

배전선로 고장점 표정 알고리즘

이덕수\* 진보건 이승재 강상희 최면송  
영지대학교

안복신 윤남선  
P&C Tech.

A fault location algorithm for distribution feeder systems

D. S. Lee\* B. G. Jin S. J. Lee S. H. Kang M. S. Choi B. S. Ahn N. S. Yoon  
Myongji University P&C Tech.

**Abstract** - This paper presents a fault location algorithm for distribution feeder systems. Distribution feeders include single phase and three phase laterals. The proposed algorithm achieves a high accuracy by continuously updating voltage and current phasor using the symmetrical components and admittance load model.

**Keywords:** Fault Location, Radial Distribution System, Laterals

1. 서 론

지난 수십년동안 전력계통의 빠른 성장은 운용되는 선로의 증가와 함께 다양한 원인으로 인한 고장을 경험해왔다. 배전 계통은 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하는 연계 계통으로써 기후조건, 동물의 접촉, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 사고 등의 원인으로 고장이 발생하였을 경우 고장점을 빠르고 정확하게 표정하여 전선 계통으로부터 고장 구간을 분리하고, 고장을 복구하는 것은 정전 비용을 최소화하는데 필수적이며 더 나아가 서비스 신뢰도와 전력의 질을 높이는 측면에서 매우 중요하다. 또한 전력 산업의 구조 개편으로 수용가에게 보다 양질의 전력을 안정적으로 공급하는 것은 커다란 이슈로 대두되고 있다.

고장점 표정을 위해 많은 방법들이 제안되어왔다. 송전선의 고장점 표정을 위한 방법으로 한쪽 단의 전압, 전류를 이용하는 방법, 양단 정보를 이용하는 방법, 진행파를 이용하는 방법, 그리고 방사상으로 운전되는 송전계통을 위한 방법들이 발표되었다. 이러한 방법들은 배전 선로의 비동질성, 불평형 부하 등의 이유로 배전 계통에 사용할 수 없다. 배전계통 고장점 표정 방법으로는 크게 고장시 발생하는 고조파 성분을 이용한 방법과 기본파 전압, 전류와 선로 파라미터를 이용[1-4]하는 방법으로 나눌 수 있다. 이러한 방법들은 부하의 동특성, 다중의 부하 탭, 분기선, 그리고 불평형에 의한 상호 임피던스 등을 고려하지 않았다.

본 논문에서는 많은 간선을 포함하고있는 방사상 병렬 배전선 사고시 고장점 표정 알고리즘을 제시하였다. 제안된 방법은 변전소 인출 단에서 측정된 기본파 전압, 전류를 사용하였으며 배전 선로의 비 동질성, 건전 상의 상호 임피던스, 다중 부하 탭 그리고 불평형 부하에 의한 영향을 최소화하였다. EMTP를 사용하여 얻은 배전 계통 고장 데이터로 제안된 알고리즘을 검증하였으며, 두 가지 사례연구를 통하여 검증한 결과를 본 논문에 나타내었다.

2. 본 론

2.1 배전계통 고장점 표정 알고리즘

고장점 표정을 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- ① 고장발생시 변전소 인출단 삼상 전압과 전류를 취득

할 수 있다.

② 선로의 단위길이당 정상 임피던스와 영상 임피던스는 사용가능하며 정상분과 역상분은 같다 ( $Z_1 = Z_2$ ).

③ 배전 계통의 보호기기, 분기선, 부하 등의 구성 정보 또한 사용 가능 하다.

2.1.1 삼상 선로에서의 고장점 표정

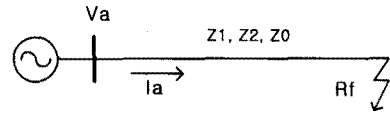


그림 1. A상 1선 지락 고장

그림 1과 같이 1선지락 고장이 발생했을 경우, 고장점에서의 시퀀스 전압은 식(1)과 같다.

$$V_{1f} + V_{2f} + V_{0f} = 3I_{0f}R_f \tag{1}$$

여기서,  $V_{if}$  = 고장점에서의 시퀀스 전압

$I_{0f}$  = 고장점으로 흐르는 영상 전류

$R_f$  = 고장 저항

따라서 고장상에는 다음과 같은 전압, 전류 관계가 성립한다.

