

동기 페이저 정보를 이용한 개선된 사고거리추정 기법

이찬주 · 김현홍 · 박종배 · 신종린 · 조란 라도예빅  
 건국대학교 전기공학과

An Improved Technique For The Fault Location Estimation Using Synchronized Phasors

Chan-Joo Lee · Hyun-Houng Kim · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin · Zoran Radojevic  
 Dept. of Electrical Eng., Konkuk Univ.

**Abstract** - This paper presents an improved two-terminal technique for fault location estimation. The proposed algorithm is also based on the synchronized phasors measured from the synchronized PMUs installed at two-terminals of the transmission lines. Also the arc voltage wave shape is modeled numerically on the basis of a great number of arc voltage records. Also, the two-terminal fault algorithm for the long line model is derived in the spectral domain.

용하여 수치적으로 정의하였으며, 단상 아크지락 사고를 스펙트럼 영역에서 유도하였다. 또한 장거리 선로모델에 대한 사고거리추정 알고리즘은 캐패시턴스를 고려하여  $\Pi$  모델링하여 유도하였다. 본 논문에서 제시한 알고리즘의 타당성을 검증하기 위해 EMTP/ATP를 이용하여 모의 수행하였다.

1. 서 론

2. 사고거리추정 알고리즘

우리나라의 전력산업은 효율향상을 재고측면에서 구조 개편을 단행하였으며, 이에 따라 전력산업은 과거 한전의 수직 통합적 독점구조에서 각 부문별 기능 분할 및 경쟁 도입을 시행하였다. 현재 발전회사간 경쟁을 도입하기 위해 발전부문을 6개의 자회사로 분리하였으며 전력 거래를 위한 한국전력거래소(KPX)를 발족하여 발전회사가 경쟁적으로 전력을 판매하는 발전경쟁시장이 운용되고 있다. 이러한 구조개편은 과거 독점인 전력산업에 경쟁을 도입함으로써 산업의 효율성 재고와 장기적으로 저렴하고 안정적인 전력공급을 지속적으로 보장하여 전력사용에 있어서 소비자의 선택권을 보장하여 소비자의 권익을 증진하고자 하는데 그 주된 목적이 있다. 이러한 독점시장에서 경쟁시장으로 변화하는 과정에서 최근에 발생한 미국, 캐나다 등 외국의 광역정전 상황을 통해 광역 정전으로 인한 피해정도가 매우 심각하여 전력의 안정적 공급에 대한 중요성이 새롭게 부각되고 있다. 특히 지속적이고 안정적인 전력공급서비스는 경쟁적 전력시장 하에서 시장참여자의 이익과 직결되는 중요한 요소로 부각되고 있다. 따라서 전력서비스 품질 향상과 안정적인 전력계통을 유지하기 위한 효율적인 사고대응 방안이 요구된다.

2.1 단거리 선로 사고거리추정 알고리즘 [3]

단거리 선로는 일반적으로 선로의 길이가 80km 이하의 선로에 대해서 적용하고 선로모델은 캐패시턴스를 무시한 집중정수회로를 이용하여 선로모델링을 한다. 본 절에서 제시하는 단상 아크지락사고에 대한 단거리 선로의 사고거리 추정 알고리즘은 그림 1로부터 사고상의 단상 등가회로를 이용하여 유도하면 다음 식과 같다.

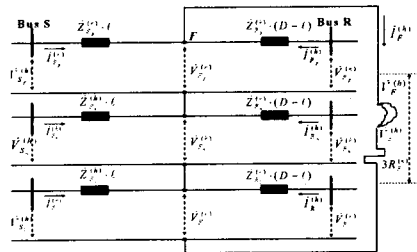


그림 1 사고 상의 등가 시퀀스 회로  
 Fig. 1 Equivalent sequence network connection of faulted lines

$$l = \frac{V_S^{(h)} - V_R^{(h)} + \bar{z}^{(h)}(I_S^{(h)} + I_R^{(h)})}{\bar{z}^{(h)}[I_S^{(h)} + I_R^{(h)} + \bar{k}_2^{(h)}(I_S^{(h)} + I_R^{(h)})]} \quad (1)$$

