

**배전계통 최적운영 알고리즘의 연구 및 배전자동화시스템 적용**

정영범, 하복남, 설일호, 박신열, 임성일

한전전력연구원 전력계통연구실 배전연구센터, 명지대학교 차세대전력기술연구센터

**The research of algorithm for optimal operating distribution network and applying it to distribution automation system**

Jung young-beom, Ha bok-nam, Seol il-ho, Park shin-yul, Lim Seong-il

Distribution research Center in Korea Electric Power Research Institute, Next-Generation Power Technology Center

**Abstract** - 배전계통의 소극적인 원격감시제어 만이 가능한 소규모 배전자동화 시스템이 1998년 처음 설치된 이후로 지금에 이르기까지 한국의 배전자동화 시스템은 종합 배전자동화로 이름만 변한 것이 아니라 기술수준과 표현능력이 있어서 비약적인 발전을 거듭하고 있다. 선로운영자의 계통상황 인식을 수월하게 하기위한 실지도상의 선로 표현장과 함께 기술검토를 위한 단선도창이 추가되었고, 이를 통해 배전망 최적운영을 위한 다수의 기술검토용 운영프로그램들이 포함되어지고 있다. 본 논문에서는 고장발생시 그 위치를 추정하는 알고리즘을 연구하고 이를 배전자동화 시스템에 시험 적용한 사례를 소개한다.

**1. 서 론**

전력 계통에서 송배전 선로는 전원단과 수용가를 연결하는 중요한 역할을 하며 대기 중에 노출되어 있음으로 해서 뇌우, 동물의 접촉, 보호기기의 오·부 동작, 그리고 그 외 다양한 사고 등의 원인으로 사고가 빈번하게 발생한다. 선로에서 사고가 발생할 경우 사고 발생지점을 빠르고 정확하게 찾아내고 신속하게 고장을 복구하는 것이 정전 비용을 최소화하며 더 나아가 서비스 신뢰도와 전력의 질을 높이는 측면에서 매우 중요하다.

이러한 역할을 가능케 하기 위해서는 고장점 검출기술이 필요하다. 송전계통은 3상 평형회로이므로 한단의 전압과 전류의 기본과 성분을 사용한 정보를 사용하면서 전류분배계수, 보상 등의 방법을 적용하여 보다 정확한 고장점 검출하는 겐보기 임피던스 법, 진행파를 이용하는 방법, 전압과 전류의 고조와 성분을 이용하는 방법등으로 구분할 수 있다. 현재 송전계통은 고장점 검출 장치가 널리 사용되고 있다.

그러나 배전계통은 크게 송전계통보다 세 가지 측면에서 해석을 어렵게 하는 요인들이 있다. 먼저 배전 선로의 비 동질성, 부하 전류, 다중의 부하 탭 등의 이유로 불평형 요인을 들 수 있다. 둘째로 송전계통과 달리 배전계통은 많은 분기선을 포함하는 방사상계통이다. 송전계통은 선로 구간마다 보호기기가 설치되어 그 구간의 고장에 관련된 정보를 얻기가 쉽지만 배전계통은 변압기 인출단의 계전기 설치점에 관한 정보만으로 많은 분기선을 포함하는 방사상계통을 해석하여야 하므로 해석에 어려움을 더한다. 그리고 마지막으로 부하에 대한 정보의 부족이다. 송전계통은 구간 양단의 단락용량으로 계산으로 해석에 필요한 전원단 임피던스를 얻을 수 있어 해석이 용이하지만 배전계통은 부하에 대한 정보의 부족으로 부하단 임피던스를 얻기가 매우 어렵다. 그리고 시시각각으로 부하가 변하기 때문에 많은 가정을 통하여 얻은 부하단 임피던스로부터 얻은 해석결과가 정상적인 부하변동에 대하여 타당한 오차범위를 가지고 있어 실제로 사용가능한 지 알아보아야 한다.

배전계통에서의 고장점 검출 방법으로는 이와 같은 어

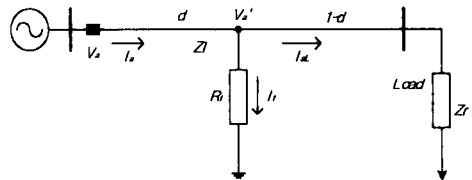
려움 때문에 그다지 많은 연구가 수행되지는 않았으며 실제 배전계통의 고장점 검출은 현재 사용되지 않는 실정이며 고장점 검출은 육안에 의존하고 있는 실정이다. 그러나 최근에 반복추정기법을 이용하여 배전계통의 불평형을 고려한 방법이 제안되었고 분기선을 고려하기 위하여 분기점에서 전압, 전류를 수정하는 방법, 대칭분 해석에 의한 오차를 줄이기 위한 3상회로 상해석에 의한 고장거리 계산알고리즘이 소개되는 등 연구가 시작되고 있다.

