

Mother Wavelet Transform using Distribution Utility of Fault Point Extraction

박인덕[†] · 이승환^{*} · 최광진^{**} · 김시경^{***}
 (In-Deok Park · Seung-Hwan Lee · Kwang-Jin Choi · Si-Kyung Kim)

Abstract - This paper caused a distribution utility to generation of analysis fault several cases on the ground of substation in a energy meter three phase current, voltage data measurement to fault type and characteristics. Mother wavelet transformation of suitable to method algorism from the distribution utility to generation of fault in image impedance etc several parameter for utility characteristics effective to probatory fault point extraction.

Key Words : Mother wavelet transform, Distribution utility, Fault point

1. 서 론

전력 계통에서 배전 선로는 변전소와 수용가를 연결하여 전력을 공급하는 역할을 하며 대기 중에 노출되어 있어 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오동작 그 외 다양한 사고가 원인이 되어 고장이 빈번하게 발생한다. 따라서 배전계통의 고장 분석 및 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내어 신속하게 고장 복구하는 것이 정전 비용을 최소화 할 수 있다. 또한, 전력 공급 서비스 질을 높이는 측면에서 배전계통의 고장점 분석 및 고장점 표정이 매우 중요한 요소로 대두되고 있다. 배전 선로에서 고장이 발생할 경우, 배전계통의 고장점 검출장치가 없다면 배전계통 관리자는 고장 점을 찾아내기 위해 광범위한 송배전 선로구간을 확인하여야 한다. 이러한 작업은 많은 비용과 인력, 정전비용이 요구된다. 이러한 문제점을 해결 하기위하여, 송배전 선로에서 발생되어지는 고장에 대하여 변전소로 부터 고장 점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘이 활발히 연구되어 왔다.[1] 전력계통의 고장점 검출 방법은 크게 진행파를 이용하는 방법과 고장 임피던스법을 이용하는 방법으로 크게 구분할 수 있으며[4,5,6] 이 두가지 기법은 3상 전류 전압을 측정하는 전력량계 배치 방법에 따라 크게 단일단 방식(Single Ended Method)과 양단 표정기법(Double Ended Method)으로 구분된다. 단종점 방식은 한 개의 전력량계를 변전소 인출단에 설치하여 고장 발생 배전선 한단 정보를 계측하여 고장점을 표정하는 방식이며, 이중종점 방식은 두 개의 전력량계를 이용하여 고장 발생 배전선 양단 정보를 계측하여 이용하는

방법 이다. 양단 정보를 사용하는 이중종점 방식의 경우 단종점 방식에 비하여 고장점 검출시 수반되는 오차가 적지만 부가적으로 GPS 및 통신장비 등 다양한 부가 장비들이 필요하게 되어 가격상승과 장치 운영 보수 유지의 문제점이 있다.[2,3] 현재 산업현장에서는 적용성 및 실용성에서 장점을 가지는 단종점 방식이 가장 널리 사용되고 있으며[7,8]. 단종점 방식의 고장 추정 정확도를 향상시키기 위하여 신경 회로망 기법, 평형회로의 대칭좌표법등을 이용한 여러 가지의 기법을 적용하여 보다 정확한 고장점을 검출하는 기법들이 제안되었다.[6] 그러나 이러한 기법들은 배전 선로의 비동질성, 부하 전류의 변동성, 부하 탭의 존재 등의 이유로 제안된 기법의 적용이 어려움이 있다. 또한, 배전계통은 많은 분기선을 포함하는 방사상계통 구조를 가지고 있으므로 부하에 대한 정보의 부족으로 부하단 임피던스를 얻기가 매우 어려워 적용에 어려움이 있었다. 본 논문에서는 배전계통의 특징인 계통의 불평형, 많은 분기선, 부하 정보에 대한 부족 등을 효과적으로 처리할 수 있도록 원형 웨이브릿 변환을 이용한 알고리즘을 적용하여 배전계통의 고장점 표정 시스템을 제시하고자 한다.

2. 배전선로의 선로고장 표정기법

2.1 배전계통 고장 표정 알고리즘

배전 시스템에 대한 다양한 고장 특성 및 고장 표정의 분석을 위하여 지금까지 다양한 고장 표정 기법이 개발되어 왔다. 선로 고장 표정 기법들은 크게 단일단 와 양단 표정 기법으로 나뉜다.

