

A Fast Fault Location Method Using Modal Decomposition Technique of Traveling Wave

趙慶來* · 洪俊憲** · 金成洙*** · 姜龍澈[§] · 朴鍾根^{§§}
 (Kyung-Rae Cho · Jun-Hee Hong · Sung-Soo Kim · Yong-Cheol Kang · Jong-Keun Park)

Abstract: In this paper, a fault location algorithm is presented, which uses novel signal processing techniques and takes a new paradigm to overcome some drawbacks of the conventional methods. This new method for fault location on electric power transmission lines uses only one-terminal fault signals. The main feature of the method is that it uses the high frequency components in fault signal and considers the influence of the source network by using a traveling wave propagation characteristics. As a result, we can develop a high speed, good accuracy fault locator.

Key Words : Fault location, Traveling wave, Driving-point impedance, Characteristic frequency, Prony analysis.

1. 서 론

현대의 전력계통은 단순한 전력에너지 전송기능만이 아닌 보다 고도화된 기능을 갖추어 양질의 전력을 공급할 수 있어야 한다. 또한 80년대 이후 등장한 마이크로 프로세서를 이용한 디지털 계전기는 이제 과거의 아날로그 계전기들이 하던 계통의 안정성을 유지한다는 소극적인 계통보호 개념에서, 더 나아가 소비자들이 전기에 기대하는 편리함과 효율성을 최대한 보장하도록 하는 적극적 계통보호의 책임을 요구받게 되었다. 이런 관점에서 가능한 빨리 사고지점을 전계통으로부터 격리, 차단하는 능력과 더불어 사고발생 지점을 최대한 정확하게 추정하여 신속한 사고복구를 가능하게 하는 고장점 표정 능력(accurate fault location) 또한 현대의 보호계전기가 반드시 갖추어야 할 기능이다.

디지털 계전기를 위한 고장점 표정방식에 대한 본격적인 연구는 1982년 T. Takagi 등에 의해서 시작되었으므로 그 연원이 오래되지 않았다고 할 수 있다.[1] 이는 고장점 표정이라는 문제 자체와 그에 수반하는 모델링이 간단하지 않다는 점과 정확성을 높이기 위한 계산량 부담을 지원하는 하드웨어의 능력이 미처 따르지 못한 점 등으로 인해 기존의 임피던스 거리계 전기보다 월등한 결과를 내는 표정방식을 찾지 못했기 때문이다. 그러나 70년대 이후 눈부시게 발전한 마이크로 프로세서 기술은 강력한 신호처리 능력과 방대한 기억능력을 저렴한 비용으로 제공할 수 있게 되었다. 덕분에 고장신호 분석시 많은 수의 데이터를 사용할 수 있게 되었으며, 고장 후의 전압 전류 신호뿐 아니라 고장 전의 것도 이용할 수 있게 되었다. 이로 인해 보통의 거리계전기에서 빠른 판단과 적은 연산부담을 위

해 채택했던 몇 가지 가정들-필연 정확성의 저하를 초래하는 가정들-을 버릴 수 있었으며, 정확한 사고거리 추정을 위한 독자적인 방식의 거리표정 기법이 보호계전 분야와 차별성을 가지고 시도될 수 있었다[1-6].

지금까지 개발된 사고거리 표정기법을 크게 나누면 선로의 양단 정보를 이용하는 방식과 계전기가 설치된 지점의 정보만을 이용하는 방식의 두 부류로 생각할 수 있다. 양단 정보 이용법은 사고선로 양단에서 측정된 고장 전후의 전압 전류를 모두 이용해 사고 이후 새롭게 도달하게 될 계통의 정상상태를 추정한다. 양단 정보를 모두 이용하기 때문에 사고신호에 영향을 미치는 전원측 임피던스와 고장저항의 영향을 쉽게 고려할 수 있으며 거리오차 2% 이내의 아주 정확한 결과를 얻을 수 있다[6,7]. 최근에는 양단 사고신호의 동시측정오차(error due to unsynchronized sampling) 문제도 해결되어 현재 사용되고 있는 대표적인 사고거리 표정법이라 할 수 있게 되었으나 선로 양단의 정보를 전송하는 통신선이 유실될 경우 사고거리 표정 기능이 마비되는 문제가 있다[6].

통신선 장애에 따르는 문제점은 선로의 한쪽 정보만을 이용하는 방식에 의해 근원적으로 해결될 수 있다. 이 경우 통신선 확보에 따르는 설비비용을 절약할 수 있고 보다 간단한 방식의 표정기법이 구현될 수 있어, 최초로 발표된 T. Takagi 등의 방법 이래로 이 부류에 많은 노력이 있어왔다. 그러나 지금까지 제안된 방식들은 양단정보를 사용하는 방법에 비하여 고장저항이나 전원 임피던스의 값에 따라 정확성이 떨어지는 단점이 있는데 이는 이용할 수 있는 정보의 양이 반감하게된 한계를 극복하지 못했기 때문이다. 특히 고장저항의 영향을 크게 받는 데 이를 방지하기 위해서 선로의 임피던스 값이 아닌 리액턴스 값을 추정하는 방식으로 발전되어 왔으나 그 성능은 아직 기대에 못미쳐 대략 10Ω 정도의 고장저항 값에도 상당한 오차를 보이는 것으로 알려져 있다[7].

한편 위의 두 가지 방법 모두 사고 이후의 정상상태 값을 추정하는 방식이어서 사고 데이터에 포함된 직류 성분이나 과도성분들에 의한 파형왜곡이 빠르고 정확한 사고거리 표정에 어려움으로 작용하는데 이 점은 60 Hz 성분의 페이저 해석을 이용하는 기존 알고리즘들의 본성적인 한계라 할 수 있다.

본 논문에서는 계전기단에서 관측한 사고후 전압전류 신호만

* 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 卒業 · 工博

** 正 會 員 : 暹園大 電氣工學科 專任講師

*** 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 서울大 大學院 電氣工學科 博士課程 修了

§§ 正 會 員 : 서울大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

接受口字 : 1995年 10月 17日

1次 修正 : 1995年 12月 5日

2次 修正 : 1995年 12月 30日

을 이용해 빠르고 정확하게 고장점을 표정하는 새로운 방법을 제안한다. 제안하는 방법은 사고현상 및 사고거리 추정의 문제를 진행파의 관점에서 다시 정의함으로써 얻어진다. 이 방법에서는 60 Hz 성분의 페이저 해석을 이용하는 대신 파도신호 자체를 사고현상의 자연스러운 발현으로 여기고 이를 적절한 신호처리 기법을 사용해 분석하므로써 기존의 거리표정 기법들이 가진 한계를 극복하고자 하였다.