- $V_{S,seq}^{(h)}, V_{R,seq}^{(h)}$  : 선로 양단의  $h$ -차 고조파의 정상분, 역상분, 영상분 상전압;
- $I_{S,seq}^{(h)}, I_{R,seq}^{(h)}$  : 선로 양단의  $h$ -차 고조파의 정상분, 역상분, 영상분 상전류;
- $V_{F,seq}^{(h)}$  : 선로 양단의  $h$ -차 고조파의 정상분, 역상분, 영상분 사고 상전압;
- $\bar{z}^{(h)}$  : 정상분 또는 역상분  $h$ -차 고조파 임피던스;
- $l$  : 사고거리(fault distance)
- $D$  : 선로의 길이(line length)
- $h$  : 고조파 차수(the order of harmonic)

최근 고도의 기술발달은 산업전반에 걸쳐 많은 문제점을 해결할 수 있도록 해주었고 전력계통분야에서도 많은 부분 활용되고 있다. 특히 PMU는 측정되는 전압, 전류 측정치에 GPS 위성이 제공하는 시각정보를 담아 전류나 전압의 크기와 위상각을 제공하는 장비로서 서로 다른 지역에서 측정된 정보로부터 두 지역사이의 위상각차이를 정확히 제공할 수 있는 장점이 있다. 현재 우리나라의 경우 한전 전력연구원에서 1980년말 미국 PTI사로부터 DSM을 도입하여 최근까지 발전기 및 제어시스템의 모델링과 파라미터 결정에 PMU를 사용한 사례가 있다. 이러한 고정밀 시각 동기화된 데이터 이용한 사고거리추정에 관한 연구가 보고되어왔다 [1,2].

본 논문에서는 선로 양단에 설치된 PMU로부터 시각 동기화된 전압과 전류 페이저 정보를 이용하여 송전선로 가운데 가장 빈번한 단상 아크지락사고에 대한 사고검출에 관한 새로운 수치적 알고리즘을 제시한다. 본 논문에서 비선형 동적 특성을 지닌 아크전압은 사고전류와 동상을 지닌 구형파로 푸리에시리즈(Fourier Series)를 이

여기서,  $\tilde{k}_z^{(h)} = (\tilde{z}_0^{(h)} - \tilde{z}^{(h)}) / \tilde{z}^{(h)}$ 는 영상분 시퀀스 보상인자(the zero sequence compensation factor)이다.

## 2.2 장거리 선로 사고거리 추정 알고리즘

장거리 선로는 일반적으로 선로의 길이가 250km이며 선로모델에 분로 캐패시턴스를 고려한다. 만약 장거리 선로의 경우 분로 캐패시턴스가 고려되지 않는다면 선로에서 사고 발생 시 정확한 사고거리를 추정하기 어렵다. 본 절에서는 정확한 사고거리 알고리즘을 유도하기 위하여 선로 등가 II 모델을 이용한다. 선로 등가 II 모델은 그림 2와 같다. 여기서, 미지수  $\ell$ 는 송전단측으로부터 떨어진 사고거리를 나타내며  $\tilde{y}^{(h)}$ 는 분로 어드미턴스이다.

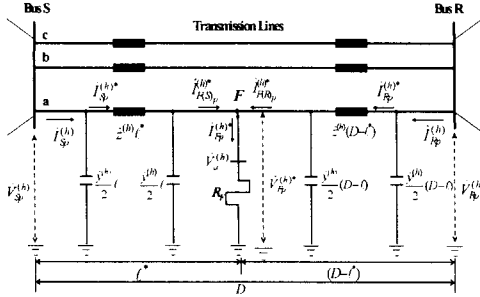


그림 2 분로 캐패시턴스를 가진 사고시스템  
Fig. 2 Schematic diagram of the fault system with shunt capacitance

그림 2로부터 선로 양단의  $h$ -차 정상분 상전류는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\tilde{I}_{S_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)} - \tilde{I}_{S_s}^{(h)} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} \ell \quad (2)$$

$$\tilde{I}_{R_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{R_s}^{(h)} - \tilde{I}_{R_s}^{(h)} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} (D - \ell) \quad (3)$$

여기서,  $\tilde{I}_{S_s}^{(h)*}$ ,  $\tilde{I}_{R_s}^{(h)*}$ : 송·수전단측 직렬 임피던스의  $h$ -차 고조파의 정상분 상전류.

