

고속 적응자동재폐로를 위한 사고거리추정 및 사고판별에 관한 개선된 양단자 수치해석 알고리즘

· 論 文
54A-11-3

An Improved Two-Terminal Numerical Algorithm of Fault Location Estimation and Arcing Fault Detection for Adaptive AutoReclosure

李 瓚 柱[†] · 金 鉉 烘^{*} · 朴 宗 培^{**} · 愼 重 麟^{***} · 조란 라도예비크[§]
(Chan-Joo Lee · Hyun-Houng Kim · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin · Zoran Radojevic)

Abstract - This paper presents a new two-terminal numerical algorithm for fault location estimation and for faults recognition using the synchronized phasor in time-domain. The proposed algorithm is also based on the synchronized voltage and current phasor measured from the assumed PMUs(Phasor Measurement Units) installed at both ends of the transmission lines. Also the arc voltage wave shape is modeled numerically on the basis of a great number of arc voltage records obtained by transient recorder. From the calculated arc voltage amplitude it can make a decision whether the fault is permanent or transient. In this paper the algorithm is given and estimated using DFT(Discrete Fourier Transform) and the LES(Least Error Squares Method). The algorithm uses a very short data window and enables fast fault detection and classification for real-time transmission line protection. To test the validity of the proposed algorithm, the Electro-Magnetic Transient Program(EMTP/ATP) is used.

Key Words : Fault Location, Fault Recognition, PMU, Arc, Time-Domain, Two-Terminal

1. 서 론

전력계통이 규모가 커지고 복잡화 되면서 선로 또는 기기 에 사고가 발생하였을 때, 그 사고의 파급효과는 전력계통 전체에 공급장치를 초래할 수 있을 뿐 만 아니라 엄청난 경제적 손실을 유발할 수 있다. 이러한 사고에 대응하여 보호계전기는 전기적 사고의 제거와 사고의 영향을 경감시켜서 전력계통의 안전운전을 유지하기 위한 장치로서 전력공급의 신뢰도 확보에 아주 중요한 역할을 해왔다. 특히 많은 전기사업자들이 신속한 사고복구 측면에서 보호계전시스템(Protective Relay System) 가운데 고속재폐로 방식을 송전선로의 보호시스템으로 채택해 왔다. 이러한 고속재폐로 방식은 선로에서 발생한 사고의 대부분이 낙뢰나 수목접지등과 같은 일시 사고이고 신속한 사고대응을 요구하기 때문에 선로사고에 성공적으로 사용되어 왔다. 그러나 사고 시 재폐로의 오부동작이 유발될 경우 그 사고의 파급효과는 전력설비 뿐 만 아니라 계통 전체에 치명적인 피해를 가져올 수 있다. 따라서 전력계통에서 발생하는 사고에 대해서 신속히 대응하고 동시에 정확히 사고를 식별하여 전력설비의 소손 방지와 계통안정유지에 기여할 수 있는 보호계전시스템의

알고리즘 개발이 무엇보다도 중요하다. 또한 송전선로 사고의 대부분이 아크를 동반하는 일시적 1선 지락 사고인 점을 고려하여 이에 관한 적응 자동재폐로(Adaptive Auto-Reclosure)의 효율적인 보호계전 알고리즘 개발이 시급하다.

과거 수년 동안 송전선로사고에 따른 재폐로기의 동작특무를 결정하는 기법과 아크의 동특성에 관한 연구가 보고되어 왔다. 특히 아크를 동반하는 사고의 경우 아크가 비선형적인 전압-전류 특성 뿐 만 아니라 아크에 작용하는 여러 가지 형태의 힘과 시간에 따라 길이가 가변되는 동특성을 지니기 때문에 실제 여러 가지 아크 특성을 고려하여 정식화하기가 어렵다. 따라서 많은 연구자들이 실험을 통해 수학적 아크모델을 제시하였고, 더불어 성공적인 재폐로 수행을 위한 많은 알고리즘을 제시하였다[1-6]. 송전선로 상에서 사고발생 시 고장점까지 거리를 계산하는 방법으로는 진행파를 이용하는 방법, 전파방정식을 이용하는 방법, 그리고 전압과 전류의 기본파 성분을 사용한 임피던스 방법 등으로 구분 할 수 있으며, 세부적으로 기본파 성분을 이용하는 방법의 적용에 있어서 일단 정보를 이용하는 것과 양단 정보를 이용하는 방법으로 구분된다. 대부분의 사고거리 추정 알고리즘은 선로의 한 단자에서 측정된 전압과 전류를 이용하여 왔다. 하지만 선로의 한 단자로부터 얻은 데이터만을 이용하는 경우 사고거리 추정에 따른 근본적인 가정이 요구될 뿐더러 전압-전류 페이저 추정 불가피 하기 때문에 정확한 사고거리추정과 신속한 사고 판별을 요하는 사고보호시스템의 알고리즘으로는 충분하지 못하다. 최근 고도의 기술 발달은 산업전반에 걸쳐 많은 문제점을 해결할 수 있도록 해주었고 전력계통분야에서도 많은 부분 활용되고 있다. 특히 전력시스템의 경우 상태벡터에 해당하는 모션전압의 크기는 계량설비를 통해 직접 계량할 수 있으나, 위상각의 경

[†] 교신저자, 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 博士課程

E-mail : jubily@konkuk.ac.kr

^{*} 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 碩士課程

^{**} 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 助教授 · 工博

^{***} 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 副教授 · 工博

[§] 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 2005年 8月 19日

最終完了 : 2005年 10月 10日

우 직접 계량할 실효성 있는 수단이 없었다. 하지만 고정밀 GPS(Global Positioning System) 시각정보를 활용함으로써 근본적인 해결이 가능하게 되었으며, 현재 모션의 상태벡터를 동시에 측정하는 계량설비가 PMU이다[9-10]. PMU는 고정밀 시각동기를 통해 전력계통의 상태를 감시하는데 유용하게 사용되고 있다.