**2. 본 론**

**2.1 고장점 추정 알고리즘**

배전선로 고장점 추정을 위하여 변전소 인출단에서 삼상 전압과 전류를 취득할 수 있으며 배전 계통의 구성 정보와 부하 데이터를 사용 할 수 있다고 가정한다.

고장점 추정 기본 알고리즘은 변전소 인출단에서 취득한 전압, 전류와 계통의 구성 정보를 사용한 <그림 2.1.1>과 같은 불평형 배전계통의 1선지락 고장 시 단선도의 해석에서 나온다. <그림 2.1.1>에서  $V_a$ 는 변전소 인출단 a상 전압,  $I_a$ 는 변전소 인출단 a상전류,  $V_a'$ 는 고장점의 a상전압,  $I_{aL}$ 는 a상 부하전류,  $Z_f$ 는 부하임피던스 행렬,  $Z_l$ 는 선로 임피던스 행렬,  $I_f$ 는 고장전류,  $R_f$ 는 고장저항,  $d$ 는 고장점까지의 거리,  $k$ 는 영상 보상 요소를 나타낸다.

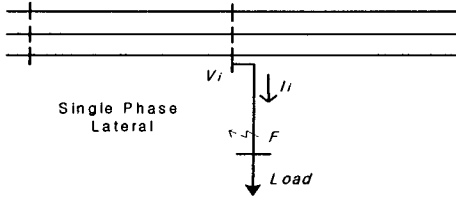


<그림 2.1.1> 1선 지락 고장

변전소 인출단에서 측정되는 전압 방정식은 식 (2.1.1)와 같다.

$$V_a = d \times (Z_{la} I_a + Z_{lf} I_f + Z_{lc} I_c) + I_f R_f \quad \text{식(2.1.1)}$$

고저항 지락고장뿐만 아니라 배전계통에서의 1선지락 고장시 일반적으로 고장저항이 개입된다. 고장 저항에 걸리는 전압이 부하단에 병렬로 걸리게 됨으로, 고장시 고장점 뒷단으로 부하전류가 흐른다. 고장점 인입단의 추정 전류는 고장전류와 고장점 뒷단으로 흐르는 부하전류의 합이기 때문에 고장점 뒷단으로 흐르는 부하전류를 고려하지 않으면 정확한 고장점 표정을 할 수 없다.



<그림 2.1.2> 단상 분기 선로에서 1선 지락 고장

<그림 2.1.2>과 같은 a상 단상 분기선로에서 고장이 발생한 경우 식(2.1.2)를 이용하여 고장점 표정을 한다.

$$V_a = d \times (Zl_{aa}I_a + Zl_{ab}I_b) + I_f R_f \quad \text{식(2.1.2)}$$

전압방정식 (2.1.1)와 (2.1.2)는 고장거리( $d$ ), 고장전류( $I_f$ ), 고장저항( $R_f$ ) 세 개의 미지수를 포함하고 있다. 이 방정식을 풀기 위해서는 3개의 식이 필요하다. 식 (2.1.1)와 (2.1.2)를 실수부와 허수부로 나누면 2개의 식이 얻어지고, 식 (2.1.3)과 같이 부하전류를 이용하여 하나의 식을 더 얻는다.

$$I_f = I_a - I_{aL} \quad \text{식(2.1.3)}$$

식 (2.1.3)에서  $I_{aL}$  은 고장시 부하전류로서 아직 미지수이지만 반복 추정에 의하여 정확한 값을 찾아간다. 고장 발생동안의 이 부하전류는 고장 시 전압이 낮아지기 때문에 고장 전 부하 전류와는 다른 값을 갖는다. 고장 발생 후 부하전류를 추정하기 위하여 고장점의 전압을 추정하고 다시 이 값으로부터 부하전류를 추정하는 과정을 반복한다. 반복 기법에 의한 고장거리계산 알고리즘은 다음과 같다.

<참조하십시오> 글씨크기 10 Point, 글씨체 신명 신명조.

## 2.2 반복추정 방법

- (1) 고장 발생 후 부하전류  $I_{aL}$ 은 고장 발생 전 인입전류  $I_a$ 와 같다고 가정한다.
- (2) 고장발생 후 변전소 인출 전류  $I_a$ 에서 부하전류를 뺀으로써 고장 전류  $I_f$ 를 구한다. (식 2.1.3)
- (3) 계산된 고장전류 값을 식 (2.1.1)에 대입하고, 실수부와 허수부로 분리한 후  $R_f$ 를 소거하여 고장거리  $d$ 를 구한다.
- (4) 위에서 구해진 고장거리  $d$ 와 식 (2.2.1)을 이용하여 고장점에서의 전압( $V_f$ )을 구한다.

$$\begin{bmatrix} V_a' \\ V_b' \\ V_c' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} - d \begin{bmatrix} Zl_{aa} & Zl_{ab} & Zl_{ac} \\ Zl_{ba} & Zl_{bb} & Zl_{bc} \\ Zl_{ca} & Zl_{cb} & Zl_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad \text{식(2.2.1)}$$

- (5) 고장점의 고장전압으로부터 고장 시 부하전류를 구한다.
- (6) 반복과정마다 계산된 고장거리의 변화가 허용오차가 이내로 될 때까지 단계 2)로 돌아가 이 계산 과정을 반복한다.