- 전송파를(Travelling Wave)를 이용한 양단 표정기법 : 고장 발생 배전계통의 양끝선로에서 전송파의 도착 시간차이를 측정 하는 기법이다. 따라서 전송파의 도착 시간차이 측정을 위하여 광대역(Wideband Communication)이 필요하며 양단의 계측 데이터를 동시에 취할 수 있는 통신망이 요구된다. 일반적으로 광대역 및 전송파의 도착 시간차이를 계측하기위해 부가 시설이 요구되므로 현재 많이 사

* 정 회 원 : 대덕대 전기과 교수 · 공박
 ** 비 회 원 : 중부대 대학원 초빙교수 · 공박
 *** 정 회 원 : 공주대 공대 전기전자정보학과 교수 · 공박
 † 교신저자, 정회원 : 대덕대 전기과 전임강사 · 공박
 E-mail : han7770@ddc.ac.kr
 접수일자 : 2009년 6월 30일
 최종완료 : 2009년 9월 17일

용 되고 있지는 않다.

- 전송파를 이용한 단일단 표정기법 : 이 기법은 HVDC와 같이 양단 계측이 필요치 않은 배전선로에 사용되고 있으며 따라서 광대역 및 양단의 계측 데이터를 동시에 취합할 수 있는 통신망이 필요치 않다. 현재 실제 시스템에 적용하기에는 좀 더 선행 연구가 필요한 상황이며 아직 실제 계통에는 많이 사용되지 않고 있는 상황이다.
- 단일단 임피던스 측정 고장표정 기법: 고장 배전 선로의 한 쪽 측(변전소)에서 고장 발생 배전 계통 라인 측을 바라본 피상임피던스(apparent impedance)를 계산 한다. 광대역 및 양단의 계측 데이터를 동시에 취합 할 수 있는 통신망이 필요치 않고, 운영 및 설치에 있어 다른 기법보다 우수성을 가지고 있어, 실제 현장에서 매우 실질적인 고장 표정 기법으로 고려되고 있다. 이 기법을 이용한 디지털 고장 표정 방식이 사용되고 있는데 이 방식은 아날로그 방식에 비하여 성능측면에서 우수한 점을 가지고 있다. 고장 표정 알고리즘을 적용하기 위하여 소요되는 비용은 비교적 저렴하며 또한 새로운 하드웨어의 추가 없이 수행할 수 있으므로 상대적으로 적용이 용이한 장점을 가진다.
- 양단 임피던스 고장 추정 알고리즘(Two ended impedance based fault locator) : 고장 배전 선로의 양쪽 측 측 변전소 측과 부하 종단에 대한 전류 및 전압 계측치가 주어지면 이 계측 값을 기반으로 고장거리를 표정 하는 기법이다. 이 기법은 단중 임피던스 기법을 사용하면 배전 선로 영상 임피던스에 대한 정보 없이 지락사고에 대한 고장을 표정하는 장점을 가진다. 그러나, 이 기법은 전송파를 이용한 양단 표정기법과 같이 고장 배전 선로의 양쪽, 즉 변전소 측과 부하 종단에 대한 전류 및 전압 계측치를 전송할 수 있는 광대역이 필요하며 또한 양단의 계측 데이터를 동시에 취합 할 수 있는 통신망이 요구되는 단점을 가지고 있다.

변전소 인출단에서 계측이 가능한 고장 계통 전류, 전압에 대하여 다비치 웨이브릿 변환을 취한 후 이들 값으로부터 계통의 고장 임피던스를 추출, 고장 표정기법에 적용하고자 한다.

2.2 배전계통 고장 모델

2.2.1 고장사고 과도현상

배전계통 지락 사고시 고장 거리 표정을 위하여 배전 계통 사고시 발생하는 과도 상태 상황에서의 전류, 전압 특성을 분석하여야 한다. 과도상태에서 고장 전 전류와 고장 후 전류는 다른 여러 파라미터에 비하여 상대적으로 큰 변화량의 변화가 있으며 이와 같은 급격한 전류량의 변동은 다음과 같은 두가지 파라미터와 연관된다. 첫째 고장 사고 발생 시 고장 난 상(phase)의 전압이 다른 상의 전압에 비하여 급격히 감소된다. 전압이 감소되는 현상을 전압의 방전(Discharge)을 고려 할 수 있다. 둘째는 두 개의 정상 상(Phase)의 전압의 크기는 고장 발생 상에 대하여 상대적으로 증가 한다. 이로 인하여 두 개의 정상 상에 충전 변동(Charge Deviation)이 발생 하며 계통내의 3상 시스템은 이들 전압의 균형을 이루기 위하여 내부 보상(Compensation)을 수행하게 된다. 이러한 충전 변동의 과도 상태를 고장 표정을 위하여 사용 할 수 있다. 고장발생시 수반되는 충전

변동이 가지는 주파수 성분은 공급전원의 주파수에 비하여 상대적으로 저주파 성분을 가지며 동시에 계통의 과도 상태 상전압의 진폭 변동에 큰 영향을 끼친다. 그림 1은 변전소 계통 고장 발생을 나타내며 이때 발생 되는 충전 변동의 주파수는 식 (1)과 같이 결정된다. 그림 1에서 배전계통 고장 발생 시 과도상태에 있어서 충전 변동 계통 모델(a)과 이에 대응되는 등가회로(b)를 나타낸다.