KVL로부터  $h$ -차 고조파의 정상분 상전압은 다음과 같다.

$$\tilde{V}_{S_s}^{(h)} = \tilde{z}^{(h)} \tilde{I}_{S_s}^{(h)*} \ell + \tilde{V}_{F_s}^{(h)*} \quad (4)$$

$$\tilde{V}_{R_s}^{(h)} = \tilde{z}^{(h)} \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} (D - \ell) + \tilde{V}_{F_s}^{(h)*} \quad (5)$$

$h$ -차 고조파의 정상분 사고상 전압과 전류는 다음과 같다.

$$\tilde{V}_{F_s}^{(h)} = \tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{I}_{S_s}^{(h)*} \tilde{z}^{(h)} \ell \quad (6)$$

$$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)*} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} - \tilde{V}_{F_s}^{(h)*} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} D \quad (7)$$

여기서,  $\tilde{I}_{R_s}^{(h)*}$ ,  $\tilde{I}_{R_s}^{(h)*}$ : 송·수전단측  $h$ -차 고조파의 사고상 전류.

사고선로의 단상 등가회로로부터 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\tilde{V}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{z}^{(h)} \ell \left[ \tilde{I}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{S_s}^{(h)} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} \ell \right] \quad (8)$$

$$\tilde{V}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{z}^{(h)} \ell \left[ \tilde{I}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{S_s}^{(h)} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} \ell \right] \quad (9)$$

$$\tilde{V}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{z}_0^{(h)} \ell \left[ \tilde{I}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{S_s}^{(h)} \frac{\tilde{y}_0^{(h)}}{2} \ell \right] \quad (10)$$

$$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)} - \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} [(\tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{R_s}^{(h)}) \ell + (\tilde{V}_{R_s}^{(h)} + \tilde{V}_{F_s}^{(h)}) D] \quad (11)$$

$$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)} - \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} [(\tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{R_s}^{(h)}) \ell + (\tilde{V}_{R_s}^{(h)} + \tilde{V}_{F_s}^{(h)}) D] \quad (12)$$

$$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)} - \frac{\tilde{y}_0^{(h)}}{2} [(\tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{R_s}^{(h)}) \ell + (\tilde{V}_{R_s}^{(h)} + \tilde{V}_{F_s}^{(h)}) D] \quad (13)$$

여기서,

$\tilde{V}_{F_s}^{(h)*}$ :  $h$ -차 고조파의 사고상의 정상분, 역상분, 영상분 전압;

$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*}$ :  $h$ -차 고조파의 사고상의 정상분, 역상분, 영상분 전류;

$\tilde{y}^{(h)}$ :  $h$ -차 고조파의 사고상의 정상분, 역상분 분로 어드미턴스;

$\tilde{y}_0^{(h)}$ :  $h$ -차 고조파의 사고상의 영상분 분로 어드미턴스.

위의 정식을 더하고 대칭성분 방정식을 이용하면  $h$ -차 고조파의 사고상 전압과 전류를 구할 수 있다.

$$\tilde{V}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{V}_{S_s}^{(h)*} + \tilde{V}_{R_s}^{(h)*} + \tilde{V}_{F_s}^{(h)*} \quad (14)$$

$$\tilde{I}_{F_s}^{(h)*} = \tilde{I}_{S_s}^{(h)*} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} + \tilde{I}_{F_s}^{(h)*} \quad (15)$$

정식 (4)에서 (5)을 빼면 기본 고조파에 대한 방정식을 구할 수 있다.

$$\tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{R_s}^{(h)} = \tilde{z}^{(h)} [\tilde{I}_{S_s}^{(h)*} \ell - \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} (D - \ell)] \quad (16)$$

