

# 웨이브릿 기법을 이용한 리커시브 실시간 고장점 표정 시스템 연구

論 文
57-9-6

## Recursive Real Time Fault Locator with Wavelet Method

李 聖 雨<sup>†</sup> · 河 福 男<sup>\*</sup>  
(Sung-Woo Lee · Bok-Nam Ha)

**Abstract** - This paper presents a discrete wavelet analysis based algorithm to address the fault impedance calculation under transient state in radial power distribution networks. The fault impedances have been derived under different fault conditions. Furthermore, a recursive fault distance estimation method is proposed utilizing the measured fault impedance and power line parameters. The proposed scheme can resolve the errors caused by the non-homogeneous power lines, the presence of lateral loads since, the fault impedance will always be updated with the recursive form. For the verification of the proposed scheme, a filed test has been performed with varying fault resistances in the 22.9(kV) radial system. Power meters and fault locators were installed at the substation. It was figured out that the performance of the discrete wavelet and the recursive scheme are very good even for high fault resistance condition.

**Key Words** : Wavelet Method, Single Ended Method, Double Ended Method, Transient state, Recloser, Fault impedance

### 1. 서 론

전력 계통에서 배전 선로는 변전소와 수용가를 연결하여 전력을 공급하는 역할을 하며 대기 중에 노출되어 있음으로 인해 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오동작 및 그 외 다양한 사고가 원인이 되어 고장이 빈번하게 발생한다. 따라서 배전계통의 고장 분석 및 파악은 계통 관리자의 중요한 역할로 간주되어 왔다. 더욱이, 안정적인 전력 공급 서비스 품질을 제공 하는 것이 계통의 여러 운영 계획들 가운데 필수적인 것으로 분류되고 있으며, 이에 따라 전력회사에서는 배전계통의 고장점 분석 및 해석에 점점 더 많은 관심을 가지고 있는 실정이다.[1]

배전 선로에서 고장이 발생할 경우, 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내어 신속하게 고장을 복구하는 것이 고장 시스템에 의하여 유발되는 정전 비용을 최소화하며 더 나아가 전력 공급 서비스 질을 높이는 측면에서 배전계통의 고장점 분석 및 고장점 표정이 매우 중요한 요소로 대두되고 있다. 배전계통의 고장점 검출장치가 없다면 계통 관리자는 고장 점을 찾아내기 위하여 광범위한 배전 선로 구간을 육안으로 확인하여야 한다. 이러한 작업은 많은 비용과 인력, 정전비용이 요구된다. 이러한 문제점을 해결 하기 위하여, 배전 선로 상에서 발생되어지는 고장에 대하여 변전소로부터 고장 점까지의 거리를 계산하는 고장점 검출 알고리즘이 최근 활발히 연구되어 왔다.[1,2,3,4,5]

전력계통의 고장점 검출 방법은 크게 진행파를 이용하는 방법과 고장 임피던스법을 이용하는 방법으로 크게 구분할 수 있으며[3,4,5,6] 이 두가지 기법은 3상 전류 전압을 측정하는 전력량계의 배치 방법에 따라 크게 단종점 방식(Single Ended Method)과 이중종점 방식(Double Ended Method)으로 구분된다. 단종점 방식은 한 개의 전력량계를 변전소 인출단에 설치하여 고장 발생 배전선 한단 정보를 계속하여 고장점을 표정하는 방식이며, 이중종점 방식은 두 개의 전력량계를 이용하여 고장 발생 배전선 양단 정보를 계속하여 이용하는 방법 이다. 여기서, 양단 정보를 사용하는 이중종점 방식의 경우 단종점 방식에 비하여 고장점 검출시 수반되는 오차가 적지만 부가적으로 GPS 및 통신장비 등 다양한 부가 장비들이 필요하게 됨으로 인하여 가격 상승과 장치 운영 보수 유지의 어려움이 따른 문제점이 있다.[2,3] 통신 기술의 발달에 힘입어 차후에는 단종점 방식에 비하여 경쟁력을 가질 것으로 기대되나, 현재 산업현장에서는 적용성 및 실용성에서 장점을 가지는 단종점 방식(Single Ended Method)이 가장 널리 사용되고 있으며[7,8,9,10,11]. 단종점 방식의 고장 추정 정확도를 향상시키기 위하여 신경회로망 기법, 평형회로의 대칭좌표법등을 이용한 여러 가지의 기법을 적용하여 보다 정확한 고장점을 검출하는 기법들이 제안되었다. [6,7,8] 그러나 배전계통에서는 배전 선로의 비 동질성, 부하 전류의 변동성, 부하 랩의 존재 등의 이유로 제안된 기법의 적용이 어려움이 있다. 또한, 배전계통은 많은 분기선을 포함하는 방사상계통 구조를 가지고 있으므로 인하여 여러 가지 기법들의 적용에 어려움이 있다. 그리고 배전계통은 부하에 대한 정보의 부족으로 부하단 임피던스를 얻기가 매우 어려우며, 시시각각으로 부하가 변하기 때문에 많은 고장 추정 알고리즘을 통해 얻은 부하단 임피던스로부터 얻은 해석결과가 적절한 오차범위에 있는지 여부를 실증

† 교신저자, 正會員 : 韓電 電力研究院 責任研究員 · 工博  
E-mail : swlee@kepri.re.kr

\* 正 會 員 : 韓電 電力研究院 首席研究員 · 工博  
接受日字 : 2008年 7月 7日  
最終完了 : 2008年 8月 20日

시험을 통해 확인 하여야 한다. 본 연구에서는 배전계통의 특징인 계통의 불평형, 많은 분기선, 부하 정보에 대한 부족 등을 효과적으로 처리할 수 있는 웨이브릿 기법을 이용한 리커시브 실시간 고장점 표정 시스템 알고리즘을 제안 하였다.