본 논문에서는 이러한 동기기술을 이용하여 사고 동안 양단자에서 측정되는 왜곡된 전압과 전류의 파형을 새로운 수치 해석적 알고리즘에 적용하여 사고 위치와 재폐로기의 동작책무를 결정하는 알고리즘을 제시한다. 전력계통의 안정도와 신뢰도 측면에서 신속한 사고복구와 정확한 사고 판별 및 사고거리추정에 관한 알고리즘 개발은 무엇보다도 중요하며 본 논문에서는 시간영역에서 이를 해석하였다. 또한 송전선로의 사고 유형 가운데 가장 빈번한 1선 지락사고를 중심으로 알고리즘을 유도하였으며, 사고 시 발생하는 비선형 아크특성을 실제 아크 전압-전류 특성을 바탕으로 푸리에 시리즈(Fourier Series)를 이용하여 수치적으로 정의하였다. 또한 시각 동기화된 양단자의 전압, 전류를 이용하여 보다 정확한 사고거리 추정과 아크 사고전압을 계산하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 1 단자를 이용한 기존의 사고추정 알고리즘에 비해 매우 정확하고 신속한 사고거리를 추정이 가능하며, 이는 실시간 재폐로기의 동작책무를 결정하는데 유용하게 사용될 수 있다. 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP/APT를 통해 모의 수행하였다. 또한 왜곡된 전압과 전류 파형을 DFT를 사용하여 처리하였으며, 알고리즘의 타당성을 판별하기 위하여 MATLAB을 사용하여 사례연구 결과를 비교분석 하였다.

2. 사고 모델링

2.1 시각 동기 페이지 측정 기술

전력시스템에서 계량된 물리량을 비교 검토하기 위해서 요구되는 정밀도는 $1[\mu s]$ 이상으로 규정하고 있다[11]. 이러한 정밀도를 실현할 수 있는 가장 경제적인 대안으로 고려될 만한 시스템이 GPS이다. GPS 시스템은 단방향(one-way) 위성항법시스템으로 위성들에서 전파된 특수한 형태의 전파 신호를 수신하여 자신의 위치정보와 시각정보를 제공받을 수 있는 시스템이다. 전력시스템에는 전력상태 벡터를 감시할 수 있는 시각정보가 요구되는 분야에서 다양하게 활용되고 있다. 데이터 추출에 있어서 시점문제는 GPS 시각정보를 활용함으로써 근본적인 해결이 가능해졌고, GPS수신기에서 1 PPS신호($\pm 1\mu s$ 시각 동기편차)를 전력시스템의 기준 시각으로 사용함으로써 전력시스템의 어느 지점에서나 동일한 기준 시각정보를 취득할 수 있다. 즉, 높은 측정시각 정밀도를 유지하면서 모션전압크기와 위상각(모션 상태벡터)을 동시에 측정하는 계량설비가 PMU이다. PMU는 GPS와의 동기를 이루어 측정된 물리량은 개별적인 시각표시를 가지고 저장된다[12-14]. 그림 1은 GPS 기반의 전력계통의 PMU 활용의 개략도이다.

그림 1에서처럼 PMU는 시설된 모션의 전압파형과 연결선로의 모든 전류 파형을 계기용 변성기 통해 입력받고,

GPS의 시각기준 신호에 동기하여 입력 파형을 샘플링한 후 전압 파형의 페이지와 모든 전류 파형의 페이지를 고속으로 계산하는 계측 설비이다. 계통에 시설된 모든 PMU는 GPS의 시각기준 신호에 동기되므로 원거리에서 계량된 계량된 물리량의 비교분석이 가능해진다. 본 논문에서는 GPS의 시각기준 신호에 동기하여 PMU에서 측정된 전압과 전류 페이지를 알고리즘의 입력요소로 이용한다. PMU에서 측정된 시각 동기 전압과 전류 페이지는 EMTP/APT를 이용하여 취득하였다.

