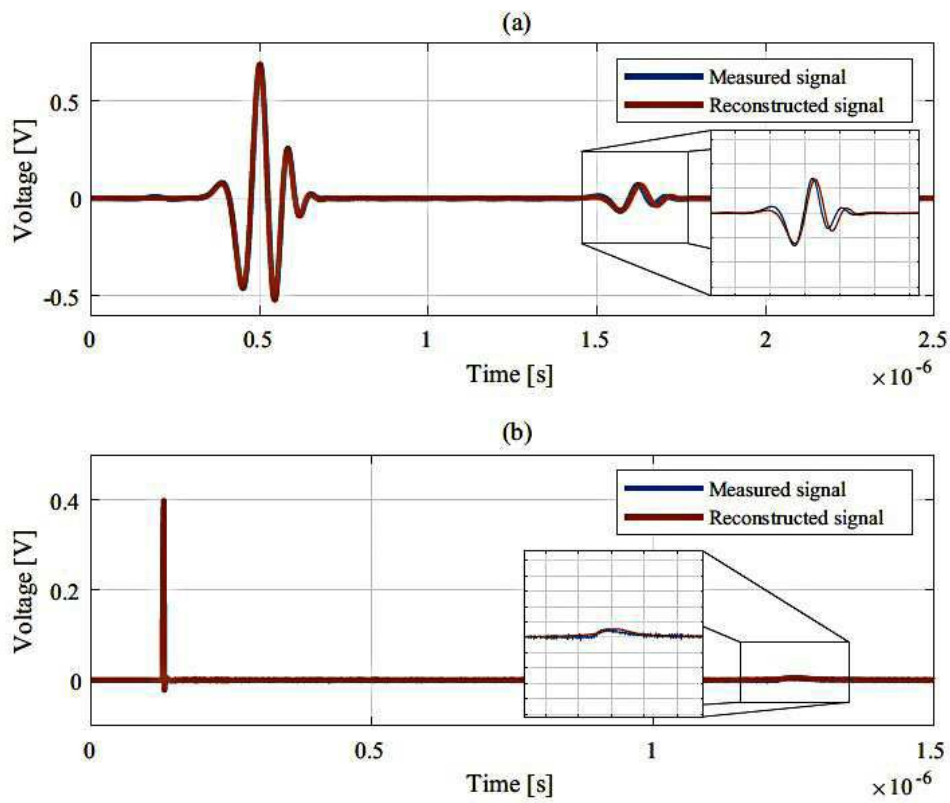
도면5



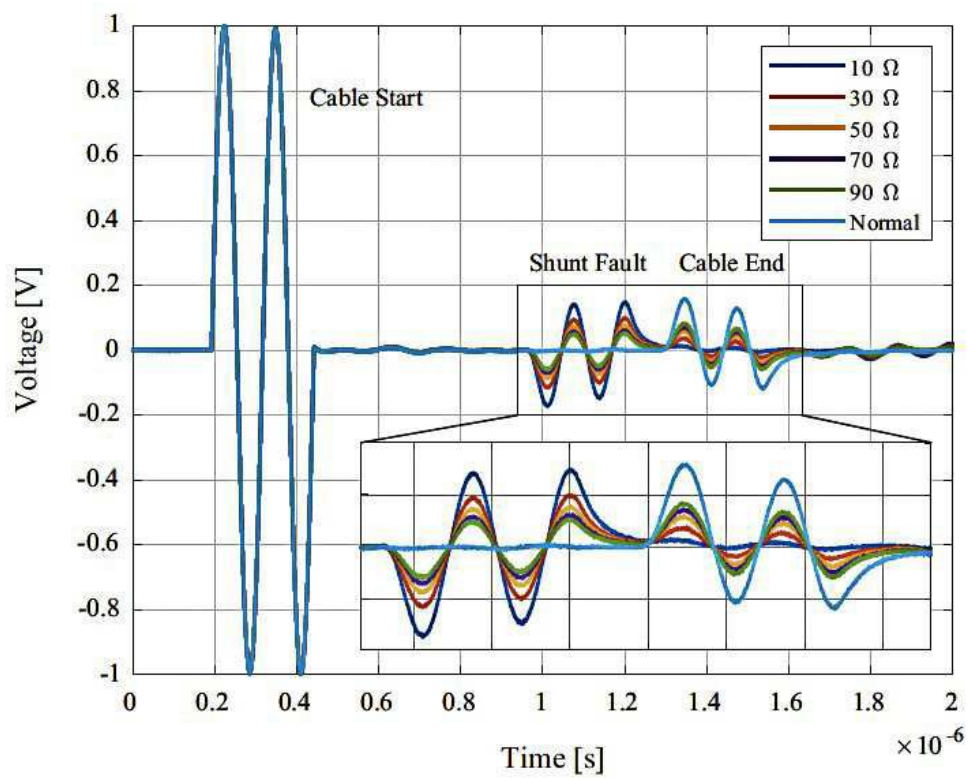
도면6



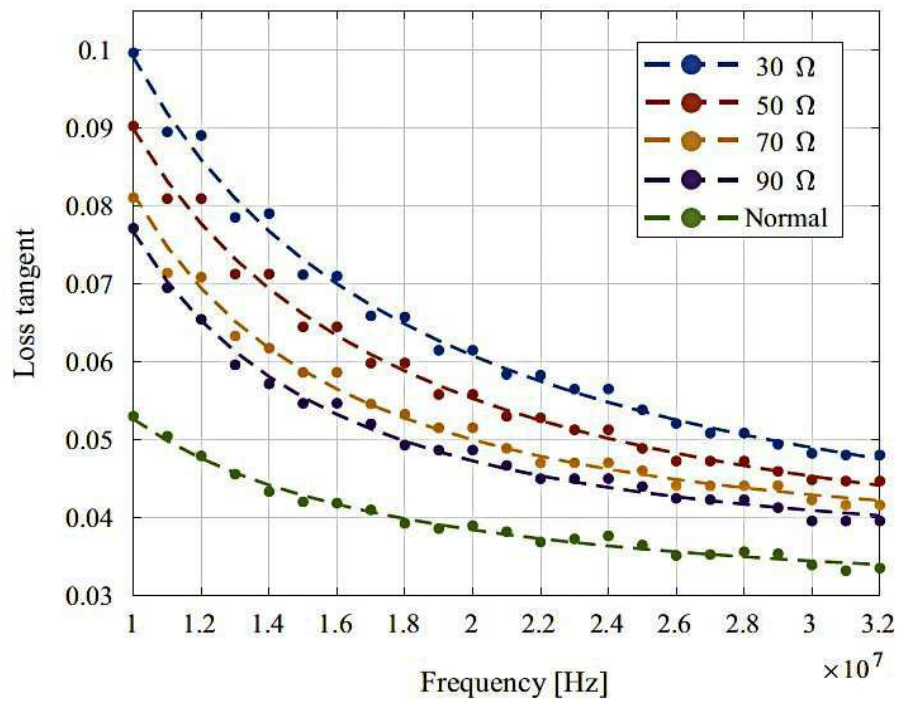
도면7



도면8



도면9



도면10