본 논문에서는 변전소 인출단에서 계측이 가능한 고장 계통 전류, 전압에 대하여 다비치 웨이브릿 변환을 취한 후 이들 값으로부터 계통의 고장 임피던스를 추출 하는 기법을 제시하였다. 또한, 이렇게 계산되어진 고장 임피던스로부터 배전선로 고장점 추정을 위하여 불평형 배전계통의 지락 고장시 역상분 등가 단선도의 해석기법을 제안하였다. 제안된 단선도 해석 기법을 통하여 얻어진 고장점 추정 임피던스와 고장거리사이에 대한 리커시브 알고리즘을 제안하였고 실제로 고장이 발생한 경우에 대하여 수용가에 연계된 변전소에 설치된 전력량계의 실측 3상전류, 3상전압 데이터를 계측하고 고장이 발생한 배전계통의 영상 임피던스, 정상 임피던스 등 여러 파라미터에 대하여 다비치 웨이브릿 기법을 이용한 리커시브 실시간 고장점 표정 시스템 알고리즘의 유효성을 입증하였다.

2. 배전계통의 고장표정시스템

배전계통에 있어서, 기본적인 고장 표정을 위하여 먼저 대상 계통(또는 지역)에 대한 계통 모델링이 필요하다. 또한 고장 발생 시 수반되는 과도상태 고장 조건과 정상 상태 고장 상태에 대한 모델링이 필요하다. 본 절에서는 배전계통에 대한 대표적인 고장 상태에 대한 고장 모델을 기술하고 이를 기반으로 변전소 인출단에서 계측이 가능한 고장 계통 전류, 전압에 대하여 다비치 웨이브릿 변환을 취한 후 이들 값으로부터 계통의 고장 임피던스를 추출 하는 기법에 대하여 기술 하였다. 또한, 계산되어진 고장 임피던스로부터 배전선로 고장점 추정을 위하여 불평형 배전계통의 고장시 역상분 등가 단선도의 해석기법을 기술 하였으며 이를 통한 고장점 추정 임피던스와 고장거리사이에 대한 리커시브 알고리즘에 대하여 기술을 하고자한다.

2.1 고장사고 과도현상

배전계통 지락 사고시 고장 거리 표정을 위하여 배전 계통 사고시 발생하는 과도 상태 상황에서의 전류, 전압 특성을 분석하여야 한다. 과도상태에서 고찰 하여야 할 파라미터를 살펴보면 고장 전 전류와 고장 후 전류이며, 그 이유는 다른 여러 파라미터에 비하여 상대적으로 변화량이 상대적으로 현저하게 큰 변화가 있기 때문이다. 이와 같은 급격한 전류량의 변동은 다음과 같은 두 가지 파라미터와 연관된다. 첫째, 고장 사고 발생 시 고장 난 상(phase)의 전압이 다른 상(phase)의 전압에 비하여 급격히 감소된다. 이와 같은 전압이 감소되는 현상을 전압의 방전(Discharge)이라고 할 수 있다. 둘째, 두 개의 정상 상(Phase)의 전압의 크기는 고장 발생 상(Phase)에 대하여 상대적으로 증가 한다. 이로 인하여 두 개의 정상 상(Phase)에 충전 변동(Charge Deviation)이 발생하며 계통내의 삼상시스템은 이들 전압의 균형을 이루기 위하여 내부 보상(Compensation)을 수행하게 된다. 이러한 충전 변동의 과도 상태를 고장 표정을 위하여

사용 할 수 있다. 먼저 고장발생시 수반되는 충전 변동이 가지는 주파수 성분은 공급전원의 주파수에 비하여 상대적으로 저주파 성분을 가지며 동시에 계통의 과도 상태 상전압의 진폭 변동에 큰 영향을 끼친다. 변전소 계통에 고장 발생시 발생 되는 충전 변동(Charge Deviation)의 주파수는 다음식과 같이 결정된다.[12,13]

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

여기서,  $L_{eq}=1.5L_T$ ,  $C_{eq}=2(C+C_E)$ ,  $L_T$ 는 변전소 변압기 상 인덕턴스,  $C$ 는 상간 캐피시턴스,  $C_E$ 는 상-접지 캐피시턴스 이다.

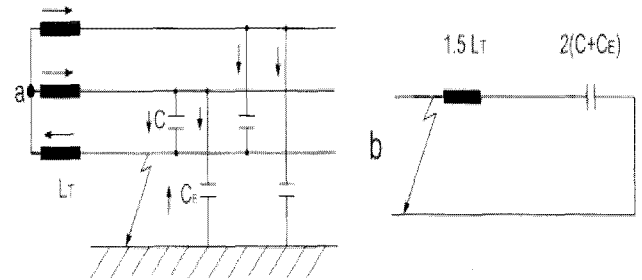


그림 1 충전 변동(Charge Deviation) 발생 과도상태의 (a) 계통 모델 (b) 대응되는 등가회로

Fig. 1 of the Transient state in the Charge Deviation generation (a) System Model (b) Equivalent Circuit

그림 1은 배전계통 고장 발생 시 과도상태에 있어서 충전 변동(Charge Deviation) 계통 모델(a)과 이에 대응되는 등가 회로를 나타내고 있다. 이 회로에서 계통고장이 순시전압이 최대인 순간에 발생되어지고 과도상태 발생시 고장 전류의 크기는[12,13]

$$\hat{i}_c = \frac{C_{eq}w_c}{3C_Ew_f} \hat{J}_c \tag{2}$$

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

이식으로부터 고장과도 상태에서 나타나는 전류 및 임피던스에 대한 분석을 통하여 고장 정상상태에 나타나는 고장 전류 및 임피던스 특성을 예측할 수 있음을 알 수 있다. 이러한 특성을 기반으로 다음절에는 웨이브릿 변환을 이용하여 고장시 과도 상태에서 나타나는 전류 및 전압을 통하여 고장 임피던스를 추정하는 고장점 추정 기법을 설정 하였다.