이를 위해 본 논문에서는 사고가 발생한 계통의 특성을 계전 기단이 아닌 고장점에서 바라본 구동점 임피던스 함수의 꼴로 표현하였다. 이 구동점 임피던스 함수는 전원 임피던스와 사고거리 그리고 특성 주파수(characteristic frequency)라는 특이 주파수 성분의 식으로 표현된다. 여기에 프로니 해석법에 의해 특성 주파수를 구하고, 진행파의 전파특성을 이용해 전원 임피던스 값을 추정하면 특성 주파수에서의 구동점 임피던스를 사고거리만의 함수로 나타낼 수 있고, 이로부터 쉽고 직접적인 풀이를 통해 사고거리를 구할 수 있다. 제안된 방식의 장점은 시시각각 변하는 전원측의 임피던스를 고려할 수 있다는 점과 60 Hz에 비하여 아주 높은 값의 특성 주파수 성분을 이용하므로 선로의 리액턴스 값이 상대적으로 강조되어 고장저항 값의 변화에 아주 강한 결과를 기대할 수 있다는 점이다. 그리고 사고 이후 반주기 정도의 데이터만으로도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 기존의 방식들에 비하여 월등히 빠른 고속의 사고거리 표정기법이라 할 수 있다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검토하였는데 기존의 방법들에 비하여 뛰어난 결과를 확인할 수 있었다.

2. 진행파

송전선로에서 발생하는 제반 전자기적 현상은 시간과 공간에 대한 편미분 방정식인 파동 방정식으로 기술될 수 있다.

$$\begin{aligned} -\frac{\partial v(x,t)}{\partial x} &= Ri(x,t) + L\frac{\partial i(x,t)}{\partial t} \\ -\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} &= Gv(x,t) + C\frac{\partial v(x,t)}{\partial t} \end{aligned} \quad (1)$$

R과 G를 무시하는 경우, 이 파동 방정식의 해는 D'Alembert의 해로 알려져있으며

$$\begin{aligned} v(x,t) &= f(x-\mu t) + g(x+\mu t) \\ i(x,t) &= \frac{1}{Z_0} \{f(x-\mu t) - g(x+\mu t)\} \end{aligned} \quad (2)$$

와 같다. 이 식에서 μ 는 전파속도, Z_0 는 선로의 특성 임피던스이며 f 와 g 는 각각 전진파와 후진파라 한다. 또한 선로의 일정한 한 지점에서 관측되는 진행파는 시간 t 만의 함수이며

$$\begin{aligned} 2f(t) &= v(t) - Z_0 i(t) \\ 2g(t) &= v(t) + Z_0 i(t) \end{aligned} \quad (3)$$

가 된다.

2.1 사고시의 진행파

진행파의 입장에서 본 선로에서의 사고발생은 파의 전파매질(propagation media of the wave)이 변하는 것이다. 이를 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

그림 1에 표현된 사고시 매질의 순간적인 변화는 사고지점에

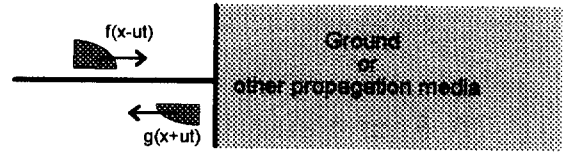


그림 1 사고지점에서의 반사
Fig. 1 Reflection of traveling wave

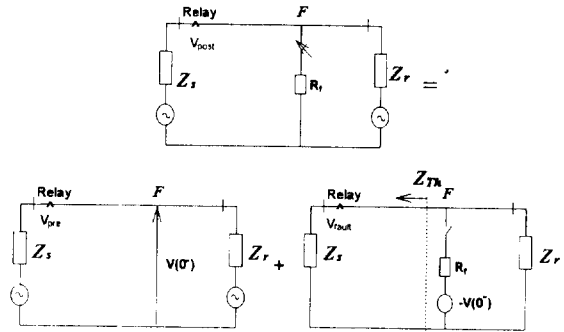


그림 2 단상 송전선로에서의 고장 모델
Fig. 2 Fault model in single phase transmission line

서 전압의 붕괴로 나타나고 이는 계전기가 설치된 지점에서 상용주파수 이외의 성분을 가지는 진행파의 형태로 감지가 된다. 이때 사고지점에서의 전압붕괴의 양상은 반사가 일어나는 매질의 경계 조건, 사고발생 전압 위상각 등 사고의 물리적 조건에 따라 달라지는데 이를 그림 2와 같이 고장저항과 전원을 사용하여 회로적으로 표현할 수 있다.

즉, $t=0$ 인 순간에 사고가 발생한 경우, 사고지점에 정상상태의 전압과 크기가 같고 부호가 반대인 전압이 순간적으로 인가되는 것으로 전압붕괴를, 고장저항으로 경계면의 전기적 특성을 나타낼 수 있다.

그리고 사고 이후의 전압과 전류 성분은 그림 2의 고장 모델에서 보는 바와 같이 사고 이전의 정상상태 성분과 사고로부터 인가된 성분의 합으로 표현할 수가 있다. 사고 이후의 값을 (i_{post}, v_{post}) 로, 사고 전의 값을 (i_{pre}, v_{pre}) 라 하면 중첩의 원리에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{post} &= i_{pre} + i_{fault} \\ &= i_{pre} + (i_{f-steady} + i_{f-transient}) \\ v_{post} &= v_{pre} + v_{fault} \\ &= v_{pre} + (v_{f-steady} + v_{f-transient}) \end{aligned} \quad (4)$$

v_{fault} 와 i_{fault} 가 사고와 관련된 모든 중요한 정보를 가지므로 사고를 감지하고 그 거리를 구할 때는 보통 v_{post} 와 i_{post} 에서 v_{pre}, i_{pre} 를 제거한 고장신호만을 이용한다. v_{pre}, i_{pre} 를 제거할 때는 한 주기 전의 정보를 기억한 후 이를 v_{post} 와 i_{post} 에서 빼면 된다. 이와같이 구해진 v_{fault} 와 i_{fault} 를 구성하는 성분중 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 는 상용주파수 성분만을 가지며 사고 후 충분한 시간이 흐른 뒤 새로이 도달하게되는 정상상태를 기술한다. 기존의 거리계전 방식들은 이 정상상태를 가급적 빨리 추정하여 사고 후의 계통상태를 알아내는 방식이라 할 수 있으나 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 에 포함된 고조파 성분들로 인해 정확한 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 를 추정하는데 어려움이 있게 된다. 이 어려움은 사용하는 데이터의 수가 적을수록 커지는데