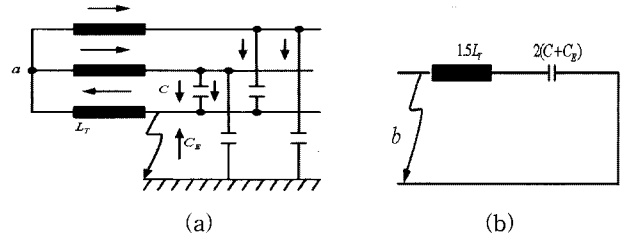


그림 1 충전 변동 (a) 계통 모델 (b) 등가회로
Fig. 1 Charge Deviation (a) utility model (b) equivalent circuit

$$W_c = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_{eq}}} = \frac{1}{\sqrt{3L_T(C+C_E)}} \quad (1)$$

여기서, $L_{eq} = 1.5L_T$, $C_{eq} = 2(C+C_E)$, L_T 변전소 변압기 상 인덕턴스, C 상간 캐피시턴스, C_E 상-접지 캐피시턴스 이다. 그림 1 회로에서 계통고장 순시전압이 최대인 순간에 발생되어지고 과도상태 발생시 고장 전류의 크기는 식 (2)와 같다.

$$\hat{i}_c = \frac{C_{eq} w_c}{3C_E w_f} \hat{J}_c \quad (2)$$

여기서 w_f 는 기본 주파수, w_c 는 과도상태 주파수, \hat{J}_c 는 고장 발생시 정상상태의 고장전류.

식 (2)으로부터 고장 과도 상태시 나타나는 전류 및 임피던스에 대한 분석을 통하여 고장 정상상태에 나타나는 고장 전류 및 임피던스 특성을 예측할 수 있다.

3. 웨이브릿 변환을 이용한 고장 검출

3.1 웨이브릿 변환을 이용한 임피던스계산 알고리즘

웨이브릿 변환(Wavelet Transform)은 시간 및 주파수에 대하여 국부성을 가지며, 비정상상태의 신호를 해석하는데 유용하다. 따라서 과도상태의 파형을 가지는 고장 계통 전류, 전압 을 분석하는데 있어 웨이브릿 변환은 적합한 성질을 가지고 있다. 웨이브릿 변환은 주어진 시간함수를 실수의 2 차원 평면 $L^2(R)$ 에서 직교기저함수(orthogonal basis function)들의 집합을 형성하고 있는 웨이브릿 평면으로 투사하여 서로 다른 분해능을 갖는 신호들을 변환시킴으로서 주어진 전력량계 전류 및 전압 신호를 각각 다른 분해능에서 해석할 수 있는 변환이다. 웨이브릿 변환에서의 기저함수들은 원형(mother) 웨이브릿을 천이(translation) 및 확장/수축(dilation)을 시킴으로서 만들어진다. 이에 대한 웨이브릿 기저함수들의 선형결합은 식 (3)과 같다.

$$\psi_{m,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad b \in R, a \neq 0 \quad (3)$$

여기서 a 는 원형 웨이브릿을 확장/수축시키는 스케일 변수이고, b 는 천이를 나타내는 천이변수이다. 어떤 신호 $f(t)$ 에(전류 및 전압) 대한 연속(Continuous)웨이브릿 변환은 식 (4)와 같다.

$$Wf(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\psi\left(\frac{t-b}{a}\right) dx \quad (4)$$

여기서 매개변수 a, b 가 정수일 때 이산(Discrete) 웨이브릿 변환 이라고 한다. 특히 $a=2^m, b=n2^m$ 일 때 정규 직교기저를 구성할 수 있고, 기저함수는 식 (5)와 같다.

$$\psi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\psi(2^{-m}t-n) \quad (5)$$

계통 변전소 전력량계 전류, 전압은 A/D 컨버터 통해 계측된 계통의 전류, 전압 신호 $f(k)$ 에 대한 이산 웨이브릿 변환 식 (6)과 같다.