2.2 다비치 웨이브릿을 이용한 고장 임피던스계산 알고리즘

웨이브릿 변환은 시간 및 주파수에 대하여 국부성을 가지며, 비정상상태의 신호를 해석하는데 유용하다. 따라서 과도상태의 파형을 가지는 고장 계통 전류, 전압을 분석하는데 있어 웨이브릿 변환은 적합한 성질을 가지고 있다. 본 논문

에서는 고장 임피던스계산을 위하여 고장 계통 전류, 전압에 대한 웨이브릿 변환을 취한 후 이들 값으로부터 계통의 고장 임피던스를 추출 하는 기법을 적용하였다. 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 웨이브릿을 천이(translation) 및 확장/수축(dilation)을 시킴으로서 만들어진 다. 이에 대한 웨이브릿 기저함수들의 선형결합은

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

이다. 여기서  $a$ 는 원형 웨이브릿을 확장/수축시키는 스케일 변수이고,  $b$ 는 천이를 나타내는 천이변수이다. 어떤 신호  $f(t)$ 에(전류 및 전압) 대한 연속웨이브릿 변환(Continuous Wavelet Transform)은

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

로 정의된다. 여기서 매개변수  $a, b$ 가 정수일 때 이산 웨이브릿 변환(Discrete Wavelet Transform)이라고 한다. 특히  $a=2^m, b=n2^m$  일 때 정규 직교기저를 구성할 수 있고, 기저함수는

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

가 된다. 계통에서 전력량계를 이용하는 전류, 전압은 A/D 컨버터(Analog/Digital Converter)를 이용하므로 앞에 기술한 연속웨이브릿 변환 보다 이산웨이브릿 변환을 이용하는 것이 적합하다. A/D 컨버터를 통해 계측된 계통의 전류, 전압 신호  $f(k)$ 에 대한 이산웨이브릿 변환(Discrete Wavelet Transform)은

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

로 정의 된다. 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 아래식과 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 정규 직교기저  $\phi_{m,n}(t) = 2^{-m/2} \phi(2^{-m}t - n)$ 을 정의하면, 스케일링 함수  $\phi(t)$ 와 웨이브릿 함수  $\Psi(t)$ 는 다음과 같은 관계가 있다.

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

여기서  $h_0(n)$ 은 스케일링 및 웨이브릿 함수의 필터계수이다. 이렇게 구분되어진 스케일링 및 웨이브릿 함수는 고주파 성분과 저주파 성분으로 구분하여 도시하면 그림 2와 같이 도시되어진다. 그림에서  $x[n]$ 은 고장 계통의 전류 및 전압 파형을 나타내고 있으며,  $x[n]$ 이 고주파 필터 및 저주파 필터를 통과하면 필터 각 레벨을 통과 할 때 마다 2씩 저감되어진다.

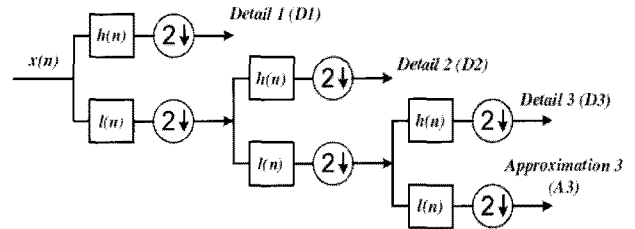


그림 2 웨이브릿 MRA 해석  
Fig. 2 Wavelet MRA Analysis

그림 2에서  $x[n]$ 은 웨이브릿 계수를 이용하여 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{\text{Fault}} = [a_1 | d_1 | d_2 | \dots | d_j - 1] \quad (9)$$

여기서  $j$ 는 그림의 다 해상도 레벨(Multi Resolution Analysis Level)을 나타낸다. 웨이브릿 해석을 위하여 본 논문에서는 고장 표정 알고리즘에 적합한 원형 웨이브릿을 선택하기 위하여 Daubechies (db5), Biorthogonal (bior5.5) 및 Coiflets (coif5)를 적용하였으며 이중 Daubechies ‘db5’ 웨이브릿이 다른 웨이브릿 보다 좋은 특성을 가짐을 확인 하였다.

앞에서 기술한 웨이브릿 변환을 이용하여 고장점 임피던스를 설정하기위하여 먼저 배전선로에 고장 모델링을 통하여 고장 유형별 측정된 전류 파형, 전압파형과 고장 임피던스 사이의 관계식을 설정 하여야한다. 그림 3은  $V_S, I_u$ 는 변전소에서 측정되는 전압과 전류를 나타내며,  $Z_L$ 는 선로의 임피던스,  $m$ 은 고장거리, 그리고  $R_F$ 는 지락 고장시 고장에 포함되는 고장저항을 나타낸다.