이는 60 Hz 성분과 같이 느린 신호를 정확히 추정하기 위해서는 그에 상응하는 최소한의 관측시간을 필요로 하기 때문이다. 즉, 고장신호 해석에 기본파 성분을 사용할 경우 필연적인 시 지연이 따르는 것이다. 더욱이 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 에 포함된 고주파수 성분들이 기본파를 사용하여 고장 거리를 추정하는 방법들에 있어서는 오차의 원인이 되지만, 역으로 사고발생 현상 자체에 대한 정보를 풍부하게 담고있는 신호이기도 하다. 이를 잘 이용하면 기존의 거리계산 방식이 가진 근본적인 한계를 극복할 수 있는 새로운 방식을 기대할 수 있다.

이런 관점에서 본 논문에서는 v_{fault} 와 i_{fault} 를 구성하는 성분 중 $v_{f-steady}$ 와 $i_{f-steady}$ 를 제외한 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 를 분석해 고장거리를 추정한다. 이에 따라 기본파 보다 높은 주파수를 가지는 $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 가 주로 나타나는 사고 초기-대략 사고 후 반주기 이내의 측정 데이터만으로 충분하며 그 결과 고속의 거리표정이 가능하게 된다.

2.2 사고신호 분석 - 특성 주파수 검출

사고에 관련된 신호를 진행파의 형식으로 관측하면

$$\begin{aligned} f_{post} &= f_{pre} + f_{fault} = f_{pre} + (f_{f-steady} + f_{f-transient}) \\ g_{post} &= g_{pre} + g_{fault} = g_{pre} + (g_{f-steady} + g_{f-transient}) \end{aligned} \quad (5)$$

이고, v_{fault} 와 i_{fault} 를 구하듯이 f_{fault} 와 g_{fault} 를 구하여 이를 사고감지 및 사고거리 추정에 이용할 수 있다. 이때

$$\begin{aligned} 2f_{fault}(t) &= v_{fault}(t) - Z_0 i_{fault}(t) \equiv F(t) \\ 2g_{fault}(t) &= v_{fault}(t) + Z_0 i_{fault}(t) \equiv G(t) \end{aligned} \quad (6)$$

이고 본 논문에서는 $F(t)$ 과 $G(t)$ 를 계전기 신호로 사용하였다. 한편, $v_{f-transient}$ 와 $i_{f-transient}$ 로부터 고장 거리 추정에 필요한 정보를 추출하기 위해서는 고장신호에 대한 분석기법이 뒷받침되어야 한다. 본 논문에서는 이를 위해 프로니 해석(Prony analysis)을 사용하였다.

프로니 해석은 일정한 시간간격을 가지고 측정된 신호에 대하여 이를 식 (7)과 같이 지수적으로 감쇠하는 정현파들의 선형결합으로, 즉 모드분해(modal decomposition)된 꼴로 표현하는 방법이다.[11-12]

$$y(t) = \sum_{k=1}^N A_k e^{\sigma_k t} (\cos \omega_k t + \sin \omega_k t) \quad (7)$$

위 식에서 N 은 해석대상 신호를 구성하고 있는 모드의 개수이며 프로니 해석은 최소자승 오차의 관점에서 최적의 파라미터 $\{A_k, \sigma_k, \omega_k\}$ 를 결정한다. 특히 프로니 해석법은 인접한 주파수 성분들을 정확히 구별하는 주파수 분해능이 매우 뛰어나고, 주어진 신호의 주파수 뿐 아니라 감쇠정수까지 구해주므로 이를 이용하면 FFT의 한계를 극복하고 주어진 신호에 대한 근사 유리함수 꼴의 Laplace 영역 표현까지 직접 얻을 수도 있다.[12,13]

즉, 식 (7)에 대하여 이를 Laplace 변환하면

$$Y(s) = \sum_{k=1}^N \left(\frac{R_k}{s - \lambda_k} + \frac{R_k^*}{s - \lambda_k^*} \right) \quad (8)$$

이다. 그림 3은 그림 1의 송전선 고장 모델에 대한 고장신호를 프로니 해석한 전형적인 예이다.

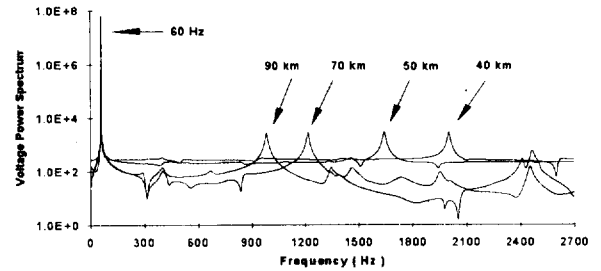


그림 3 고장신호에 대한 스펙트럼 분석 예
Fig. 3 Spectrum of fault signal

그림 3의 결과에서 주목할 점은 사고거리에 따라 사고파형에 존재하는 직류 성분이나 스펙트럼이 가장 강하게 나타나는 주파수 값-이하에서 특성 주파수라 한다.-이 달라진다는 점이다. 이에 대해서는 O. Chaari 등이 깊이있는 연구를 수행하였으며, 그 결과 직류 성분의 시정수나 특성 주파수 값이 사고 유형과 사고거리와 밀접한 관계를 가짐을 밝힌 바 있다[11].