$$DWT(f,m,n) = \frac{1}{\sqrt{a}} \sum_k f(k)\psi\left(\frac{n-b}{a}\right) \quad (6)$$

고장 전류 및 전압 신호를 다 해상도로(Multi Resolution Analysis) 분할하기 위하여 웨이브릿 함수에 의해 구성되는 벡터공간 V_m 을 정의 하면 V_m 는 식 (7)과 같이 V_{m-1} 에서 V_m 의 직교보수(orthogonal complement) 공간 W_m 의 직교기저를 이룬다.

$$V_{m-1} = V_m \oplus W_m \quad V_m \perp W_m \quad (7)$$

여기서 스케일링 함수 $\phi(t)$ 를 신축·이동하여 만들어진 정규직교기저 $\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2}\phi(2^{-m}t-n)$ 를 정의하면, 스케일링 함수 $\phi(t)$ 와 웨이브릿 함수 $\Phi(t)$ 는 식 (8)과 같다.

$$\Psi(t) = \sqrt{2} \sum_n h_0(n)\phi(2t-n) \quad (8)$$

여기서 $h_0(n)$ 및 $h_L(n)$ 는 스케일링 및 웨이브릿 함수의 필터계수이다. 스케일링 및 웨이브릿 함수는 고주파성분과 저주파 성분으로 구분하며 그림 2와 같이 도시된다. $x[n]$ 은 고장 계통의 전류 및 전압 파형을 나타내며, $x[n]$ 이 고주파 필터 및 저주파 필터를 통과하면 필터 각 레벨을 통과 할 때 마다 2씩 저감되어진다.

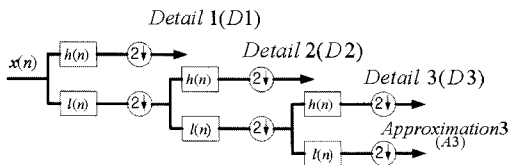


그림 2 웨이브릿 MRA 해석
Fig. 2 Wavelet MRA

그림 2에서 $x[n]$ 은 웨이브릿 계수를 이용하여 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$C_{Fault} = [a_1d_1||d_2||\dots||d_{j-1}] \quad (9)$$

여기서 j 는 그림 2의 다해상도 레벨(Level)을 나타낸다. 고장 표정 알고리즘에 적합한 원형 웨이브릿을 선택하기 위하여 Daubechies (db5), Biorthogonal (bior5.5) 및 Coiflets

(coif5)를 적용하였다. 웨이브릿 변환을 이용하여 고장점 임피던스를 설정하기위해 배전선로에 고장 모델링을 통하여 고장 유형별 측정된 전류파형, 전압파형과 고장 임피던스 사이의 관계식을 설정한다. 그림 3은 V_s, I_a 는 변전소에서 측정되는 전압과 전류를 나타내며, Z_L 는 선로의 임피던스, m 은 고장거리, R_F 는 지락 고장시 고장에 포함되는 고장 저항을 나타낸다.

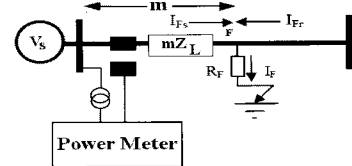


그림 3 배전계통 고장 선도
Fig. 3 Distribution utility fault diagram

그림 3에서, 변전소 인출단에서 측정되는 전압방정식은 변전소 인출단으로 부터 고장 점까지의 거리(m)와 미지수인 고장저항 (R_F)에 관한 식으로 정리하면 식 (10)과 같다.

$$V_s = m \cdot Z_L I_{Fs} + I_F R_F \quad (10)$$

위 식에서 고장 저항을 소거하기위해 위 식을 실수부와 허수부로 분리하여 허수부를 정리하면 식 (11)과 같다.

$$\text{Im}\left(\frac{V_s}{I_{Fs}}\right) = \text{Im}(m \cdot Z_L) = m \cdot w L_f = Z_f \quad (11)$$

L_f 는 선로 고장 인덕턴스, w 는 전원 각주파수 이다. 고장시 변전소 인출단 전압 V_s , 전류 I_{Fs} 에 고장전압의 'db5' 과 고장전류의 'db5' 웨이브릿을 적용하면 식 (12)와 같이 고장 인덕턴스를 계산 할 수 있다.

$$L_f = \frac{1}{w} \text{Im}\left[\frac{V_{db5}}{I_{db5}}\right] \quad (12)$$

L_f 는 고장 등가 임피던스, I_{db5} 는 고장전류의 'db5' 웨이브릿계수, V_{db5} 는 고장전압의 'db5' 웨이브릿계수 이고 $w = 2\pi f$ 이다. 표 1은 고장 유형별 웨이브릿 변환과 고장 임피던스사이의 관계를 나타낸다.