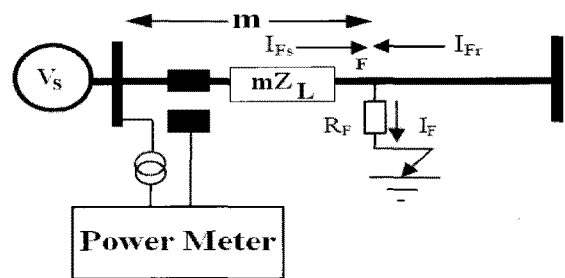


그림 3 배전계통의 고장 선도  
Fig. 3 Fault Diagram of Distribution Systems

그림 3에서, 변전소 인출 단에서 측정되는 전압방정식은 구하고자하는 변전소 인출 단으로부터 고장 점까지의 거리와 미지수인 고장저항에 관한 식으로 정리하면 다음 식과 같다.

$$V_s = m \cdot Z_L I_{F3} + I_F R_F \quad (10)$$

위식에서 미지수는 고장거리  $m$ 과 고장저항  $R_F$  두개인데 방정식은 하나이므로, 미지수인 고장 저항을 소거하기위해 위 식을 실수부와 허수부로 분리하여 허수부를 정리하면 다음식과 같다.

$$\text{Im}\left(\frac{V_s}{I_{F3}}\right) = \text{Im}(m \cdot Z_L) = m \cdot wL_f = Z_f \quad (11)$$

여기서  $L_f$ 는 선로 고장 인덕턴스,  $w$ 는 전원 각주파수이다.

위 식의 고장시 변전소 인출단 전압  $V_s$ , 전류  $I_{F3}$ 에 고장전압의 'db5' 과 고장전류의 'db5' 웨이브릿을 적용하면 다음과 같이 고장 인덕턴스를 계산 할 수 있다.

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

여기서  $L_f$ 는 고장 등가 인덕턴스,  $I_{db5}$ 는 고장전류의 'db5' 웨이브릿계수,  $V_{db5}$ 는 고장전압의 'db5' 웨이브릿계수 이고  $w = 2\pi f$ 이다. 같은 방법으로 고장 유형별 웨이브릿 변환과 고장인덕턴스사이의 관계는 다음 표와 같이 구해진다.

표 1 고장유형별 웨이브릿 변환과 고장인덕턴스사이의 관계

Table 1 Wavelet Transform in Fault Type and the Relation between Fault Impedance

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

### 2.3 고장 거리 추정

배전선로 고장점 추정을 위하여 변전소 인출단에서 삼상 전압과 전류를 취득할 수 있으며 배전 계통의 구성 정보와

부하 데이터를 사용 할 수 있다. 여기서 부하 임피던스는 계통운전에 따라 바뀔 수 있으므로, 앞 절에서 기술한 웨이브릿 기법을 이용한 고장임피던스 추출 알고리즘으로부터 계산되어진 결과를 활용한다. 고장점 추정 알고리즘은 변전소 인출단에서 취득한 전압, 전류와 계통의 구성 정보를 사용한 그림 4와 같은 불평형 배전계통의 지락 고장 시 역상분 등가 단선도의 해석에서 나온다. 그림에서 병렬 임피던스 성분은  $(Z_{p1} - Z_{pk})$  배전계통의 부하와 배전선로의 선중에 의해 계산 되어진다.

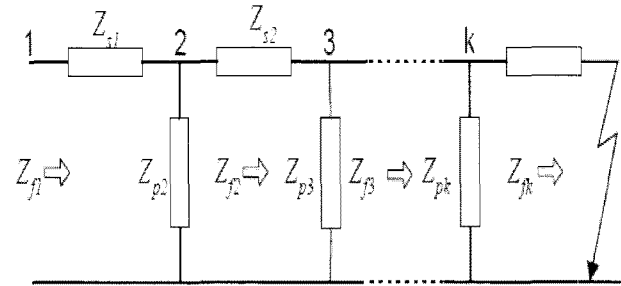


그림 4 불평형배전계통의 지락고장시 역상분 등가 단선도  
Fig. 4 Equivalent Single Line Diagram with the Negative Phase to Ground Fault of the Unbalance Distribution System

k 번째 노드의 배전선로 임피던스는  $Z_{sk}$  이고 배전계통의 선종과 노드의 길이에 의하여 결정되어지고 k 번째 노드의 부하임피던스는  $Z_{pk}$  이고 이 값을 주어진 식 (13)에 따라 배전선로 고장이 발생 전 정상상태로부터 다음 식 으로부터 계산 된다.[2,14]

$$Z_{pk} = [G_{pk} |V_{pk}|^{p-2} + jB_{pk} |V_{pk}|^{q-2}]^{-1} \quad (13)$$

여기서,  $V_{pk}$  : k 번째 노드 부하단 전압  
 $G_{pk}$ ,  $B_{pk}$  : 고장전 k 번째 노드에 컨덕턴스와 서셉턴스 비례하는 상수

$I_m$ ,  $I_n$  : 고장전 부하단 유효, 무효 전류  
 $p, q$  : 부하 상수(부하의 무효전력 및 유효전력 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 다음 식과 같은 리커시브 형태(recursive form)로 구할 수 있다.

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

여기서  $Z_{fi}$ 은 다비치 웨이브릿 계수로 구한 식 (12)으로부터 계산 할 수 있다. 위의 리커시브식(14)을 이용하여 다음 I 번째 임피던스와 I-1 번째 임피던스 값의 차가 영

(zero)에 근접하면(식에서 설정값을 영에 가깝게 설정하여야 한다) I번째 노드에서 고장이 발생 한 것으로 판단하고 리커 시브 계산을 종결한다. 종결을 판단하는 조건은 아래식과 같은 부등식으로 결정하고 설정값(Threshold) 영에(zero) 가까울수록 좋으나 수렴시간을 고려하여 적절한 값으로 선정한다.

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

이때 고장이 발생 한 I번째 노드는 k번째 노드가 되고 이때 고장 임피던스는 다음식과 같이 정리된다.