정식 (16)으로부터 미지의 사고거리  $\ell$ 는 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\ell = \frac{\tilde{V}_{S_s}^{(h)} - \tilde{V}_{R_s}^{(h)} + \tilde{z}^{(h)} [\tilde{I}_{R_s}^{(h)*} \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} (D - \ell)] D}{\tilde{z}^{(h)} [\tilde{I}_{S_s}^{(h)*} + \tilde{I}_{R_s}^{(h)*} + \frac{\tilde{y}^{(h)}}{2} (\tilde{V}_{R_s}^{(h)} - \tilde{V}_{S_s}^{(h)}) D] \ell} \quad (17)$$

위의 식은 단상 아크지락 사고에 대한 정확하고 간단한 사고거리추정식이다. 본 논문에서는 다양한 사례연구를 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

## 3. 사례연구

본 논문에 제시한 단상아크지락 사고에 대한 사고거리 추정 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP (Electromagnetic Transient Program)을 이용하여 사고를 모의하였다. 모의 전력시스템은 400 kV급 시스템이며 선로 파라미터는 다음과 같다:  $r = 0.1$  [ $\Omega/k$ ],  $x = 0.36$  [ $\Omega/k$ ],  $r_0 = 0.25$  [ $\Omega/k$ ],  $x_0 = 0.6$  [ $\Omega/k$ ],  $c = 3.0$  [ $\mu$ ], 그리고  $co = 2.0$  [ $\mu$ ]. 계통 A의 시퀀스 임피던스:  $Z_{A0} = 5 + j13$  [ $\Omega$ ],  $Z_{A1} = 4 + j10$  [ $\Omega$ ], 그리고  $Z_{A2} = 3 + j6$  [ $\Omega$ ]. 계통 B의 시퀀스 임피던스:  $Z_{B0} = 5 + j18$  [ $\Omega$ ],  $Z_{B1} = 4 + j14$  [ $\Omega$ ], 그리고  $Z_{B2} = 3 + j19$  [ $\Omega$ ]. A, B 계통의 등가 기전력은  $E_A = 133$  [kV],  $E_B = 100$  [kV]이다. 테스트 임팩터의 동기여는  $0^\circ$ 이다. 아크전압크기는  $V_a = 1000$  [kV]를 지닌 구형파로 정의되었다. 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하

기 위해서 다양한 선로길이(100km, 200km, 300km)와 서로 다른 사고지점을 통해 모의시험 하였다.  
아래의 표 1, 2, 3은 본 논문에서 제시한 장·단거리 선로에서 발생한 단상 아크지락사고의 사고거리계산결과를 나타낸다.

표 1 사고거리추정결과(D=100km)

Table 1 Results of the fault location estimation (D=100km)

Fault Point[%]	Without Shunt		With Shunt	
	Estimated[km]	Error[%]	Estimated[km]	Error[%]
10	9.73251	0.2675	10.0133	0.0133
20	19.7518	0.2482	20.0097	0.0097
50	50.0202	0.0202	49.9900	0.0100
80	80.3867	0.3867	79.9533	0.0467
90	90.4752	0.4752	89.9399	0.0601

표 2 사고거리추정결과 (D=200km)

Table 2 Results of the fault location estimation (D=200km)

Fault Point[%]	Without Shunt		With Shunt	
	Estimated[km]	Error[%]	Estimated[km]	Error[%]
20	18.4806	0.7597	20.085	0.0425
50	48.5588	0.7206	50.064	0.0320
100	100.168	0.0840	99.9191	0.0404
150	152.179	1.0895	149.713	0.1435
180	182.740	1.3700	179.613	0.1935

표 3 사고거리추정결과 (D=300km)

Table 3 Results of the fault location estimation (D=300km)

Fault Point[%]	Without Shunt		With Shunt	
	Estimated[km]	Error[%]	Estimated[km]	Error[%]
10	6.75676	1.0811	10.1896	0.0632
20	16.0836	1.3055	20.1773	0.0591
50	45.1420	1.6193	50.1411	0.0470
100	96.6154	1.1282	100.011	0.0037
150	150.588	0.1960	149.730	0.0900
200	205.118	1.7060	199.325	0.2250
250	257.858	2.6193	248.956	0.3480
280	287.574	2.5247	278.886	0.3713

상기 표에서 보면 알 수 있듯이 다양한 선로길이에 발생한 사고지점추정에 있어서 분로 캐패시턴스를 고려한 알고리즘의 결과가 보다 정확한 것을 알 수 있다. 특히 단거리 선로에 비해 장거리 선로인 경우 사고거리추정 결과가 정확한 것을 볼 수 있다.