표 1 고장 유형별 웨이브릿 변환과 고장임피던스사이의 관계

Table 1 Fault type of Wavelet transform and fault impedance

고장 유형	L_f
A상 지락	$\text{Im}\left[V_{a,db5}/w(I_{a,db5} + 3kI_{o,db5})\right]$
B상 지락	$\text{Im}\left[V_{b,db5}/w(I_{b,db5} + 3kI_{o,db5})\right]$
C상 지락	$\text{Im}\left[V_{c,db5}/w(I_{c,db5} + 3kI_{o,db5})\right]$
A-B상 단락	$\text{Im}\left[V_{ab,db5}/wI_{ab,db5}\right]$
B-C상 단락	$\text{Im}\left[V_{bc,db5}/wI_{bc,db5}\right]$
C-A상 단락	$\text{Im}\left[V_{ca,db5}/wI_{ca,db5}\right]$
3상단락	$\text{Im}\left[V_{ab,db5}/wI_{ab,db5}\right], \text{Im}\left[V_{bc,db5}/wI_{bc,db5}\right],$

3.2 웨이브릿을 이용한 고장거리 추정

배전선로 고장점 추정을 위하여 웨이브릿 기법을 이용한

고장임피던스 추정 알고리즘은 그림 4와 같은 불평형 배전계통의 지락 고장 시 역상분 등가 단선도의 해석에서 나온다.

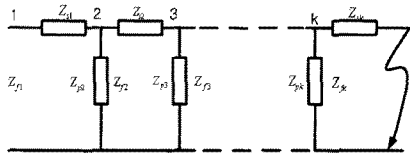


그림 4 불평형 배전계통의 지락 고장 시 역상분 등가 단선도
Fig. 4 Earth fault negative phase diagram of unbalance distribution utility

그림 4에서 병렬 임피던스 성분은 $(Z_{p1} - Z_{pk})$, 배전계통의 부하 직렬 임피던스 성분은 $(Z_{s1} - Z_{sk})$, 배전선로의 선종에 의해 계산되어진다. k 번째 노드의 배전선로 임피던스는 Z_{sk} 이고 배전계통의 선종과 노드의 길이에 의하여 결정되어 지고 k 번째 노드의 부하임피던스는 Z_{pk} 이며 전선로의 정상 상태로부터 식 (13)에 의해 계산 된다.

$$Z_{pk} = \left[G_{pk} |V_{pk}|^p + jB_{pk} |V_{pk}|^q \right]^{-1} \quad (13)$$

여기서, V_{pk} : k 번째 노드 부하단 전압
 G_{pk}, B_{pk} : 고장전 k 번째 노드에 컨덕턴스와 서셉턴스 비례상수
 I_{nr}, I_{∞} : 고장전 부하단 유효, 무효 전류
 p, q : 부하 상수(부하의 유,무효전력 성분을 나타내는 상수)

또한 i 번째 노드에서 고장점을 바라본 고장 등가 임피던스 Z_{fi} 는 i-1번째의 Z_{fi-1} 와 Z_{si-1} 을 이용하여 식(14)와같은 리컬시브형태(recursive form)로 구할 수 있다.

$$Z_{fi} = \frac{Z_{pi}(Z_{fi-1} - Z_{si-1})}{Z_{pi} - Z_{fi-1} + Z_{si-1}} = R_{fi} + X_{fi} \quad (14)$$

여기서 Z_{pi} 은 웨이브릿 계수로 구한 식 (12)로부터 계산할 수 있다. 리컬시브 식 (14)를 이용하여 다음 I 번째 임피던스와 I-1 번째 임피던스값의 차가 영(zero)에 근접하면 I 번째 노드에서 고장이 발생 한 것으로 판단하고 리컬시브 계산을 종결한다. 종결을 판단하는 조건은 식(15)와 같은 부등식으로 결정하며 설정값은(Threshold) 영에(zero) 가까울수록 좋으나 수렴시간을 고려하여 적절한 값으로 선정한다.

$$|Z_{fi-1}| - |Z_{fi}| \leq Threshold \quad (15)$$

고장이 발생 한 I번째 노드는 k번째 노드가 되고 고장 임

피던스는 식 (16)과 같이 나타낸다.

$$Z_{fk} = R_f + m_{fk-1} Z_{sk-1} \quad (16)$$

여기서 m_{fk} 는 k번째 노드에서 고장점까지 거리를 pu(per unit)로 나타낸 변수, Z_{sk-1} 는 k번째 노드와 k-1번째 노드사이의 배전 선로 임피던스, R_f 는 고장 임피던스가 된다. 그림 5는 고장검출 알고리즘 순서도를 나타낸다.