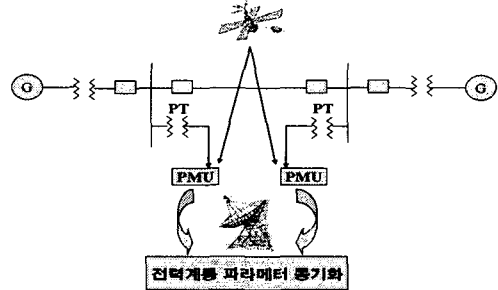


그림 1 GPS 기반의 PMU를 활용한 동기 구성도

Fig. 1 System diagram based on PMU

2.2 아크 특성

대기 중 전기 아크는 플라즈마(plasma) 방전현상과 비선형 특성을 갖는다. 또한 송전선로에서 발생하는 아크사고의 특성은 송전선로의 양단에 전송되는 전압과 전류 파형의 심한 왜곡을 유발하고 낮은 전압과 높은 전류를 발생하며, 전류가 증가함에 따라 아크 양단의 전압이 감소하는 특징을 갖는다[15,16]. 아크사고에 의한 전력계통의 과도현상을 실제적으로 컴퓨터 디지털 시뮬레이션을 하기 위해서는 아크사고의 동특성이 고려되어야 하지만 아크의 램덤한 비선형 동특성 성질 때문에 컴퓨터 시뮬레이션으로 실제 여러 가지 아크 특성을 만들어 내기는 힘들다. 많은 연구자들이 실험을 통해 얻은 자료를 이용하여 아크특성을 모델링하였고 동적인 특성을 표현하기 위한 수학적 아크모델에 대해 연구를 해왔다. 가장 고전적인 모델로는 Ayrton 방정식이 있고, 그 후 Cassie와 Mayr의 모델을 거쳐 Browne이 아크모델을 종합하였다[4].

본 논문에서는 샘플링 주파수 10.417 kHz를 가진 과도현상 기록장치(transient recorder)를 통해 얻은 아크특성을 기반으로 아크전압 파형을 수치적으로 정의하였다.

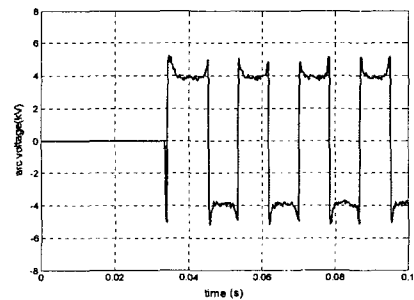


그림 2 아크전압의 파형

Fig. 2 Waveform of arc voltage

실험을 통해 얻은 아크의 특성은 전압과 전류가 동상을 갖고, 아크전압이 구형파에 가까운 모형을 갖는다. 본 논문에서는 이를 기반으로 그림 2와 같이 구형파에 가까운 아크 전압을 이용하여 아크전압 모델링에 수치적 접근자료로 활용하였다.

그림 2의 아크 전압은 오직 홀수파만을 포함하는 푸리에 시리즈로 표현할 수 있다.

$$v_a(t) = \sum_{h=1}^{\infty} v_{ah}(t) = \sum_{h=1}^{\infty} k_h V_a \sin(h\omega t) \quad (1)$$

여기서, $h=1,3,5,7,\dots$ 고조파 성분, $v_{ah}(t)$ 는 h 차 고조파의 아크전압, ω 는 기본 라디안 주파수, k_h 는 h 차 고조파의 계수이다. k_h 는 DFT 알고리즘을 사용하여 계산 할 수 있다. 표 1은 k_h 의 계수를 나타내고 있다.

표 1 h 차 고조파의 아크전압의 계수
Table 1 Coefficients of the h -th harmonics of the arc voltage

h	1	3	5	7
k_h	1.23	0.393	0.213	0.135

3. 사고거리 추정 및 아크전압 크기 계산 알고리즘

송전선로에 발생하는 사고의 종류로는 1선 지락사고, 2선 지락사고, 선간단락사고, 3상사고, 고저항 지락사고 등을 들 수 있다. 이 가운데 1선 지락사고가 선로사고의 70~90%를 차지하고 있으며 일시사고(transient fault)에 해당한다[16]. 송전선로에 발생하는 가장 빈번한 1선 지락사고에 대한 재폐로의 성공여부는 매우 중요하며, 성공적인 재폐로 투입여부에 대한 정확한 사고검출 및 사고거리추정 알고리즘의 개발이 시급하다. 더욱이 신속한 사고처리를 위한 실시간 사고처리 알고리즘이 중요하다. 따라서 본 논문에서는 송전선로 상에서 발생하는 가장 빈번한 1선 아크지락사고를 알고리즘 개발의 대상 사고로 가정하고 양단에서 동기된 전압과 전류 페이지를 이용하여 시간영역에서 이를 유도하였다. 그림 3은 3상 송전선로에서 발생한 a-상 아크지락사고를 나타낸다.

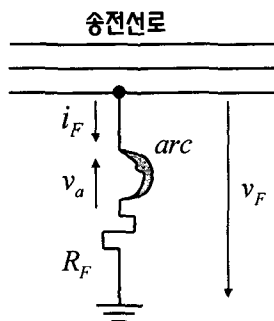


그림 3 사고 모델
Fig. 3 Fault model

그림 3에서 볼 수 있듯이 사고 상전압 v_F 는 정식 (2)와 같이 회로방정식을 이용하여 표현할 수 있다.

$$v_F(t) = v_a(t) + R_F i_F(t) \quad (2)$$

여기서,

$v_a(t)$: 아크 전압, R_F : 사고 저항, $i_F(t)$: 사고 전류

본 논문에서 제시하는 동기 기술을 이용한 새로운 고장거리 및 재폐로의 동작책무를 판별하는 알고리즘은 다음과 같은 가정을 한다.

- 사고 유형 : a-상의 아크지락사고
- 선로 길이 : 단거리 선로 (선로의 캐패시턴스 무시)

그림 4는 3상 송전선로의 단상 아크지락 사고를 나타내고 있다.