한편, 사고현상에 동반하는 썩어지 등과 같이 시스템의 빠른 특성에 대한 정보는 직류 성분이나 저주파수 성분 보다는 고주파수 성분을 통해 효과적으로 관측될 수 있다. 이는 사고파형에 나타나는 직류 성분이나 저주파수 성분은 본질적으로 시스템의 느린 응답을 나타내는데 아주 빠른 응답에 대해서는 확률적 평균의 의미만-이것이 기본파 성분을 사용하는 방법에서는 오차가 된다.-을 반영하는 것이기 때문이다. 그리고 고주파수 성분들 중에서 사고정보를 가장 명확하게 담고있는 성분을 선택한다면 특성 주파수 성분이 될 것이다. 이 특성 주파수를 ω_r 이라면 ω_r 은 그림 2의 고장모델 시스템의 공진 주파수에 해당하며 이 값은 프로니 해석 결과로부터 쉽게 구할 수 있다.

본 논문에서 프로니 해석시 사용한 고장신호 모델은 식 (9)와 같이 6개의 모드로 구성된 모델인데, 최적의 모드수 결정에 대한 해석적 지표는 아직 알려지지 않았으나 배전계통에 대하여 해석한 [11]에서는 4개의 모드를 사용한 바 있으며 경험적으로는 5-6개의 모드 수로 충분하였다.

$$y(t) = Y_{dc} + Y_{fow} + Y_{r1} + Y_{r2} + Y_{r3} + Y_{r4} \quad (9)$$

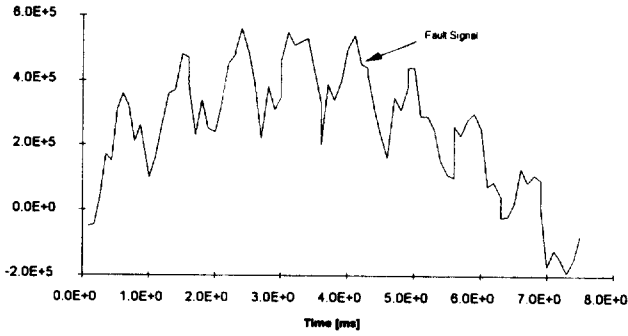
여기서 Y_{dc} 는 직류 성분, Y_{fow} 는 기본파 성분, Y_{r1} 는 i 번째 공진 주파수 성분인데 송전계통의 경우 송전선로가 가진 분포성으로 인하여 연속적인 공진 주파수가 나타나게 되므로 이를 고려하는 것이다. 이들 공진 주파수들 중에서 특별히 첫 번째 공진 주파수 Y_{r1} 만을 사고 시스템에 대한 특성 주파수로 삼아 사고분석에 이용하는데 이는 $t=0$ 인 사고순간에 그림 2의 고장모델 시스템에 인가되는 여기 신호가

$$V_F(t) = V_F \cos(\omega_0 t + \phi) u(t) \quad (10)$$

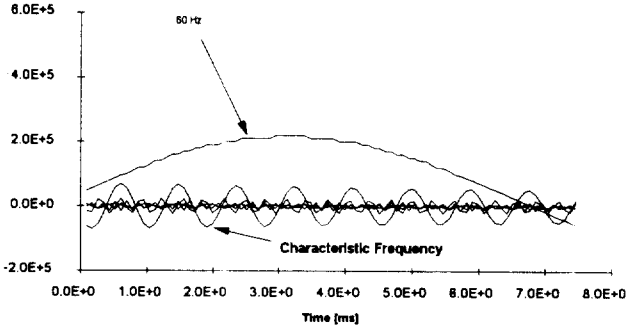
$$\begin{aligned} V_F(\omega) &= [\pi \{ e^{j\phi} \cdot \delta(\omega - \omega_0) + e^{-j\phi} \cdot \delta(\omega + \omega_0) \}] \\ & * [\frac{1}{j\omega} + \pi \delta(\omega)] \end{aligned} \quad (11)$$

* : convolution integral in frequency domain

와 같으므로 아주 높은 대역의 주파수 성분에 대해서는 여기신



(a) 고장 신호



(b) 고장 신호의 모드 분해

그림 4 특성 주파수 검출 예

Fig 4 Resonance frequency detection by Prony analysis

호 자체가 작아서 관측되는 신호도 미약하기 때문이다.[15] 그림 (4)는 전형적인 프로니 해석에 의한 특성 주파수 성분 검출 예이다.

3. 고장점에서 본 구동점 임피던스

한편, 식 (3)과 같이 정의된 진행파는 고장 신호만을 드러내기 위하여 f_{pre} , g_{pre} 를 제거한 형태로 관측한다. 이때 후진파는 정상상태에서는 관측되지 않다가 고장의 발생과 동시에 나타나게 되므로 계전기가 설치된 지점에서 일정한 기준값을 초과하는 후진파가 감지될 때 고장 계산에 들어간다.

3.1 구동점 임피던스

그림 2에서 송전선의 선로정수를 각각 $R[\Omega/km]$, $L[H/km]$, $C[F/km]$ 라고 하면 고장점 F에서의 전압과 전류 V_F , I_F 는 계전기에서의 전압과 전류를 V , I 라 할 때

$$\begin{aligned} V_F &= V \cosh \gamma l + Z_0 I \sinh \gamma l \\ I_F &= \frac{V}{Z_0} \sinh \gamma l + I \cosh \gamma l \end{aligned} \quad (12)$$

이다. 위 식에서 Z_0 는 특성임피던스, γ 는 전파정수로서

$$\begin{aligned} Z_0 &= \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \\ \gamma &= \sqrt{ZY} = \sqrt{(R+j\omega L)j\omega C} \approx j\omega\sqrt{LC} = \frac{j\omega}{\mu} \end{aligned} \quad (12)$$

와 같고, $\mu=1/\sqrt{LC}$ 는 진행파의 속도이다. 그러면 그림 2의

고장 모델에 대한 고장점에서 전원측을 바라본 구동점 임피던스를 Z_{Th} 라면

$$Z_{Th}(\omega, l) = \frac{V_F}{I_F} = Z_0 \frac{Z_s + Z_0 \tanh \gamma l}{Z_0 + Z_s \tanh \gamma l} \quad (13)$$

이다. 위 식에서 구동점 임피던스 Z_{Th} 에는 송전선로의 특성이 특성 임피던스 Z_0 와 전파정수 γ 를 통해 반영되고 있고, 보호 구간 외부의 특성이 계전기단에서 전원측을 바라본 등가 전원 임피던스 Z_s 로 고려되고 있다. 이때 특성 임피던스 Z_0 와 전파정수 γ 는 주어진 값이므로 적절한 방식에 의하여 전원 임피던스 Z_s 를 구하고 $\omega = \omega_r$ 라 하면 Z_{Th} 는 거리 l 만의 함수가 된다. 이때 ω_r 이 고장 시스템의 공진 주파수이므로

$$\omega_r = \min_{\omega} |Z_{Th}(\omega, l)| \quad (14)$$

$$Im\{Z_{Th}(\omega, l)\} = 0 \quad (15)$$

을 만족한다.