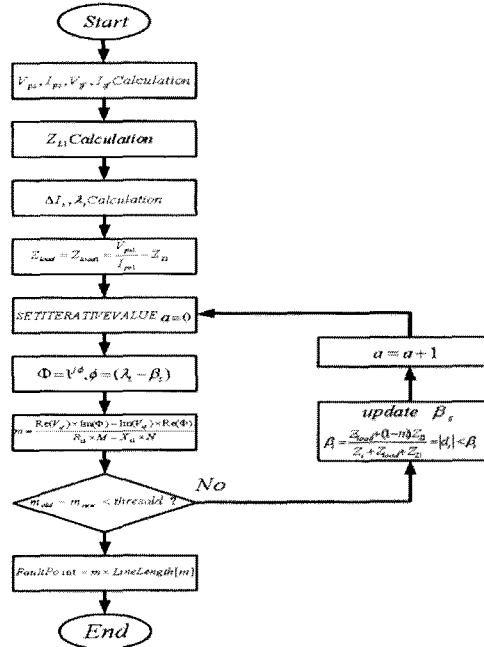


그림 5 고장검출 알고리즘 순서도
Fig. 5 Fault detected algorithm flowchart

웨이브릿 변환 임피던스 고장거리 추정 결과에 대한 오차는 식 (17)과 같다.

$$\%Error = \frac{\text{고장추정거리} - \text{실제고장거리}}{\text{계통전체선로길이}} \times 100 \quad (17)$$

4. 시험 및 결과

4.1 실증 시험 배전 계통 및 고장 표정 데이터

본 논문에서 제안한 원형 웨이브릿 리컬시브변환 알고리즘을 이용한 고장 표정의 유용성을 확인하기 위하여 그림 6과 같은 22.9KV 방사상 배전계통을 가지는 경기 이천지역

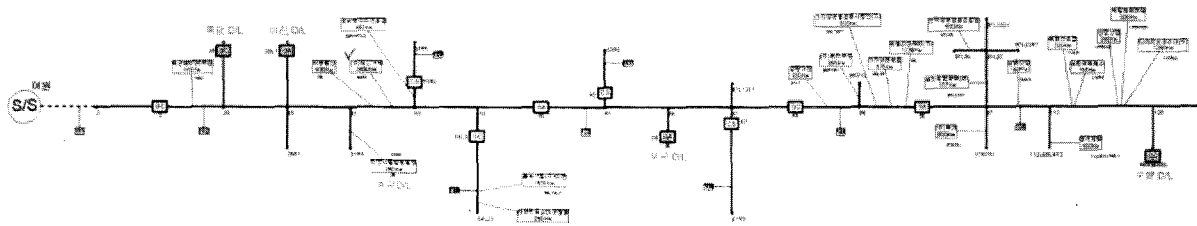


그림 6 22.9kV 방사상 모델 배전계통
Fig. 6 22.9kV distribution utility model

변전소의 배전계통을 채택하였으며, 계통구성데이터는 표 2와 같다. 고장 표정 산정을 위한 입력데이터는 표 3과 같은 실제계의 파라미터를 사용하였다.

표 2 구간별 선종 및 공장 구성 데이터

Table 2 The section of composition data

시작 구간	종료 구간	부하 특성	공장 (m)	선종		임피던스(%/Km)	
				전압선	중성선	Z0	Z1
CB	2	-	176	CF-325	CF-325	4.47+j1.56	1.43+j2.37
2	3	상업지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
3	25	군지역	1060	EC-160	AL-95	9.16+j22.84	3.56+j7.75
25	26	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
26	31	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
31	53	공장지역	1135	EC-160	AL-95	9.16+j22.84	3.56+j7.75
53	54	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
54	60	공장지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
60	63	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
63	66	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
66	67	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
67	68	주거지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
68	86	공장지역	2274	EC-58	AL-58	17.25+j25.05	9.77+j8.37
86	96	공장지역	1242	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
96	97	공장지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37
97	112	공장지역	857	EC-160	AL-95	9.16+j22.84	3.56+j7.75
112	126	공장지역	2191	EC-58	AL-58	17.25+j25.05	9.77+j8.37
126	130	공장지역	500	EW-58	AL-58	16.71+j25.05	9.23+j8.37