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

여기서  $m_{fk}$ 는 k번째 노드에서 고장점까지 거리를 PU(per unit)로 표현한 변수이고  $Z_{sk-1}$ 는 k번째 노드와 k-1번째 노드사이의 배전 선로 임피던스 이고  $R_f$ 는 고장 임피던스가 된다.

### 3. 실증시험 결과 및 분석

#### 3.1 실증 시험 배전 계통 및 고장 표정 데이터

본 논문에서 제안한 고장 표정 알고리즘의 유용성을 확인 하기 위하여, 다음과 같은 배전 계통에 대하여 고장 표정 실증시험을 수행하였다.

① 배전 계통은 그림 5와 같은 22.9KV 방사상 배전계통을 가지는 경기 이천 지역 변전소의 배전계통을 채택하였으며, 계통 구성데이터는 표 2와 같다.

② 고장 표정 산정을 위한 입력데이터는 표 3과 같이 실 계통의 파라미터를 사용하였다. 이것은 고장 지역의 배전계통 임피던스 및 변전소 전력용량을 나타낸 것이다.

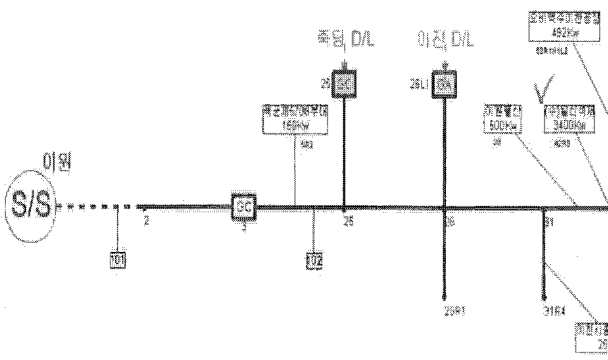


그림 5 22.9kV 방사상 모델 배전계통(사고 지점: (주)일진석재 3400kW)

Fig. 5 Radial Model of 22.9kV with Distribution Systems (Fault Location)

표 2 구간별 선종 및 금장 구성 데이터

Table 2 Line Cable Type between Section and Line Length Data

구간 시작 구간	종료 구간	부하 특성	금 장 (m)	선종		임피던스(%/Km)	
				전압선	중성선	Z <sub>0</sub>	Z <sub>1</sub>
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

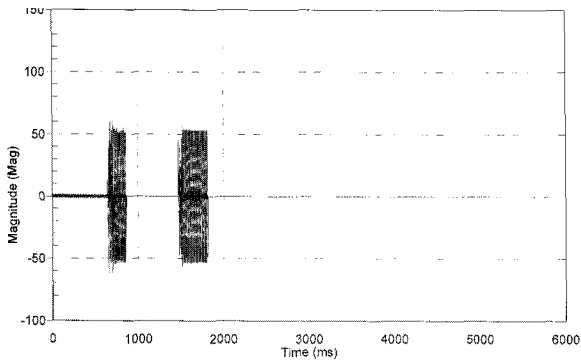
표 3 이천 변전소의 모선 등가 임피던스

Table 3 Bus Equivalent Impedance of ICHEON Substation

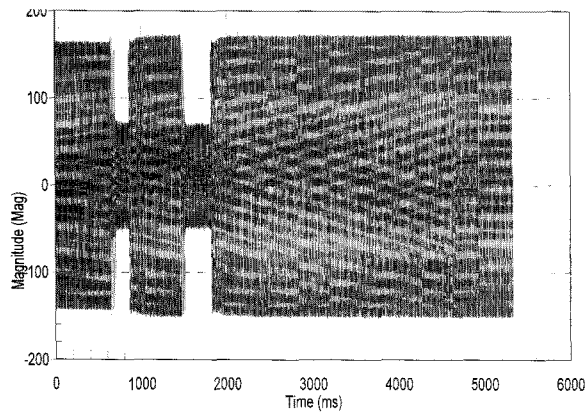
Bank 번호	등가임피던스			
	R0	X0	R1	X1
1	0.119	37.227	0.041	42.911
2	0.119	37.160	0.041	42.958
3	0.119	32.627	0.059	44.170
4	0.119	32.649	0	51.657
5	0.119	33.072	0	51.657

배전계통의 전류, 전압 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수로는 1920Hz, aliasing 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 저역 통과 필터를 사용하였다. 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 3상고장 사고 및 1상고

장 사고가난 실례에 대하여 본 알고리즘을 적용하여 고장 거리를 추정 하였다. 그림 6은 배전계통 노드31과 노드52 사이에 고장이 발생한 경우에 대하여 전력량계 측정 파형을 (CT 비 600:5, PT비 13200:110) 보이고 있다. 고장 유형은 3상(3상 단락)사고 이었으며, 사고는 전력량계가 설치된 이천 변전소 전력량계가 설치된 이원변전소로부터 2192(m)에 위치한 지점의 피뢰기(자기형 GAPLESS) 파손으로 발생 하였다.



(a)

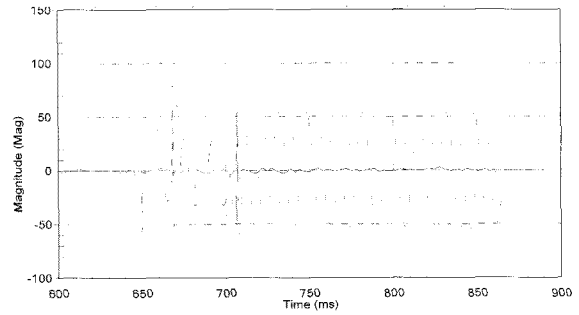


(b)