3.2 특성 주파수의 범위

특성 주파수는 전원임피던스의 값에 따라 그 대역이 달라지는데 전원 임피던스의 값이 0일 때는 구동점 임피던스

$$Z_{Th}(\omega, l) = Z_0 \tanh\left(\frac{j\omega}{\mu} l\right) = jZ_0 \tan\left(\frac{\omega}{\mu} l\right) \quad (16)$$

는 $\omega = 2\pi f = \pi\mu/l$ 일 때 0이므로 특성 주파수는 $f_r = \mu/2l$ 의 값을 갖는다. 같은 방법으로 전원 임피던스가 ∞ 일 때는 $f_r = \mu/4l$ 이다. 따라서 고장 거리가 l 일 때 관측할 수 있는 특성 주파수는

$$\frac{\mu}{4l} < f < \frac{\mu}{2l} \quad (17)$$

인 범위에 있게 된다.

3.3 반사계수를 이용한 전원 임피던스 추정

그림 2에서 특성 임피던스 Z_0 인 선로가 계전기단의 모선에서 구동점 임피던스 혹은 전원 임피던스 $Z_s(\omega_r)$ 인 외부 전원 계통과 연결되어 있고, 이 임피던스 부정합점에 후진파 $g_{fault}(\omega_r)$ 가 입사하여 전진파 $f_{fault}(\omega_r)$ 가 반사되어 나온다면 특성 주파수 성분에 대한 반사계수 $\rho(\omega_r)$ 은

$$\rho(\omega_r) = \frac{f_{fault}(\omega_r)}{g_{fault}(\omega_r)} \quad (18)$$

와 같이 정의되며

$$\rho(\omega_r) = \frac{Z_s(\omega_r) - Z_0(\omega_r)}{Z_s(\omega_r) + Z_0(\omega_r)} \quad (19)$$

인 관계가 성립한다. 따라서 전원 임피던스 $Z_s(\omega_r)$ 를

$$Z_s(\omega_r) = Z_0(\omega_r) \frac{1 + \rho(\omega_r)}{1 - \rho(\omega_r)} \quad (20)$$

와 같이 표현할 수 있고, 식 (18)에서 전진파 $f_{fault}(\omega_r)$ 와 후진파 $g_{fault}(\omega_r)$ 는 계전기가 설치된 지점에서 측정된 전압, 전류 신호를 푸리에 해석하여 구해지는 값이므로 식 (20)에 의해 전원 임피던스 $Z_s(\omega_r)$ 를 구할 수 있다. 이때 식 (20)에 나타나는 $Z_0(\omega_r)$, $\rho(\omega_r)$ 그리고 $f_{fault}(\omega_r)$ 와 $g_{fault}(\omega_r)$ 는 모두 특성주파수에 대한 페이저 표현을 사용하며 복소수 값이다. 식 (20)은 진행파의 전파 및 반사 특성을 이용하여 사고 직후 외부 전원계통의 상태를 추정함을 의미한다.

4. 구동점 임피던스 함수의 해법

특성 주파수와 전원임피던스를 구하면 식 (13)의 구동점 임피던스는 아래와 같이 고장거리 l 만의 함수로 표현된다.

$$\begin{aligned} Z_{Th}(l) &= Z_0 \frac{Z_s + jZ_0 \tan(\omega_r l / \mu)}{Z_0 + jZ_s \tan(\omega_r l / \mu)} \\ &= Z_0 \frac{Re(Z_s) + jIm(Z_s) + Z_0 \tan(\omega_r l / \mu)}{Z_0 - Im(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu) + jRe(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu)} \\ &= Z_0 \frac{C + jD}{A + jB} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서

$$\begin{aligned} A &= Z_0 - Im(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu) \\ B &= Re(Z_s) \tan(\omega_r l / \mu) \\ C &= Re(Z_s) \\ D &= Im(Z_s) + Z_0 \tan(\omega_r l / \mu) \end{aligned}$$

이다. 식 (21)의 분모를 실수화하면

$$\begin{aligned} Z_{Th} &= Z_0 \frac{C + jD}{A + jB} = Z_0 \frac{(C + jD)(A - jB)}{A^2 + B^2} \\ &= Z_0 \frac{AC + BD + j(AD - BC)}{A^2 + B^2} \end{aligned} \quad (22)$$

가 되고, 위 식의 허수부를 $\tan(\omega_r l / \mu)$ 에 대하여 정리하고 식 (15)에 따르면

$$\begin{aligned} Im(Z_{Th}) &= AD - BC \\ &= -Z_0 Im(Z_s) \tan^2(\omega_r l / \mu) \\ &\quad + (Z^2 - Im^2(Z_s) - Re^2(Z_s)) \tan(\omega_r l / \mu) + Z_0 Im(Z_s) \\ &= a_1 x^2 + a_2 x + a_3 = a_1(x - \alpha)(x - \beta) = 0 \end{aligned} \quad (23)$$

여기서 $x = \tan(\omega_r l / \mu)$

와 같은 2차 방정식을 얻는다. 따라서 식 (23)의 해는

$$\begin{aligned} \tan(\omega_r l / \mu) &= \alpha, \beta \\ \omega_r l / \mu &= \tan^{-1}(\alpha) \pm n\pi, \tan^{-1}(\beta) \pm m\pi \end{aligned} \quad (24)$$