표 3 이천 변전소 모선 등가 임피던스

Table 3 Icheon substation bus equivalent impedance

Bank 번호	등가임피던스			
	R ₁	X ₁	R ₁	X ₁
1	0.119	37.227	0.041	42.911
2	0.119	37.160	0.041	42.958
3	0.119	32.627	0.059	44.170
4	0.119	32.649	0	51.657
5	0.119	33.072	0	51.657

표 2, 3은 고장 지역의 배전계통 임피던스를 나타낸다. 배전계통의 전류, 전압 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz, aliasing 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 지역 통과 필터를 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순시 데이터로부터 페이저를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 FFT를 사용하였다. 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 3상고장사고 및 1상고장사고 사례에 대하여 본 알고리즘을 적용 고장거리를 추정 하였다. 그림 7은 배전계통 노드31과 노드52 사이에 고장이 발생한 경우이며 전력량계 측정 파형을(CT비 600:5, PT비

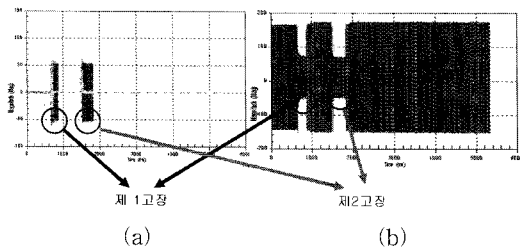


그림 7 고장 발생시 변전소 전력량계에서 계측되어진 (a) 고장 전류 및 (b) 고장 전압 파형

Fig. 7 Fault in time substation kWh measurement (a) fault current (b) fault voltage waveform

13200:110) 나타낸다. 고장 유형은 3상 단락사고 이며 전력량계가 설치된 이원변전소로부터 2192(m)에 위치한 지점이다. 그림 8은 제 1 고장전류 구간과 제 2 고장전류 구간 파형을 나타낸다.

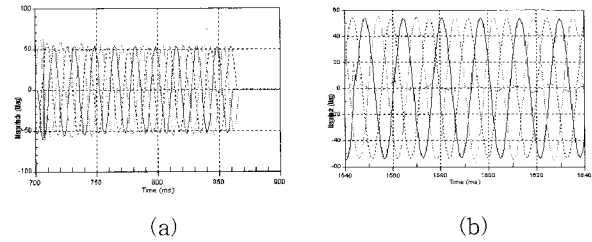


그림 8 고장전류 (a) 제1고장발생(구간: 700-865(msec)) (b) 제 2고장 발생(구간: 1540-1640(msec))

Fig. 8 Fault current (a) One fault generation(700-865(msec)) (b) Two fault generation(1540-1640(msec))

그림 9는 1상 지락사고시 고장전류(a)를 확대(b)한 파형을 나타낸다.

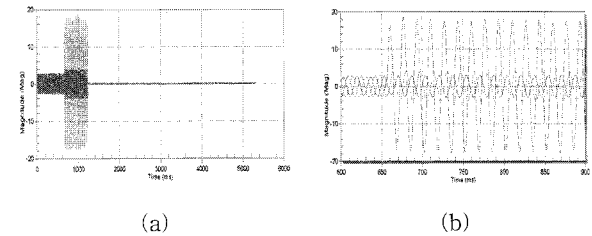


그림 9 1상 지락 사고 발생시 (a) 고장전류, (b) 구간 확대 전류파형(구간: 1540-1640(msec)시점)

Fig. 9 One phase earth fault (a) fault current (b) magnification fault current

원형 웨이브릿 리킬시브 임피던스 고장거리 추정 오차를 표 4에 나타내며, 그림 10은 고장저항이 증가할 경우에 대하여 고장 거리 추정 에러의 변화 추이를 나타낸다. 그림 10에서와 같이 고장 저항이 클수록 고장거리 계산 오차가 증가함을 알 수 있다.

표 4 추정고장거리 및 실제고장거리 오차

Table 4 Fault distance & real distance error ratio

실제고장 거리(m)	고장추정거리(m)	고장거리추정오차(%)
2192	2222 - 2253	1.4 - 2.8

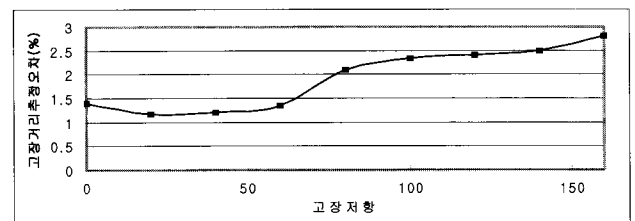


그림 10 고장 저항별 고장거리 추정 오차

Fig. 10 Fault resistance of distance estimation error

표 5는 다양한 사고에 대해 알고리즘을 적용하여 고장점 표정에 대한 실제 고장점과의 오차를 나타낸다.