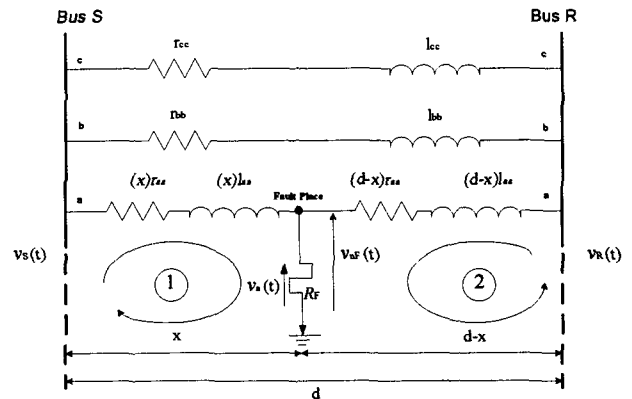


그림 4 3상송전선로 내에 발생한 단상 아크지락사고
Fig. 4 single-phase to ground fault on the transmission line

여기서, v_S 과 v_R 는 각각 송전단측과 수신단측 모선의 전압이고 x 는 사고 거리, d 는 총 선로의 길이를 나타낸다.

그림 4에 볼 수 있듯이 사고 상의 전압은 루프 방정식을 이용하여 정식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{nF} = v_{nS}(t) - x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} \quad (3)$$

$$v_{nF} = v_{nR}(t) - (d-x) \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (4)$$

여기서,

$n = a, b, c$ (상), $f = a, b, c$ (상)

v_{nS} : 송전단 전압, v_{nR} : 수신단 전압, v_{nF} : 사고 전압

$r_{aa}, r_{bb}, r_{cc}, l_{aa}, l_{bb}, l_{cc}$: 자기(Self) 저항/ 자기 인덕턴스

$r_{ab}, r_{bc}, r_{ca}, l_{ab}, l_{bc}, l_{ca}$: 상호(Mutual) 저항/상호 인덕턴스

정식 (3)과 정식 (4)는 정식 (5) 와 같이 전개 할 수 있다.

$$v_{nS}(t) - x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} = v_{nR}(t) - (d-x) \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} \quad (5)$$

정식 (5)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$v_{nS}(t) - v_{nR}(t) - d \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pR}(t) + l_{np} \frac{di_{pR}(t)}{dt} \right\} - x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} (i_{pS}(t) + i_{pR}(t)) + l_{np} \frac{d(i_{pS}(t) + i_{pR}(t))}{dt} \right\} = 0 \quad (6)$$

정식 (6)에서 전류의 변화량은 시간영역내에서 정식 (7)과 같이 풀이가 가능하다.

$$\frac{di}{dt} = \frac{i(k) - i(k-1)}{\Delta t} \quad (7)$$

여기서, $i(k)$: k -번째 샘플링의 순시 전류값
 Δt : 샘플링 간격(Sampling Interval)

본 논문에서는 양단에서 측정된 전압-전류 위상페이저를 처리할 때 one-window 방식을 사용하여 샘플링 처리하였다. 한 주기 파형을 일정한 간격으로 샘플링하여 데이터를 윈도우가 움직이면서 추가되는 샘플과 삭제되는 샘플사이의 차이에 의해 새로운 페이저는 이전의 페이저 데이터를 수정함으로써 페이저가 샘플링 각으로 위상천이하지 않도록 하였다.

정식 (6)에 정식 (7)을 대입하면 사고거리 x 을 기준으로 정식 (8)과 같이 정리 할 수 있다.

$$A_n(k) - xB_n(k) = 0 \quad (8)$$

여기서,

$$A_n(k) = v_{nS}(k) - v_{nR}(k) - d \sum_{p=a,b,c} \left[\left(r_{np} + l_{np} \frac{1}{\Delta t} \right) i_{pR}(k) - l_{np} \frac{1}{\Delta t} i_{pR}(k-1) \right] \quad (9)$$

$$- \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k-1) + i_{pR}(k-1)) \quad (10)$$

$A_n(k), B_n(k), n=a, b, c, k=1, 2, \dots, N$

$v_{nS}(k), v_{nR}(k)$: k -번째 샘플링의 각상의 순시 전압값 ($n=a, b, c$)
 $i_{nS}(k), i_{nR}(k)$: k -번째 샘플링의 각 상의 순시 전류값 ($n=a, b, c$)
 N : 총 샘플링의 개수
 ΔT : 샘플링의 간격

정식 (8)을 이용하여 사고거리 (x)는 다음과 같이 계산 될 수 있다.

$$x = \frac{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N A_n(k)}{\sum_{n=a,b,c} \sum_{k=1}^N B_n(k)} \quad (11)$$

사고거리의 정식 (11)을 이용하여 계산 할 수 있다. 본 논문에서 사고거리 추정 알고리즘뿐만 아니라 사고 판별에 관한 알고리즘을 아크사고 모델 식을 이용하여 유도 하였다. 송전단을 기준으로 아크사고를 가진 송전단 전압은 정식 (12)와 같다.

$$v_{nS}(t) = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(t) + l_{np} \frac{di_{pS}(t)}{dt} \right\} + v_{nR} \quad (12)$$

그림 2에서 볼 수 있듯이 왜곡된 아크전압의 형태는 근사적인 구형파의 형태를 갖는다. 아크전압과 아크전류를 동상인 순수한 구형파의 형태로 가정하면, 정식 (2)에서 표현된 아크전압을 정식 (13)과 같은 수학적인 형태로 표현할 수 있다[9].