이고, 이로부터 고장 거리 l 을 구할 수 있다. 그런데 특성 주파수가 $\omega_r = 2\pi f_r$ 일 때, 고장거리의 범위가 식 (17)에서

$$\frac{\mu}{4f_r} < l < \frac{\mu}{2f_r} \quad (25)$$

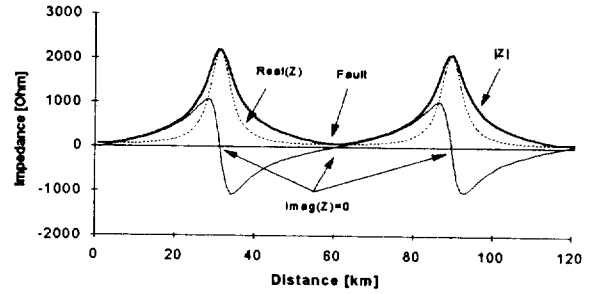


그림 5 60 km 사고에 대한 구동점 임피던스

Fig. 5 Driving-point impedance for 60 km fault

로 주어지므로 $\omega_r l / \mu$ 은

$$\frac{\pi}{2} < \frac{\omega_r l}{\mu} < \pi \quad (26)$$

의 범위에 있어야 한다. 따라서 식(24)에서 정수 n 과 m 은 식 (26)를 만족하도록 정해진다. 그러면 α 와 β 에 의해 두개의 거리 l_1 과 l_2 를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} l_1 &= \frac{\tan^{-1}(\alpha) \pm n\pi}{\omega_r / \mu} \\ l_2 &= \frac{\tan^{-1}(\beta) \pm m\pi}{\omega_r / \mu} \end{aligned} \quad (27)$$

이 두 값중 하나는 구동점 임피던스가 최대가 되는 값이고, 다른 하나는 최소가 되는 값이다. 따라서 $Z_{Th}(l_1)$, $Z_{Th}(l_2)$ 중에서 작은 값이 되는 거리가 고장 거리이다. 이는 그림 5를 보면 쉽게 이해할 수 있다. 구동점 임피던스의 허수부가 0이 되는 곳은 \tan 함수의 주기성 때문에 여러 곳이나 식 (26)를 만족하는 거리는 30km와 60km뿐이며 이 중 60km에서 구동점 임피던스가 최소가 된다.

5. 사례 연구

제안된 방법의 타당성을 검토하기 위해 본 논문에서는 전원 임피던스가 집중정수 요소로 이루어진 경우와 분포정수 요소인 경우, 두 가지 사례에 대한 모의실험을 수행하였다. 두 사례 모두에서 사용한 고장 데이터는 과도 현상 프로그램인 EMTP (ElectroMagnetic Transient Program)를 사용해 얻었으며 이때 샘플 속도는 11520 Hz로 이는 60Hz 한 주기당 192 샘플에 해당한다. 이 경우 검출 가능한 최대 주파수는 5760Hz가 되며 이때 추정 가능한 최소 거리는 식 (25)에 의해 25.8 km이다. 한편 고장 데이터는 12 bit의 해상도에 약 2 bit의 오차를 가지도록 하였다. 또한 특성 주파수를 검출하기 위한 푸리에 해석시 기본파의 3/7 주기에 해당하는 86개의 고장 데이터를 사용하였다. 계전기의 보호구간 송전선의 선로정수는 표 1과 같다.

표 1 보호 구간 송전선의 선로 정수

Table 1 Line constant of transmission line

$R[\Omega/km]$	$L[mH/km]$	$C[\mu F/km]$
0.1006	1.2379	0.0093

5.1 사례 1: 전원 측이 집중정수 회로인 경우

사례 1에서는 그림 6과 같이 계전기가 설치된 모선의 전원측에 집중정수 회로가 연결된 경우에 대하여 모의하였는데 이는 거리계전 방식이나 표정기법의 타당성 검토에 일반적으로 사용되는 모델이다.

먼저 사고거리와 특성 주파수와와의 관계를 알아보기 위하여 $Z_s = 0$ (반사계수가 -1)인 경우와 $Z_s = \infty$ (반사계수가 1)인 경우에 대하여 사고거리를 바꾸어 가며 특성 주파수를 구해보았다. 그림 7이 그 결과인데 사고거리가 멀수록 특성 주파수는 작아지고 사고거리가 가까우면 특성 주파수는 커진다. 또한 $Z_s = 0$ 일 때의 특성 주파수는 $Z_s = \infty$ 일 때의 2배이다. 같은 거리에 대해서는 반사계수가 1일 때 최소의 특성 주파수가 나타나고 반사계수가 -1일 때는 최대의 특성 주파수가 구해진다. 한편 전원 임피던스 Z_s 가 0에 가까워지고 사고거리가 25km보다 작아지면 특성 주파수가 Nyquist 주파수보다 커지게 되므로 단락용량이 큰 곳의 근접사고에 대응하기 위해서는 샘플 속도를 키워야 할 것이다.

그림 8은 반사계수 1일 때와 -1일 때 제안된 방법에 의해 사고거리를 추정된 결과이다. 25km 이상의 거리에서 두 경우 모두 매우 정확한 결과를 보이고 있다.

그림 9는 전원 임피던스 추정오차와 사고거리 표정 결과 사이의 관계를 보이고 있다. 그림에서 전원 임피던스 추정이 다소 부정확해도 거리추정 결과의 정확성은 크게 영향받지 않음을

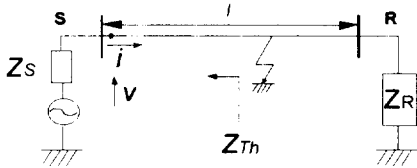


그림 6 사례 1의 모델 계통 (집중정수회로)
Fig. 6 Test network for case I (lumped parameter)