표 5 다양한 고장의 추정고장거리 및 실제고장거리
Table 5 Several Fault estimated distance & real fault distance error ratio

사고명	실제고장거리(m)	고장추정거리(m)	고장거리 추정오차(%)
피뢰기 파손	3340	3921	4.3
가공전선(ACSR-OC)과 ABC케이블 접속개소의 ABC리드선 단선사고,	850	932	2.7
LA*1(경동2002) 불량사고	1900	2538	4.8
변대주 피뢰기사고	2550	2253	1.6
피뢰기 까치접촉 순간정전	9500	9701	2.9
조류접촉 현수애자파손	6600	7011	2.58

5. 결 론

본 논문에서는 배전계통 고장 발생시, 변전소 인출단 전력량계에서 계측이 가능한 고장 계통 전류, 전압에 대하여 원형 웨이브릿 리컬시브변환을 이용한 고장 임피던스를 계산 알고리즘을 통한 고장점 표정을 제시하였다.

3상 단락사고와 1상 지락사고에 대한 거리오차는 1.4-2.8% 이였으며, 이 외에 피뢰기 파손사고, 가공전선(ACSR-OC)과 ABC케이블 접속개소의 ABC리드선 단선사고, 고객 구내 LA*1(경동2002) 불량사고, 변대주 피뢰기사고, 피뢰기 까치접촉 순간정전, 조류접촉 현수애자 파손 등 다양한 배전계통의 고장 사고에 대한 실제 고장거리와 고장거리 추정 에러의 변화 추이가 매우 적음을 확인하였다. 다양한 사고에 대한 실증실험을 통하여 얻어진 고장 오차율의 평균은 3.0(%)이하로 기존의 단일 사고 고장표정기법에 비해 본 논문에서 제시한 고장점 표정기법은 다양한 사고에 대하여 적용이 가능하였으며 비교적 적은 오차율을 얻을 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Welfonder, et al "Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems", IEEE Trans. on Power Delivery 15 No. 4 (2000), pp. 1121-1128.
 [2] D. Novosel, et al, "Unsynchronized two-terminal fault location estimation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11. No. 1, Jan. 1996, pp. 130-138.
 [3] Girgis, et al, "'A new fault location technique for two and three terminal lines'", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, Jan. 1992, pp. 98-107.
 [4] J. Jiang, et al, "'An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines. P. I: Theory and algorithms'", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 2, Jan. 2000, pp.486-493.
 [5] J. Jiang, et al, "An adaptive PMU based fault

detection/location technique for transmission lines. P. I: Theory and algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 15, No. 4, Oct. 2000, pp. 1136-146.
 [6] V. Cook, "Fundamental aspects of fault location algorithms used in distance protection", IEE Proceedings, Vol. 133 Pt. C, 1986, pp.359-366.
 [7] M. S. Achdev and R. Agarwal, "A technique for estimating line fault locations from digital impedance relay measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, Jan. 1988, pp. 121-129.
 [8] T. Adu, "A new Transmission Line Fault Locating System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, Oct. 2001, pp. 498-503.

저 자 소 개



박 인 덕

1969년 9월 15일생. 1995년 한밭대학교 졸업. 1999년 명지대학교 대학원 졸업. 2005년 공주대학교 대학원 전기전자정보 공학과 졸업(공학). 2008년 ~ 현 대덕대학 전기과 전임교수
 Tel : 042-866-0373
 E-mail : han7770@ddc.ac.kr



이 승 환

1962년 2월 18일생. 1984년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현 대덕대학 전기과 교수
 Tel : 042-866-0331
 E-mail : leesh@ddc.ac.kr



최 광 진

1963년 8월15일생. 1990년 원광대학교 컴퓨터공학과 졸업. 1992년 광운대학교 대학원 컴퓨터공학 졸업(석사). 2007년 중부대학교 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학) 현 중부대학교 일반대학원 초빙교수
 Tel : 010-7570-8000
 E-mail : iso8000@gmail.com



김 시 경

1964년 5월 15일생. 1986년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 졸업(석사). 1994년 Texas A&M 대학 졸업(공학). 1994년~현재 공주대학교 교수.
 Tel : 041-521-9634
 E-mail : skim@kongju.ac.kr