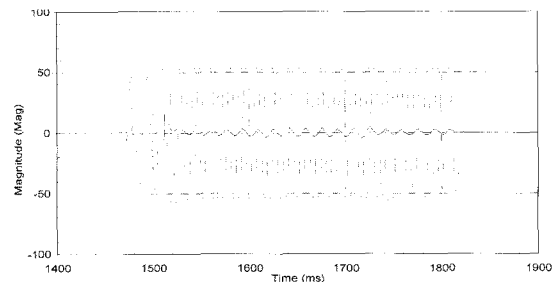
그림 6 고장 발생시 변전소 전력량계에서 계측되어진 (a) 고장전류(CT 비 600:5, 실제전류크기=Magnitude\*150), (b) 고장 전압 파형(PT 비 13200:110, 실제전압크기=Magnitude\*150)

Fig. 6 Measured from the Watt Hour Meter of Substation as Fault Generation (a) Fault Current(CT Rate, 600:5), (b) Fault Voltage Wave (PT Rate 13200:110)

위의 (a) 고장 전류 파형 및 (b)고장 전압 파형으로부터 모든 상에 고장이 발생 하였을 알 수 있다. 고장 파형에 대하여 좀 더 세밀한 분석을 위하여 첫 번째 고장이 발생한 구간 600-900(msec)에 대하여 확대한 파형을 다음에 나타내었다. 또한 두 번째 고장이 발생한 구간인 2000-2500(msec)에 대하여 분석하였다. 파형 분석 후 첫 번째 고장이 발생 후 870(msec) 시점에서 CB(Circuit Breaker)가 동작 되었다가 개폐기(Recloser)가 1465(msec) 시점에 재투입되면서 과도 상태의 전류파형이 나타나는 것을 확인 할 수 있다.



(a)



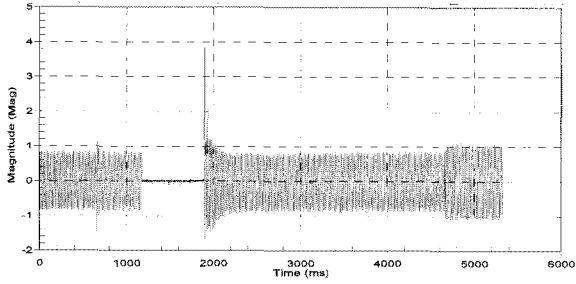
(b)

그림 7 (a) 제 1고장 발생시 고장전류(구간: 600-900 (msec) CT 비 600:5), (b) 제 2고장 발생시 고장전류(구간: 1400-1900(msec), CT 비 600:5)

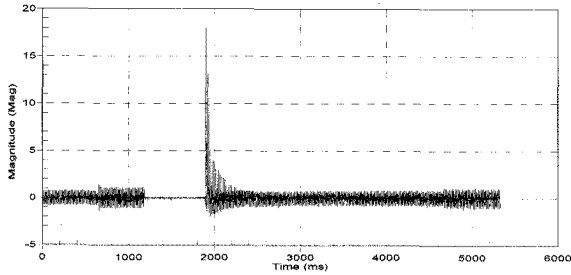
Fig. 7 (a) Fault Current as Fault Generation in Number One (Section 600-900(msec) CT Rate 600:5), (b) Fault Current as Fault Generation in Number Two(Section 1400-1900(msec), CT Rate 600:5)

구간 600-900(msec)에 대한 위의 그림 7(a)의 a상전류, b상전류, c상 전류파형으로부터 모든 상에 사고가 발생 하였을 알 수 있다. 시간 구간별 고장 유형 변동을 살펴보면, 먼저 640(msec)시점에 a상에서 1상 지락사고가 발생하였다. 그 후 20(msec)지난 660(msec)시점에 c상에 1상 지락사고가 더해 졌으며, 710(msec)시점에 b상에 지락사고가 발생 하여 CB(Circuit Breaker)가 동작 되는 870(msec) 시점까지 3상 단락 사고가 고장이 지속됨을 알 수 있다. 그림 7(b)의 그림은 첫 번째 고장이 발생 후 870(msec) 시점에서 CB(Circuit Breaker)가 동작된 후, 리클로저(Recloser)가 1465(msec)시점에 투입되면서 나타나는 a상전류, b상전류, c상 전류파형을 구간 1400-1900(msec)에 대하여 나타내고 있다. 이 그림으로부터 전원 재투입 후 3상 단락 사고가 고장이 지속 되고 있음을 알 수 있으며 이로 인하여 CB(Circuit Breaker)가 1820(msec) 시점에 다시 동작되어짐을 알 수 있다.

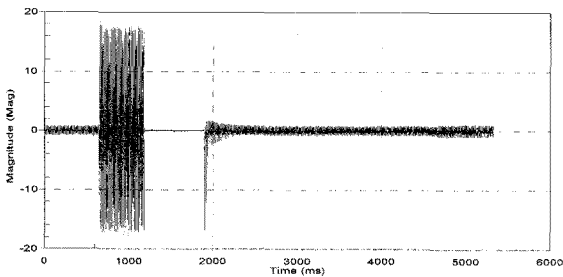
또 다른 한상 지락 사고 고장 파형(B상고장)을 그림 8에 보이고 있다. 그림은 감곡 변전소 장원 D/L에 장원 간 103L25호 피뢰기 까치집족으로 인한 순간 정전 고장이 발생한 경우에 대하여 전력량계 측정 파형을(CT 비 600:5, PT비 13200:110) 보이고 있다. 고장 유형은 1상 지락사고(c상 지락) 이었으며 전력량계가 설치된 감곡 변전소로부터 9813(m)에 위치한 지점이다.