$$v_a = V_a \operatorname{sgn}[i(t)] + \xi(t) \quad (13)$$

여기서, ξ : 가우시안 노이즈, sgn : 시그넘 함수

정식 (2) 와 정식 (13)이 이용하여 아크전압을 표현하면 정식 (14)과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{nR} = V_a \operatorname{sgn}[i_F(t)] + R_F i_F(t) + \xi(t) + V_a \operatorname{sgn}[i(k) - i_L(k)] + R_F (i(k) - i_L(k)) + \xi_k \quad (14)$$

여기서, 사고전류는 키르히호프 제 1법칙을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_F = i - i_L \quad (15)$$

정식 (15)을 정식 (14)에 대입하면 정식 (16)과 같이 표현 할 수 있다.

$$v_{nR}(k) = V_a \operatorname{sgn}[i(k) - i_L(k)] + R_F (i(k) - i_L(k)) + \xi_k \quad (16)$$

정식 (16)을 정식 (12)에 대입하면 정식 (17)과 같이 정리 할 수 있다.

$$v_{nS}(k) = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{np} i_{pS}(k) + \frac{l_{np}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\} \quad (17)$$

사고 거리는 정식 (11)을 통하여 이미 계산되었기 때문에 정식 (17)을 미지의 변수에 대하여 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_k = a_{\#} V_a + a_{\#} R_F + b_k + \xi_k \quad (18)$$

여기서, $a_{\#} = \operatorname{sgn}[i(k) - i_L(k)]$

$$a_{k2} = \{i(k) - i_L(k)\}$$

$$b_k = x \sum_{p=a,b,c} \left\{ r_{mp} i_{pS}(k) + \frac{L_{mp}}{\Delta t} (i_{pS}(k) - i_{pS}(k-1)) \right\}$$

정식 (18)은 N개의 샘플링을 위한 행렬 방정식의 형태로 표현하면 정식 (19)과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{1s} \\ \vdots \\ v_{ks} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ \vdots & \vdots \\ a_{k1} & a_{k2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ R_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \xi_{1s} \\ \vdots \\ \xi_{ks} \end{bmatrix} \quad (19)$$

정식 (19)에서 가우시안 노이즈항을 무시하고 행렬형태로 정식화하면 정식 (20)과 같이 간단히 정리할 수 있다.

$$V = A \cdot X + B \quad (20)$$

여기서, V : $N \times 1$ 행렬, A : $N \times 2$ 행렬,
 X : 2×1 행렬, B : $N \times 1$ 행렬.

정식 (20)을 풀이하기 위하여 최소 자승법(Least Error Square Method)을 사용하여 풀이하면 정식 (21)과 같다.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T (V - B) \quad (21)$$

아크전압을 계산한 후 아크를 가진 사고인지(일시 사고) 아니면 아크가 없는 사고(영구사고) 인지를 결정 할 수 있다. 만약 계산된 아크전압의 크기가 아크전압의 그라디언트(voltage gradient)와 아크길이의 곱보다 크다면 과도사고이다. 여기서 아크 길이는 애자의 역섬락 길이보다 크거나 같다. 평균 아크전압의 그라디언트는 12~15 V/cm 이다[11].

4. 사례연구

본 논문에 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP(Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 사고를 모의하였다. 그림 5에서 보듯이 테스트를 위한 모의 전력시스템은 400 kV급 시스템이며, 송전선로의 캐패시터 값은 무시한다. $v(t)$, $i(t)$ 는 양단자의 전압과 전류는 나타낸다. 송전 선로의 변수는 일정한 값으로 정의하며, $d=100[km]$, $r=0.0325 \Omega/km$, $x=0.03 \Omega/km$, $r_0=0.0975 \Omega/km$, $x_0=0.9 \Omega/km$ 이다. Network A의 데이터는 $R_A=1 \Omega$, $L_A=0.064 H$, $R_{A0}=2 \Omega$, $L_{A0}=0.128 H$ Network B의 데이터는 $R_B=0.5 \Omega$, $L_B=0.032 H$, $R_{B0}=1 \Omega$, $L_{B0}=0.064 H$ Network A, B의 기전력은 $E_A=400 kV$, $E_B=395 kV$. 전력시스템의 샘플링 주파수는 $f_s=3840 Hz$ (64 sample/T).

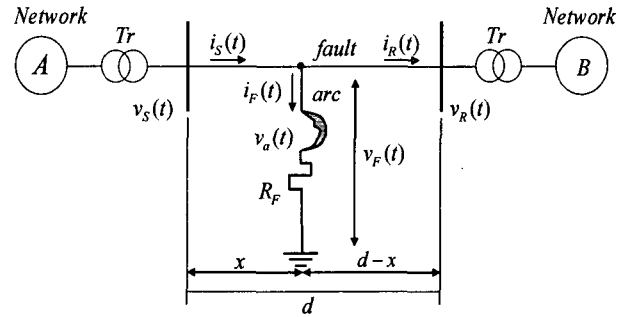


그림 5 모의 테스트 시스템
 Fig. 5 Test power system

고장발생 위치는 Network A의 각 10, 20, 30, 80km 지점에서 발생했다고 가정한다. 알고리즘의 타당성을 측정하기 위하여 MATLAB을 사용하여 모의 테스트 하였다. 그림 6-9는 3상 송전선로에서 a-상에 고장이 발생 시 각 양단에서 측정된 전압과 전류의 변화량을 나타내고 있다.