$$V_a = I_{1f}Z_1 + I_{2f}Z_2 + I_{0f}Z_0 + 3I_{0f}R_f \tag{2}$$

여기서,  $V_K = x$  버스의 K상 전압

$I_f = x$  버스의 시퀀스 전류

$Z_i =$  선로의 시퀀스 임피던스

$i=0,1,2$ (정상, 역상, 그리고 영상 시퀀스)

방정식 (1)을 고장 거리 D와 고장저항  $R_f$ 에 관한 식으로 정리하면

$$V_a = Dz_1 \times (I_{fa} + k \times I_0) + 3I_0R_f \tag{3}$$

여기서,  $I_{fa} = I_{1f} + I_{2f} + I_{0f}$ ,

$$k = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_1}, \quad Z_1 = Dz_1 \quad (z_1: [\Omega/\text{km}])$$

윗 식에서 고장 거리 D를 구하기 위하여 식 (3)을 실수 부와 허수 부로 나누고,  $R_f$ 가 포함된 부분을 소거한 후 고장거리에 관한 식으로 정리하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$D = \frac{V_{aR} I_{0I} - V_{aI} I_{0R}}{A(r I_{0I} - x I_{0R}) - B(x I_{0I} + r I_{0R})} \tag{4}$$

여기서,  $A = I_{aR} + K_R I_{0R} - K_I I_{0I}$   
 $B = I_{aI} + K_R I_{0I} + K_I I_{0R}$

이 식은 삼상 선로의 경우 고장점 표정 일반식이며, 단상, 삼상 불평형 부하 전류, 배전 선로의 비 동질성, 다중 부하 탭 등을 고려하기 위하여 각 부하 인출점에서의 순수한 고장 전압과 전류를 추정하여 사용하고 고장 거리가 수렴할 때까지 반복 수행한다.

### 2.1.2 단상 분기 선로에서의 고장점 표정

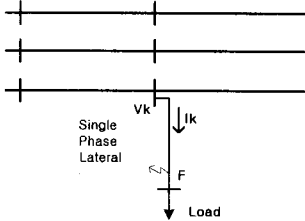


그림 2. 단상 분기 선로

그림 2와 같이 분기된 단상 선로에서 고장이 발생한 경우 고장점에서의 전압은 식 (5)와 같다.

$$V_{kf} = I_{kf} R_f \quad (5)$$

여기서,  $k$ 는 분기된 상에 따라서 a, b, 또는 c로 결정.

단상 부하 탭의 위치에서 전압, 전류 정보를 사용하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_k = D Z_k I_k + I_{kf} R_f \quad (6)$$

식 (6)에서 고장 저항이 포함된 항을 소거하고 고장거리  $D$ 에 관하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$D = \frac{V_{kr} I_{kfi} - V_{ki} I_{kfr}}{I_{kfi} (Z_{kr} I_{kr} - Z_{ki} I_{ki}) - I_{kfr} (Z_{kr} I_{ki} + Z_{ki} I_{kr})} \quad (7)$$

단상 분기선의 경우 고장점 표정 거리는 단상 부하 탭에서부터의 거리가 된다. 그러나 단상 분기선로에서 부하 탭의 위치를 알고 있을 경우 각 인출점에서의 고장 전압과 전류를 추정하여 고장점을 표정한다.

### 2.2 각 부하 인출 점에서의 전압, 전류 추정

부하전류, 자회선 무추열, 선종의 비 동질성, 분기선, 불평형 전류 그리고 고장에 의한 상호 임피던스 등의 오차요인을 최소화하기 위하여 본 논문에서는 선로의 시퀀스 임피던스와 어드미턴스 부하 모델[3]을 이용하여 각 부하 인출 단에서의 순수한 고장 전압과 전류 성분을 추정하였으며, 추정된 페이지 값을 이용하여 고장점 표정을 하였다.

그림 3과 같은 계통을 고려하면,  $i$ 번째 부하 인출 단에서의 전압을 다음과 같이 추정한다.