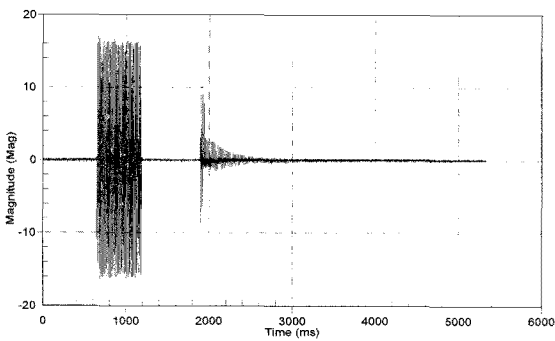
(a) a상전류



(b) b상전류



(c) c상전류



(d) 중성선 전류

그림 8 순간 고장 발생시 변전소 전력량계에서 측정되어진 고장 전류파형(CT 비 600:5)

Fig. 8 Fault Current Wave on the Measured from the Watt Hour Meter of Substation as Instantaneous Fault Generation

위의 그림 8. (a) a상전류 (b)b상전류 파형으로부터 a상, b상 에는 고장이 없으며, (c)c상 전류파형 (d) 중성선 전류 파형에서 c상 1개상에 지락사고가 발생함을 알 수 있다. 고장 파형에 대하여 좀 더 세밀한 분석을 위하여 고장이 발생

한 구간 600-1400(msec)에 대하여 확대한 파형을 다음에 나타내었다.

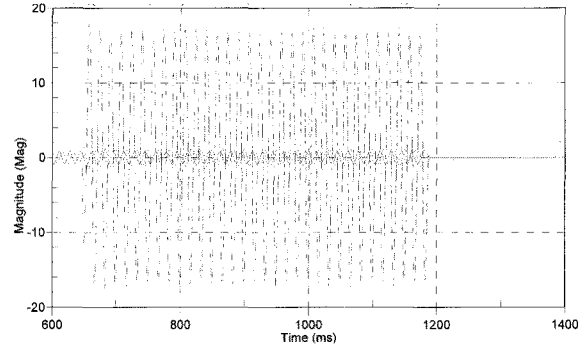


그림 9 순간 고장 발생시 변전소 전력량계에서 측정되어진 3상 및 중성선 전류 (구간: 600-1400(msec),CT 비 600:5)

Fig. 9 3 Phase and Neutral Line Current on the Measured from the Watt Hour Meter of Substation as Instantaneous Fault Generation

구간 600-1400(msec)에 대한 위의 그림 9. a상, b상 전류 파형으로부터 a상 및 b상 에는 고장이 없으며, c상전류 및 중성선 전류파형으로부터 640(msec)시점에 지락사고가 발생하였으며 540(msec)지난 후 1180(msec) 시점에서 CB가 동작되어 지락사고 종료되었음을 알 수 있다.

앞에 기술한 3상 단락 및 한상지락 사고에 대하여 다비치 웨이브렛 과 리커시브 임피던스 고장거리 추정 결과를 표 4에 나타내었다. 그림 10은 고장 저항별 고장 거리 추정 에러의 변화 추이를 나타내고 있다. 이 그림으로부터 고장 저항이 클수록 고장거리 계산 오차가 증가함을 알 수 있으며 3상 단락 사고에 대한 고장 추정이 한상지락에 비하여 상대적으로 큼을 알 수 있다.

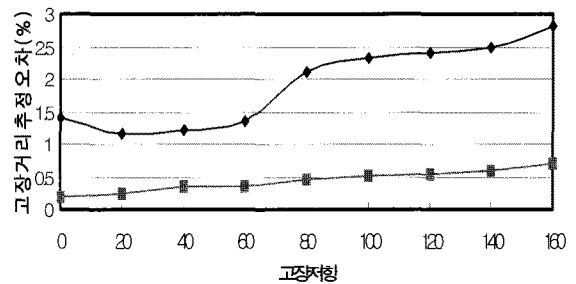


그림 10 고장 저항별 고장 거리의 추정 오차(◆:3상 단락, ■: 1상 지락)

Fig. 10 Measured Error of Fault Distance on the Fault Resistance Type (◆:3 Phase Short, ■: 1 Phase Ground)

또한 본 연구에서 제안한 웨이브렛 표정방법의 고장 표정기법의 표정 성능을 알아보기 위하여 앞에 기술한 3상 단락사고에 대하여 기존의 표정기법[2,10,14]과 비교 분석하여 표 5에 나타내었다. 3상 단락과 같이 과도현상 및 사고 형상이 다소 복잡하게 나타나는 경우에 웨이브렛 기법이 다른 기법

에 비하여 고장표정선능이 우수함을 확인할 수 있었다. 고장 거리 추정 오차는 다음 식을 사용하여 산정 하였다.

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

**표 4** 고장 저항별 추정고장거리 및 실제고장거리  
**Table 4** An Estimative Fault Distance on the Fault Resistance Type

고장 유형	고장저항 (Ω)	실제고장 거리(m)	고장추정 거리(m)	고장거리 추정오차 (%)
3상 단락	0 - 150	2192	2318 - 2443	1.4 - 2.8
1상 지락	0 - 150	9813	9871 - 9997	0.2 -0.7

**표 5** 기존 고장 표정 알고리즘과의 오차 비교  
**Table 5** An Error Comparison with Existing Fault Mark Algorithm

고장알고리즘	실제고장 거리(m)	고장추정거리 (m)	고장거리 추정오차(%)
D. Novosel[2]	2192	2604	4.5
T. Takagi[10]	2192	2624	4.7
R. Das[14]	2192	2495	3.4
다비치 웨이브릿	2192	2318	1.4

#### 4. 결 론

본 논문에서는 변전소 계통에 고장 발생시, 변전소 인출 단 전력망계에서 계측이 가능한 고장 계통 전류, 전압에 대하여 다비치 웨이브릿 변환을 취한 후 고장 임피던스를 계산하는 알고리즘을 제안하였다. 더불어 기존의 논문에서 고려되지 않았던 여러 가지 배전 계통 고장에 대하여 각 고장 조건에 적합한 다비치 웨이브릿 기반의 고장임피던스 계산 방법을 제안하였다. 또한, 부하 조건 및 계통 불평형 조건에서도 성공적으로 고장 거리를 검출 할 수 있는 리커시브 고장 임피던스 추출 기법을 제시하였다.