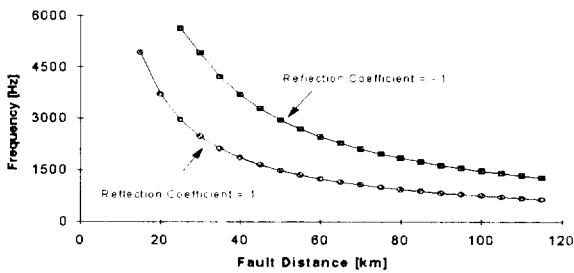


그림 7 고장 거리에 대한 특성 주파수
Fig. 7 Characteristic frequency vs. fault location

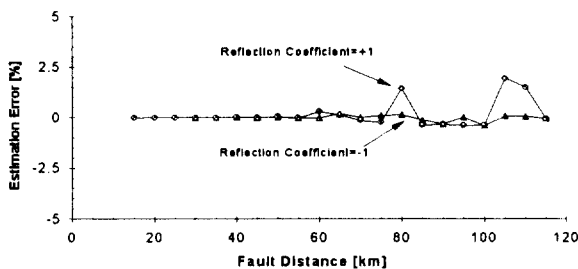


그림 8 각각의 고장 거리에 대한 추정된 고장거리
Fig. 8 Estimated fault distance

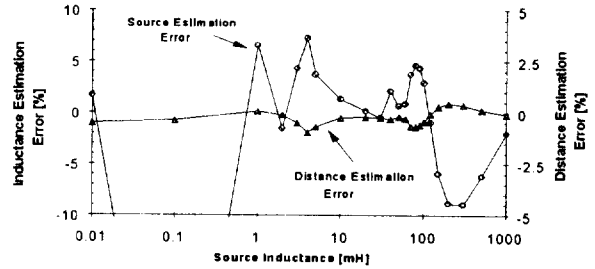


그림 9 전원 인덕턴스 추정 오차와 추정거리
Fig. 9 Estimated fault distance vs. estimation error of source inductance

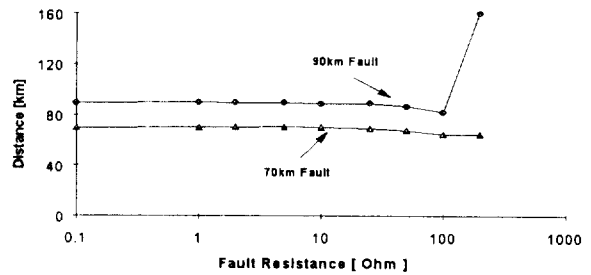


그림 10 고장저항에 따른 고장 거리 계산 결과
Fig. 10 Estimated fault location vs. fault resistance

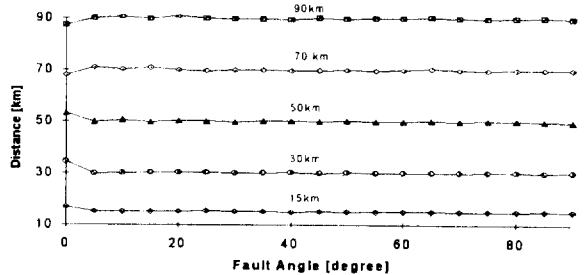


그림 11 고장 위상에 따른 고장 거리
Fig. 11 Estimated fault location vs. fault angle

알 수 있는데 이는 제안된 알고리즘이 전원 임피던스 추정오차에 강인함을 의미하는 것이다.

제시된 알고리즘이 사고지점의 고장저항이 송전선의 특성 임피던스보다 매우 작은 경우를 가정한 것이므로 고장저항이 거리표정 결과에 미치는 영향을 알아보았다. 그림 10이 그 결과인데 이로부터 50 Ω 정도의 고장저항까지는 고장 거리 계산에 영향을 거의 미치지 않으며 100 Ω 이상에서 오차가 커지게 된다. 기존의 거리표정 기법들이 10 Ω 정도의 고장저항 값에도 정확성이 크게 떨어졌음을 고려하면 제시된 방법이 고장저항에 매우 강인하다고 할 수 있다.

그림 11은 고장위상과 거리표정 결과와의 관계이다. 고장위상 0°부근에서 일어난 사고는 사고신호에 고주파 성분이 거의 없어 특성 주파수 성분 추정시 오차가 발생하게 되고 그에 따라 거리표정 결과도 영향을 받게 된다. 그러나 고장위상이 5° 이상이 되면 큰 오차를 보이지 않는다.

5.2 사례 2 : 송전선으로 전원이 연결된 경우

본 논문에서는 그림 12와 같이 계전기가 설치된 모선의 전원측에 분포정수 회로요소가 연결된 경우에 대해서도 모의실험을

수행하였는데 이는 계전기 단에 송전선과 같은 분포정수 회로 요소가 연결된 경우는 계전기단에서 반사되는 진행파의 왜곡이 심해 전원 임피던스의 추정이 보다 어려울 수 있다고 예상했기 때문이다. 그림 13이 제안된 방식에 의한 고장거리 표정 결과인데 예상한 바와 같이 사례 1의 경우 보다 상대적으로 오차가 커졌지만 여전히 작은 값이다.

그림 14는 고장위상에 따른 고장거리 표정 결과인데 사례 1에 비하여 고장위상이 작을 때 오차가 커져 고장위상 10° 미만에서는 결과의 신뢰도가 떨어지고 있음을 알 수 있다.

그림 15는 고장저항이 거리표정 결과에 미치는 영향을 나타낸 것으로 역시 50Ω 정도의 고장저항에 대해서는 표정결과에 큰 영향이 나타나지 않는다.

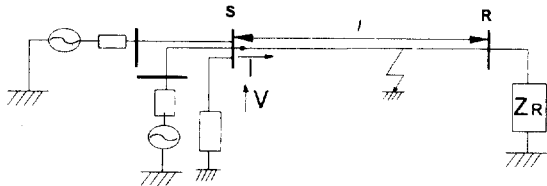


그림 12 사례 2의 모델 계통 (분포정수회로)
 Fig. 12 Test network for case II (distributed parameter)