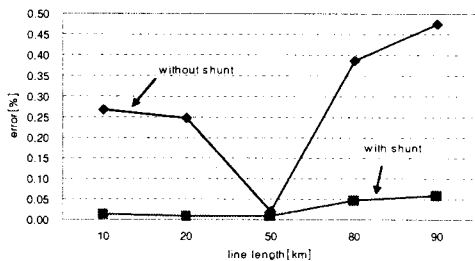


그림 3 추정된 사고거리의 오차율 (D=100km)  
Fig. 3 Errors of estimated fault location (D=100km)

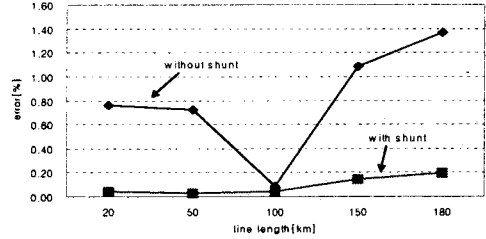


그림 4 추정된 사고거리의 오차율 (D=200km)  
Fig. 4 Errors of estimated fault location (D=200km)

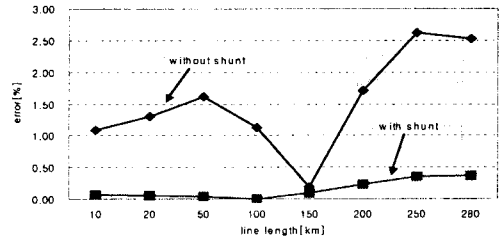


그림 5 추정된 사고거리의 오차율 (D=300km)  
Fig. 5 Errors of estimated fault location (D=300km)

상기 그림에서 통해서 본 논문에서 제시한 알고리즘의 신뢰성을 검증할 수 있다. 단거리 선로에 대한 사고거리 추정 알고리즘의 경우 사고지점이 선로의 양단에 가까울수록 오차가 비교적 커지는 것을 알 수 있으며 허용오차 범위(0.5%) 내에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 반면에 분로 캐패시턴스를 고려한 알고리즘의 경우 사고지점이 송전단측으로부터 멀어질수록 오차가 증가하나 역시 장거리 선로에서 오차범위 이내에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 특히 선로의 길이가 300km인 장거리 선로의 경우 분로 캐패시턴스를 고려한 사고추정 알고리즘이 보다 정확한 사고지점을 추정함을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 단상 아크지락사고에 대한 개선된 사고거리추정기법을 제시하였다. 본 논문에서는 분로 캐패시턴스를 무시한 단거리선로 사고거리추정 알고리즘과 분로 캐패시턴스를 고려한 장거리선로 사고거리추정 알고리즘을 제시하였다. 제시한 알고리즘은 동기화된 상전압과 상전류 정보를 이용하여 스펙트럼 영역에서 유도하였다. 제시한 알고리즘은 EMTP/ATP를 이용하여 타당성을 검토하였고 시뮬레이션 결과를 통해 제시한 알고리즘의 신뢰성과 유용성을 입증하였다.

#### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라인 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Z.Q. Bo, G. Weller, F. Jiang, and Q.X. Yang, "Application of GPS based fault location scheme for distribution system", *Power System Technology*, 1998, Proceedings, Vol. 1, Issue 18-21, pp.53-57, Aug. 1998
- [2] J.-A. Jiang, C.S. Chen, and C.W. Liu, "A new protection scheme for fault detection, direction discrimination, classification, and location in transmission lines", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 18, Issue 1, pp.34-42, Jan 2003.
- [3] 이찬주, 조란 라도예비, 김현홍, 박종배, 신중린, "적용 자동제어를 위한 동기식 2 단상 사고거리 추정기법", 대한전기학회 하계학술대회, 논문집 A, pp.169-171, July 2005.