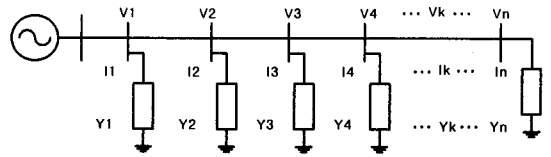


Fig 3. 배전 계통을 축약한 단선도

$$[V_i^{k+1}] = [V_i^k] - [V_{di}^k] \quad (8)$$

여기서,  $V_i^{k+1}$  =  $k+1$  부하 탭의 시퀀스 전압

$V_{di}^k$  = 선로의 시퀀스 전압강하

전체의 전압강하를 일반화된 식으로 나타내면

$$[V_{di}^k] = \sum_{k=1}^i [Z_i^k] [I_i^k] \quad (9)$$

여기서,  $Z_i^k$  =  $k$  구간의 시퀀스 임피던스

$I_i^k$  =  $k$  구간의 시퀀스 전류

구간  $k$ 에서 시퀀스 임피던스는  $Z_a = Z_b = Z_c (= Z_s)$ ,  $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} (= Z_m)$ 이고 선로가 완전연가되어 있다고 가정하면, 식 (10)과 같이 주어진다.

$$[Z_i^k] = \begin{bmatrix} Z_s + 2Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s - Z_m \end{bmatrix} \quad (10)$$

어드미턴스 부하 모델을 이용하여  $i$ 번째 부하 인출 단에서의 부하 전류는 식 (11)과 같이 추정된다.

$$[I_{id}^k] = [V_{fd}^k] [Y_{id}^k] \quad (11)$$

여기서,  $I_{id}^k$  =  $k+1$  부하 탭의 부하 유출 전류

$V_{fd}^k$  =  $k$  부하 탭의 상 전압

$Y_{id}^k$  =  $k$  부하 탭의 부하 어드미턴스

버스  $k$ 에서의 부하 어드미턴스 행렬은

$$[Y_{id}^k] = \begin{bmatrix} Y_a & 0 & 0 \\ 0 & Y_b & 0 \\ 0 & 0 & Y_c \end{bmatrix} \quad (12)$$

과 같이 대각행렬의 상 성분으로 주어지고,  $k$ 번째 버스에 연결된 부하가 없는 경우 0으로 주어진다.

$k$  구간을 흐르는 고장 전류는 식 (13)과 같이 계산된다.

$$[I_{fd}^k] = [I_{id}] - [I_{id}^k] \quad (13)$$

여기서  $I_{id}$ 는 변전소 인출단 전류이고,  $I_{id}^k$ 는  $k$ 구간 전까지의 부하 유출 전류의 합이며, 부하 유출 전류의 합을 일반식으로 나타내면

$$[I_{id}^k] = \sum_{i=1}^k [I_{id}^i] \quad (14)$$

이고 구간별로 반복하여 전압과 전류를 추정한다.

### 2.3 고장점 표정 흐름도

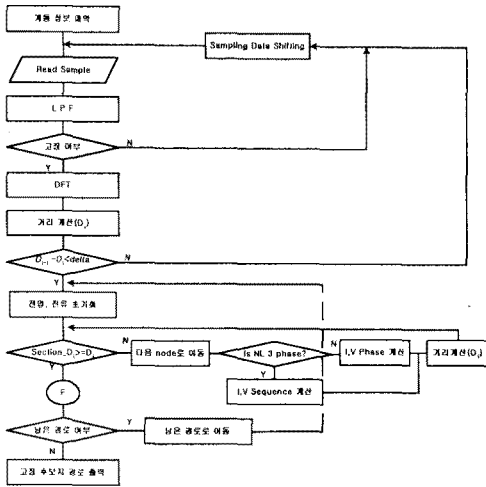


그림 4. 고장점 표정 흐름도

### 2.4 사례연구

그림 5와 같은 모의 계통은 실 배전 계통을 기초로 모델링 한 것이며, 22.9[kV]의 전원 단에 연결된 배전 피더는 약 40[km]로 단상, 삼상 분기선, 28개의 버스, 지상 역률 0.9을 가진 단상부하 153[kVA]와 삼상부하 1067.5[kVA]로 구성되어있다. 제한한 알고리즘 검증을 위하여 세 가지 파라미터를 선정하여 각각의 경우를 모의 검증하였다. 고장 거리는 0[km]~38[km], 고장 임피던스는 0[Ω]~50[Ω], 분기선로의 임피던스는 배전 피더, a상, 그리고 c상 분기선의 선종 모두를 다르게 함. 이러한 세 가지 경우를 조합하여 약 1000여 번의 모의하였으며 그 결과를 제시하였다.