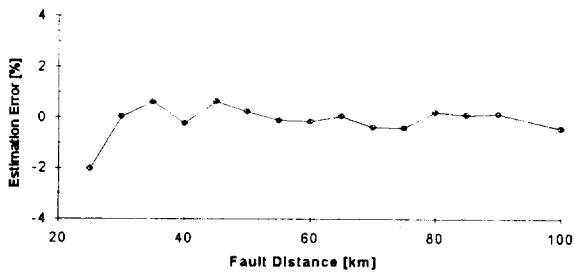


그림 13 거리별 고장 거리 추정 오차
 Fig. 13 Estimation error of fault distance

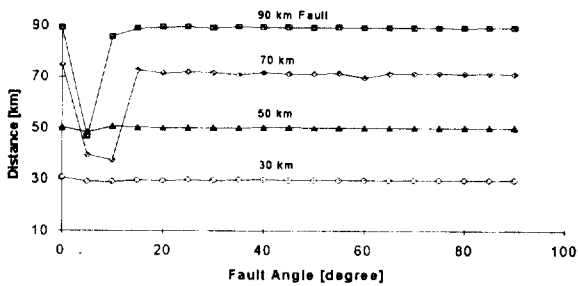


그림 14 고장 위상과 고장 거리 계산 결과
 Fig. 14 Estimated fault distance vs. fault angle

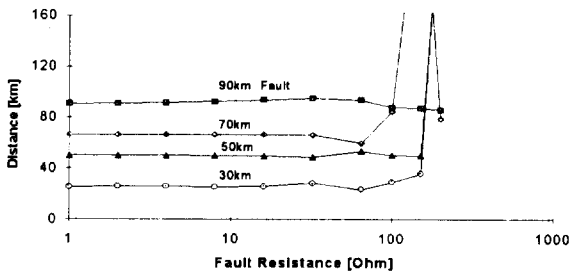


그림 15 고장 저항과 고장 거리
 Fig. 15 Estimated fault location vs. fault resistance

6. 결론

본 논문에서는 계전기단에서 관측한 사고후 전압전류 신호만을 이용해 빠르고 정확하게 고장점을 표정하는 새로운 방법을 제안한다. 이를 위해 본 논문에서는 사고가 발생한 계통의 특성을 계전기단이 아닌 고장점에서 바라본 구동점 임피던스 함수의 꼴로 표현하였다.

이 구동점 임피던스 함수는 전원 임피던스와 사고거리 그리고 특성 주파수의 식으로 표현된다. 여기에 프로니 해석법에 의해 특성 주파수를 구하고, 진행파의 전파특성을 이용해 전원 임피던스 값을 추정하면 특성 주파수에서의 구동점 임피던스를 사고거리만의 함수로 나타낼 수 있고, 이로부터 쉽고 직접적인 풀이를 통해 사고거리를 구할 수 있다. 제안된 방식의 장점은 시시각각 변하는 전원측의 임피던스를 고려할 수 있다는 점과 60 Hz에 비하여 아주 높은 값의 특성 주파수 성분을 이용하므로 선로의 리액턴스 값이 상대적으로 강조되어 고장저항 값의 변화에 아주 강한 결과를 기대할 수 있다는 점이다. 그리고 사고 이후 반주기 정도의 데이터만으로도 충분히 정확한 결과를 얻을 수 있으므로 기존의 방식들에 비하여 월등히 빠른 고속의 사고거리 표정기법이라 할 수 있다. 다양한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 방법의 타당성을 검토하였는데 기존의 방법들에 비하여 뛰어난 결과를 확인 할 수 있었다.

단, 본 고장점 표정기법이 진행파를 이용함에 따라 고장위상 0° 사고와 근접사고에 대한 단점은 그대로 가지므로 이에 대한 대책이 필요할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] T. Takagi, et al, "Development of a New Fault Locator Using the One-Terminal Voltage and Current Data," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 8, Aug. 1982, pp. 2829-2898.
- [2] L. Eriksson, M. Saha and G. D. Rockefeller, "An Accurate Fault Locator with Compensation for Apparent Reactance in the Fault Resistance Resulting from Remote-Ended Infeed", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-104, No. 2, Feb. 1985, pp. 424-436.
- [3] M. S. Sachdev and R. Agarwal, "A Technique for Estimating Transmission Line Fault Locations from Digital Impedance Measurements", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, No. 1, Jan. 1988, pp. 121-129.
- [4] D. J. Lawrence, L. Cabeza and L. Hochberg, "Development of an Advanced Transmission Line Fault Location System Part II - Algorithm Development and Simulation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No. 4, Oct. 1992, pp. 1972-1983.
- [5] A. A. Girgis, D. G. Hart and W. Perterson, "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.
- [6] D. Novosel, D. G. Hart, E. Urden and J. Garitty, "Unsynchronized Two-Terminal Fault Location Estimation", 95 IEEE PES Winter Meeting, Jan. 29 - Feb. 2, 1995, 95 WM 025-7 PWRD.
- [7] D. Novosel, D. G. Hart, E. Urden and M. M. Saha, "Fault Location Using Digital Relay Data", IEEE Computer

Applications in Power, Vol. 8, No. 3, July 1995, pp. 45 - 50.

[8] M. Vitins, "A Correlation Method for Transmission Line Protection", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct. 1977, pp. 1607-1617.

[9] P. A. Crossley and P. McLaren, "Distance Protection Based on Travelling Waves", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No. 9, Sep. 1983, pp. 2971-2983.

[10] C. Christopoulos, D. Thomas and A. Wright, "Scheme, Based on Travelling Waves, for the Protection of major Transmission Lines", IEE Proceedings, Part C, Vol. 136, Sept. 1989, pp. 279-288.

[11] O. Chaari, P. Bastard and M. Meunier, "Prony's Method: An Efficient Tool for the Analysis of Earth Fault Currents in Peterson-Coil-Protected Networks", IEEE PES Winter Meeting, Jan./Feb. 1995, 95 WM 031-5 PWRD.

[12] J. F. Hauer C. J. Demeure and L. L. Scharf, "Initial Results in Prony Analysis of Power system Response Signals", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 1, Feb. 1990, pp. 80-89.

[13] Junhee Hong, Jongkeun Park, "A Time-Domain Approach to Transmission Network Equivalents Via Prony Analysis for Electromagnetic Transients analysis", IEEE PES Winter Meeting, Jan./Feb. 1995, 95 WM 112-3 PWRD.

[14] 조경래, 정병태, 홍준희, 박종근, "송전선 보호를 위한 적분 근사 거리 계산 알고리즘의 최적 적분 계수 결정", 대한 전기 학회 논문지 제 44 권 제 2 호, pp. 153- 159, 1995년 2월.

[15] V. Oppenheim, A. S. Willsky and I. T. Young, "Signals and Systems", Prentice-Hall, pp. 219-225.

저 자 소 개



조 경 래 (趙慶來)

1967년 10월 4일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 효성중공업 책임연구원



강 용 철 (姜龍澈)

1964년 8월 2일생. 1991년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 서울대 대학원 전기공학과 박사과정 수료



홍 준 희 (洪俊熹)

1963년 3월 1일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 경원대학교 전기공학과 전임강사



박 종 근 (朴鍾根)

1952년 10월 21일생. 1973년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 서울대 공대 전기공학과 교수



김 성 수 (金成洙)

1964년 10월 15일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989 - 1994년 전기연구소 연구원. 현재 서울대 공대 전기공학과 박사과정