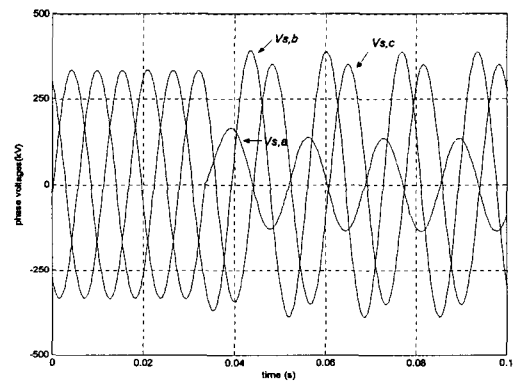


그림 6 Bus S의 끝단에서 측정된 사고 상 전압
 Fig. 6 Distorted input voltages generated by EMTP

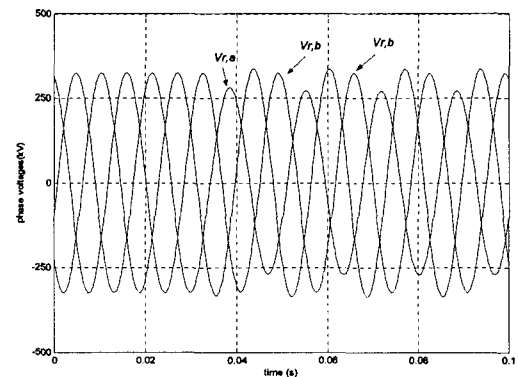


그림 7 Bus R의 끝단에서 측정된 사고 상 전압
 Fig. 7 Distorted input voltages generated by EMTP

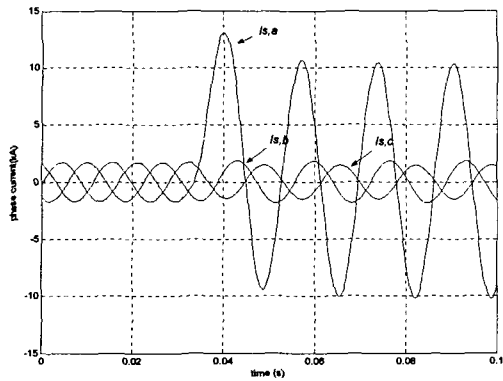


그림 8 Bus S의 끝단에서 측정 한 사고 상전류
Fig. 8 Distorted input currents generated by EMTF

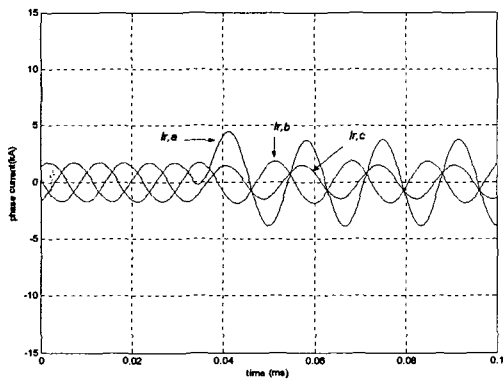


그림 9 Bus R의 끝단에서 측정 한 사고 상전류
Fig. 9 Distorted input currents generated by EMTF

그림 10은 아크 전류와 아크전압의 크기가 $v_a=4.5$ [kV] 나타내고 있다. 또한 아크전압의 모양이 거의 구형파에 가까우며 아크전압과 아크전류가 동상임을 확인할 수 있다. 사고 개시 시간은 33 [ms]이며 사고 저항은 $R_F=8$ [Ω]이다.

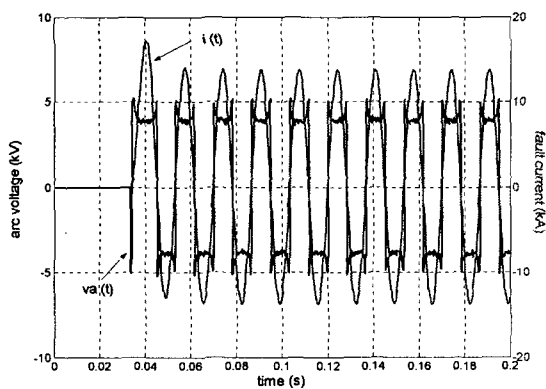


그림 10 아크전압의 크기와 고장 전류
Fig. 10 Real arc voltage and current waveform

표 2는 양 단자에서 측정 한 전압과 전류를 이용하여 본

논문에서 제시한 알고리즘으로 해석한 결과를 나타낸다. 표에서 보듯이 EMTF에서 가정한 사고거리와 아크전압의 크기가 일치하는 것을 확인할 수 있다.

표 2 알고리즘을 통해 해석된 결과

Table 2 Result data calculated by proposed algorithm

EMTP		제시한 알고리즘	
사고거리[km]	아크전압 [kV]	사고 추정거리[km]	아크전압 [kV]
10	4.5	10	4.49
20	4.5	20.01	4.51
30	4.5	30.05	4.51
80	4.5	80.1	4.51

그림 11-14에서 볼 수 있듯이 각각의 사고 지점에서 0.07 s만에 수렴하고 있음을 알 수가 있다. 모의 테스트 결과를 통해 본 논문에서 제시하고 있는 알고리즘의 타당성을 증명하였다.