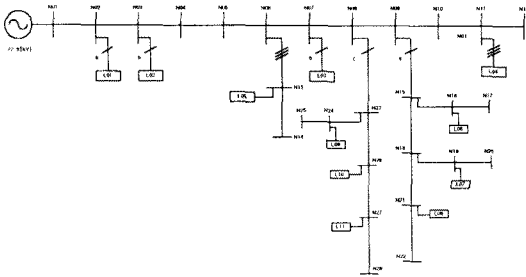


그림 5. 모의 계통도

데이터 취득을 위한 샘플링 주파수는 1920Hz, aliasing 에러를 방지하기 위해 960Hz 차단 주파수 특성을 갖는 2차 Butterworth 저역통과 필터를 사용하였다. 그리고 전압, 전류 순차 데이터로부터 페이저를 추출하기 위하여 한 주기 데이터 윈도우를 사용하는 DFT를 사용하였다.

고장점 표정 에러는 다음 식을 사용하여 산정 하였다.

$$\%Error = \frac{\text{표정거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \times 100 \quad (15)$$

#### 2.4.1 고장 거리와 고장 저항 변화 시 표정 결과

그림 6은 고장거리, 고장저항을 변화시키며 삼상 선로에서(N02, N04, N06, N08, N10) 1선 지락 고장을 모의한 결과이다. 고장저항이 50[Ω]일 때 최대 오차가 4.4[%] 보다 작음을 알 수 있다.

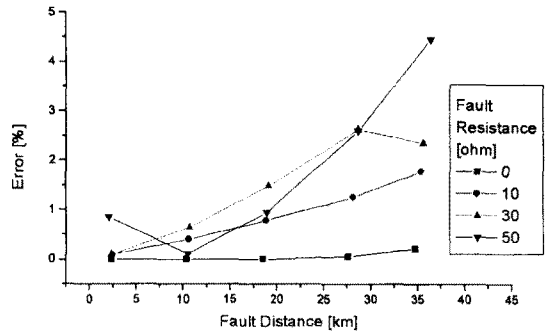


그림 6. 고장거리, 고장저항 변화

#### 2.4.2 분기선의 선종 변화 시 표정 결과

그림 7은 피더와 분기선의 선종을 달리했을 경우, 고장 거리와 고장 저항을 변화시키며 분기선로(N15, N16, N19)에서 1선 지락 고장을 모의한 결과이다. 고장 저항이 50[Ω]일 때 최대 오차가 5.2[%] 보다 작음을 알 수 있다.

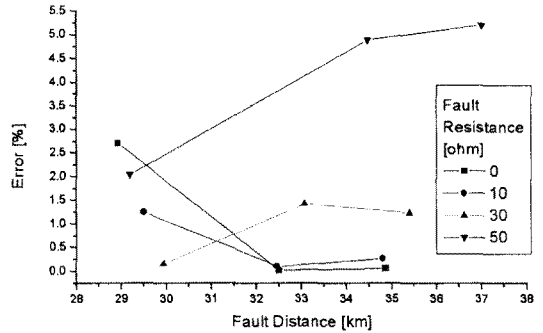


그림 7. 선종이 다른 경우 고장거리, 고장저항 변화

## 3. 결 론

본 논문에서는 배전 계통을 위한 고장점 표정 알고리즘을 제시하였다. 실 배전계통을 기반으로 모의 계통을 모델링하였으며, EMTP를 사용하여 제시한 알고리즘을 검증하였다. 사례연구를 통하여 본 알고리즘의 정확도와 배전선의 선종이 다른 경우도 적용할 수 있음을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] Adly A. Girgis, Christopher M. Fallon, David L. Lubkeman, "A fault location technique for rural distribution feeders", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No. 6, November/December 1993
- [2] R. Das, M.S. Sachdev, T.S. Sidhu, "A Fault Locator for Radial Subtransmission and Distribution Lines", Power Engineering Society Summer Meeting, 2000. IEEE Volume: 1, 2000, Page(s): 443-448 vol. 1
- [3] Jun Zhu; Lubkeman, D.L.; Girgis, A.A., "Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 12 2, April 1997, Page(s): 801-809
- [4] Srinivasan, K.; St.-Jacques, A. "A new fault location algorithm for radial transmission lines with loads", Power Delivery, IEEE Transactions on Volume: 4 3, July 1989, Page(s): 1676-1682