제안한 알고리즘은 다양한 고장 저항에 대하여 우수한 고장 표정 결과를 나타냈으며, 고장 저항이 높은 경우에도 매우 낮은 고장 추정 오차를 보였다. 이렇게 계산되어진 고장 임피던스로부터 배전선로 고장점 추정을 위하여 불평형 배전계통의 단선도 해석 기법을 통하여 얻어진 고장점 추정 임피던스와 고장거리사이에 대한 리커시브 알고리즘을 이용하여, 실제로 고장이 발생된 배전계통에 대한 고장 추정을 한 결과 고장 거리 추정 에러의 변화 추이가 매우 적음을 확인하였다. 또한 기존의 고장 표정 알고리즘과 비교 3상 단락사고와 같은 과도현상이 상대적으로 긴 고장에 대하여 우수한 특성을 가짐을 분석하였다.

앞으로 수행하여야 할 연구로는 전력망계를 통해 계측하면서 수반되어지는 A/D 컨버터의 해상도 및 샘플링 과정에서 수반되어지는 계측 오차로 인하여 나타나는 고장 표정 부분에 대한 분석 및 보정 기법의 정립이 필요하다. 본 알고리즘의 펌웨어 적재가능 여부를 판단하기 위하여 Axis사의 Etrax 100Lx 32비트 마이크로프로세서를 활용 하여 시험한 결과 알고리즘 수행시간이 10초 이내임을 확인 하였다. 차후, 이를 활용하여 변전소에 기 설치된 전력망계에 본 알고리즘의 펌웨어 적재 하기위한 방안 및 인터페이스/프로토콜에 관한 대책 연구가 수행 되어야 한다.

#### 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 전력IT IDMS(Intelligent Distribution Management System)과제 지원으로 수행되었음

#### 참 고 문 헌

- [1] WELFONDER, T. et al, Location Strategies and Evaluation of Detection Algorithms for Earth Faults in Compensated MV Distribution Systems, IEEE Transactions on Power Delivery 15 No. 4, pp. 1121-1128, 2000.
- [2] D. Novosel, D. Hart, E. Udren and J. Garitty, "Unsynchronized two-terminal fault location estimation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11. No. 1, pp. 130-138, Jan, 1996.
- [3] Girgis, d. Hart, W. Peterson, "A new fault location technique for two and three terminal lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 1, pp. 98-107, Jan, 1992.
- [4] J. Jiang, J. Yang, Y. Lin, C. Liu and J. Ma, "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, pp. 486-493, Jan, 2000.
- [5] J. Jiang, J. Yang, Y. Lin, C. Liu and J. Ma, "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, pp. 1136-146, Oct, 2000.
- [6] V. Cook, "Fundamental aspects of fault location algorithms used in distance protection", IEE Proceedings, Vol. 133 Pt. C, pp. 359-366, 1986.
- [7] M. S. Sachdev and R. Agarwal, "A technique for estimating line fault locations from digital impedance relay measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, pp. 121-129, Jan, 1988.
- [8] T. Adu, "A new Transmission Line Fault Locating System", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No. 4, pp. 498-503, Oct, 2001.



- [9] T. Takagi, Y. Yamakoshi, J. Baba, K. Uemura and T. Sakaguchi, "a new algorithm for EHV/UHV transmission lines: Part I-Fourier transform method", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, pp. 1316-1323, 1981.
- [10] T. Takagi, Y. Yamakoshi, M. Yamaura, R. Kondow and T. Matsushima, "Development of a new type fault locator using the one-terminal voltage and current data", *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, pp. 2892-2898, 1982.
- [11] T. Funabashi, H. Otoguro, Y. Mizuma, L. Dube, M. Kizilcay and A. Ametani, "Influence of Fault Arc Characteristics on the Accuracy of digital Fault Locators", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 16, No. 2, pp. 195-199, April 2001.
- [12] Hänninen, S., Lehtonen, M. & Hakola, T. 2001. Earth faults and related disturbances in distribution networks. *Proceedings of IEEE PES SM2001*, July, pp. 673-679
- [13] Eberl, G., Hänninen, S., Lehtonen, M. & Schegner, P. 2000. Comparison of artificial neural networks and conventional algorithms in ground fault distance computation. *Proceedings of IEEE PES WM2000*, Jan. 2000, pp.1991-1996

## 저 자 소 개



### 이 성 우 (李 聖 雨)

1960년 3월 1일생(음). 1999년 건국대 대학원 전기공학과(공학박사), 1990년 한국전력공사 입사. 1992~2006년 한전 전력연구원 발전연구소 근무. 2007년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 배전IT 그룹 부장. 배전지능화 및 배전 IT 시스템 분야 연구.

Tel : 042-865-5931

E-mail : swlee@kepri.re.kr



### 하 복 남 (河 福 男)

1958년 1월 10일생. 1994년 충남대 대학원 전기공학과(석사). 2004년 충남대 대학원 전기공학과(공학박사), 1978년 한국전력공사 입사 이후 대전전력관리처, 광주전력관리처, 전력연구원 근무, 1988년~현재 한전 전력연구원 배전연구소 배전IT 그룹 장.

Tel : 042-865-5930

E-mail : bnha@kepri.re.kr