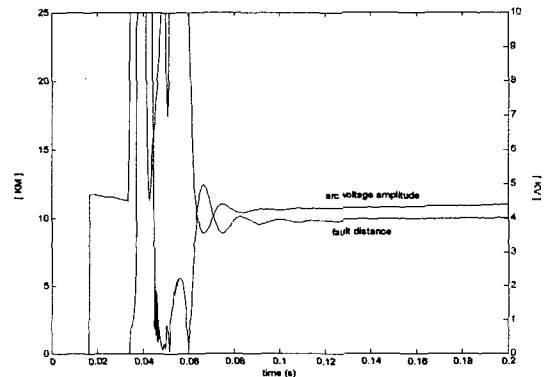


그림 11 아크전압과 사고 거리(10km) 판별 결과
Fig. 11 Calculated arc voltage amplitude and fault distance

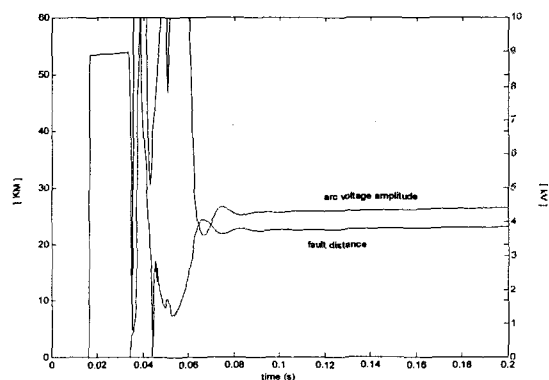


그림 12 아크전압과 사고 거리(20km) 판별 결과
Fig. 12 Calculated arc voltage amplitude and fault distance

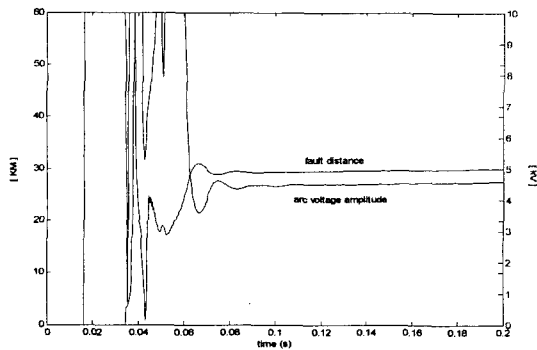


그림 13 아크전압과 사고 거리(30km) 판별 결과
 Fig. 13 Calculated arc voltage amplitude and fault distance

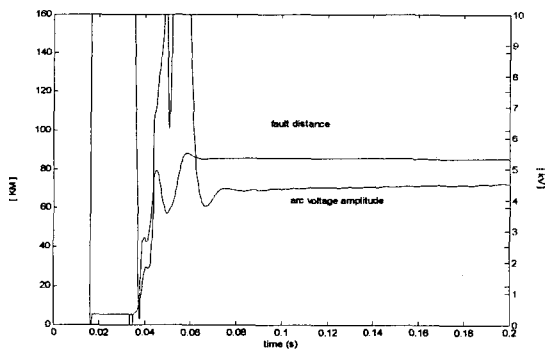


그림 14 아크전압과 사고 거리(80km) 판별 결과
 Fig. 14 Calculated arc voltage amplitude and fault distance

양 단자에서 동기화된 데이터를 이용한 알고리즘은 한 단자에서 데이터를 취득하여 사고거리를 판별하는 알고리즘에 비해 오차율이 적다. 이는 송전단을 기준으로 사고거리가 멀어질수록 한 단자에서 취득되는 데이터가 시간적인 오차를 계속적으로 증가시키기 때문이다. 그림 15는 양 단자에서 데이터를 취득하는 알고리즘과 한 단자에 데이터를 취득하는 알고리즘간의 오차율을 비교한 것이다. 두 알고리즘은 동일 조건(아크전압 $v_a=4.5[kV]$, 아크저항 $R_F=8[\Omega]$, 사고 개시시간 $33[ms]$)하에 EMTP를 이용하여 입력 데이터를 취득하였다[18].

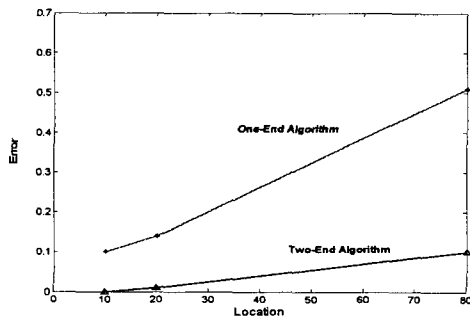


그림 15 동기화 및 비동기 페이저에 대한 사고거리추정 오차율
 Fig. 15 Error of fault location estimation using sync. and unsynchronized data

그림 15에서 볼 수 있듯이 한 단자를 통해 데이터를 취득하는 방법은 사고 거리가 멀어질수록 오차율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 시간의 동기화가 사고거리를 판단함에 있어 중요한 역할을 하는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 시간 영역 내에서 양 단자를 통해 동기화된 데이터를 기준으로 재폐로기의 동작책무를 결정하고 사고의 위치를 판별하는 새로운 수치 알고리즘을 제시하였다. 새로운 알고리즘을 제시하기 위하여 송전선로의 양단에서 PMU로부터 측정된 동기 데이터를 가정하였으며, 이를 이용하여 알고리즘의 입력데이터로 사용하였다. DFT 알고리즘을 사용하여 획득한 데이터를 분석하였으며, 사고 시 발생하는 비선형 아크특성을 실제 아크 전압-전류 특성을 바탕으로 퓨리에 시리즈를 이용하여 수치적으로 정의 하였다. 양 단자에서 측정된 왜곡된 전압, 전류파형을 본 논문에서 제시한 알고리즘에 적용하여 재폐로기의 동작책무와 사고 거리를 평가하였다. 양 단자에서 데이터를 취급하는 알고리즘과 한 단자에서 데이터를 취급하는 알고리즘을 비교하여 시간 동기가 사고거리를 판단함에 있어 중요한 부분임을 증명하였다. 그러나 양 단자를 이용하는 기술은 한 단자에 비해 전력계통 설비의 확충을 의미한다. 결국 전력계통 설비가 확립되어 있지 않으면 한 단자와 비슷한 형태로 사고 거리 추정 오차율이 증가 할 것으로 예상된다. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 판단하기 위해서 사고의 모의는 EMTP를 사용하였으며, 알고리즘의 타당성은 MATLAB을 사용하여 증명하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘을 통해 사고거리 및 사고 유형을 빠른 시간내에 평가함으로써 송전선로의 빠른 복구와 적응 재폐로기의 동작책무를 사고와 동시에 실시간으로 결정할 수 있을 거라 판단된다.

감사의 글

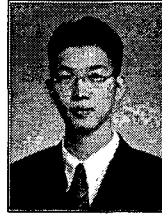
이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

참고 문헌

- [1] Ge. Y, Sui. F, Xiao. Y, "Prediction methods for preventing single-phase reclosing on permanent fault" ,IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 4, No. 1, pp. 114-121, 1989.
- [2] M. B. Djuric, V.V. Terzija, " A New Approach to the Arcing Faults Detection for Autoreclosure in Transmission Systems", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, No. 4, pp. 1793-1798, 1995.
- [3] Ruben D. Garzon, "High Voltage Circuit Breakers", Marcel Dekker Inc., pp. 2-18, 1997.
- [4] A.T. Johns, R.K. Aggarwal, Y.H. Song, "Improved Techniques for Modeling Fault Arcs on Faulted

- EHV Transmission Systems", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 141, No. 2, pp. 148-154, March 1994.
- [5] A.P. Strom, "Long 60-Cycle Arcs in Air", AIEE Trans. Vol. 65, pp. 113-117, 1946.
- [6] B. Hofmann-Wellenhof, et al., "Global Positioning System : Theory and Practice", Springer-Verlag, New York, 1992.
- [7] David Wells, "Guide to GPS Positioning". Ganadian GPS Associates, 1986.
- [8] 신중린, 조기선, "GPS와 전력시스템", 제51권, 제3호, pp. 20-30, 2002.
- [9] Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection/Location Techique for Transmission Line with Consideration of Arcing Fault Discrimination-Part I:Theory and Algorithms", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, pp. 1587-1593, Oct. 2004.
- [10] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Standard 1344-1995, 1344-1995 (R2001), December 1995.
- [11] Ying-Hong Lin, Chih-Wen Liu, Ching-Shan Chen, "A New PMU-Based Fault Detection/Location Techique for Transmission Line with Consideration of Arcing Fault Discrimination-Part II:Performance Evaluation", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 19, No. 4, pp.1594-1601, Oct. 2004.
- [12] M.B. Djuric, Z.M. Radojeic, V.V. Terzija, "Numerical Algorithm for Arcing Faults Detection and Fault Distance Calculation on overhead line", Electric Machines and Power System, pp. 939-953. 1977.
- [13] M. B. Djuric, Z.M. Radojevic, V.V. Terzija, "Arcing Faults Detection on Transmission Lines using Least square Technique", ETEP, Vol. 8, No. 6, pp. 437-443, Nov/Dec 1998.
- [14] Zoran Radojevic, Joong-Rin Shin, "A New one-Terminal Numerical Algorithm for Adaptive Autoreclosure and Fault Distance Calculation", Tran KIEE, Vol.53A, No. 8, Aug. 2004, pp438-445
- [15] A. Maikapar, "Extinction of an Open Electric Arc", Elektrichestvo, Vol. 4, pp. 64-69, 1960.
- [16] Z.M. Radojevic, C.J. Lee, J.R. Shin, J.B. Park, "Numerical Algorithm for Fault Distance Calculation and Blocking Unsuccessful Reclosing onto Permanent Faults", IEEE PES Gen., June 2005. Monte Carlo Approach for Power Estimation," IEEE Trans. on VLSI systems, vol. 1, No. 1, pp.63-71, March 1993.

저 자 소 개



이 찬 주(李瓚柱)

1974년 12월 15일생. 2000년 안양대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

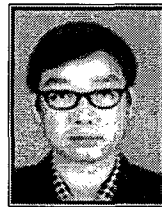
Tel.: 02-458-4778 , Fex : 02-444-1418
E-mail : jubily@konkuk.ac.kr



김 현 홍(金鉉烘)

1977년 12월 28일생. 2004년 전주대 공대 전기공학과 졸업. 현재 건국대 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel.: 02-458-4778 , Fax : 02-444-1418
E-mail : hhblue@konkuk.ac.kr



박 종 배(朴宗培)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel.: 02-450-3483, Fax : 02-444-1418
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



신 중 린(慎重麟)

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel.: 02-450-3487, Fax : 02-444-1418
E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr



조란 라도예빅 (Zoran Radojevic)

He received B.S.,M.S. and Ph.D. degrees in Electrical Engineering from the University of Belgrade. Currently, he is an Associate Professor in the Electrical Engineering Department at Konkuk University, Korea.

Tel : 02-450-3752, Fax : 02-444-1418
E-mail : zoran@konkuk.ac.kr