## 2.3 부하전류 추정방법

부하에 대한 정보에 따라 고장점의 전압으로부터 부하전류를 구하는 방법은 여러 가지가 있다. 먼저 부하단에 대한 정보를 가장 많이 알고 있는 경우로 정 임피던스 부하이며 부하 등가 임피던스를 알고 있을 때 부하전류

는 다음과 같다.

$$I_{aL} = [Y_{L11}, Y_{L12}, Y_{L13}] \times [V_a', V_b', V_c']' \quad \text{식(2.3.1)}$$

여기서  $Y_L$  은 고장된단의 선로 임피던스와 부하 임피던스의 어드미턴스로서 다음과 같다.

$$Y_L = [Zl + Zr]^{-1} \quad \text{식(2.3.2)}$$

그리고 부하단에 대한 정보를 오직 부하가 정 임피던스 부하라고 알고 있을 때 부하전류는 다음과 같이 추정한다.

먼저 식 (2.3.1)에서  $Y_{L12}, Y_{L13}$  는 선로간, 부하간 상호 임피던스에 의한 성분이므로 그 값이  $Y_{L11}$  보다 상당히 작다고 가정하여 고장전 부하전류를 다음과 같이 근사한다.

$$I_{aL} = Y_{L11} \times V_{na}' \quad \text{식(2.3.3)}$$

$I_{aL}, V_{na}'$  는 고장전 부하전류와 고장전 고장점 전압이므로 인입전류와 고장점까지의 선로 전압강하로부터 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_a &= I_{aL} \\ V_{na}' &= V_{na} - d \times (Zl_{aa}I_{na} + Zl_{ab}I_{nb} + Zl_{ac}I_{nc}) \end{aligned} \quad \text{식(2.3.4)}$$

그리고 고장후 부하전류는  $I_{aL} = Y_{L11} \times V_a'$ 와 같으므로 여기서 임피던스를  $Y_{L11}$  소거하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$I_{aL} = (I_{aL} / V_{na}') \times V_a' \quad \text{식(2.3.5)}$$

그런데 실제로는 식(2.3.3)의 상호 임피던스 부분이 존재하여 고장거리 계산결과에 이에 대한 오차가 나타난다.

그리고 부하에 대한 정보부족으로 임피던스 부하라는 사실조차도 사용할 수 없는 경우 식 (2.3.6)에 나타난 일반적인 부하 모델을 사용하여 부하전류를 추정한다.

$$I_{aL} = I_r \left| \frac{V_a'}{V_n} \right|^{n_p} + jI_i \left| \frac{V_a'}{V_n} \right|^{n_q} \quad \text{식(2.3.6)}$$

여기서,  $V_n$  : 고장전 부하단 전압

$V_{fa}$  : 고장후 부하단 전압

$I_m, I_n$  : 고장전 부하단 유효, 무효 전류

$n_p, n_q$  : 부하 상수

복소값을 갖는 부하 상수는 부하의 동특성에 따라서 결정된다. 예를 들면 정 전류 부하는  $n_p = n_q = 0$ 의 값을 갖고, 정 전력 부하는  $n_p = n_q = -1$ , 정 임피던스 부하는  $n_p = n_q = 1$ 의 값을 갖는다. 일반적인 배전계통에서는 이러한 부하들이 혼합되어 있으므로  $n_p = 0.5 \sim 1.8$ ,  $n_q = 1.5 \sim 6$ 의 값을 갖는다.

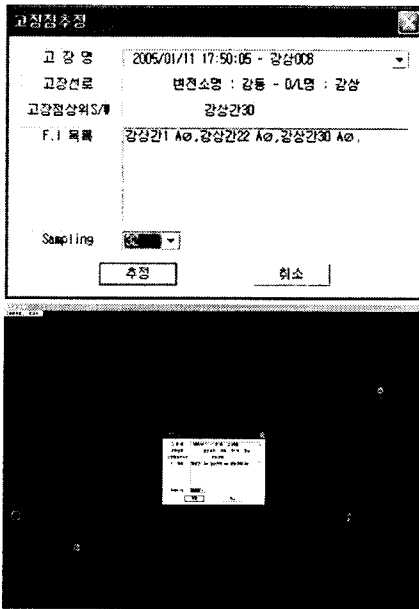
### 2.4 배전자동화 응용프로그램으로 적용

종합배전자동화 운영자 프로그램은 크게 세가지로 나누어진다. 배전선로상의 자동화 기기들을 원격감시제어하고 실지도상에 계통을 표시하는 Nzed 프로그램, 고장 발생시 운영자가 배전선로 상태를 신속하게 분석하게 도와주고 여러가지 기술검토를 가능케하는 단선도(SLD) 프로그램 그리고 배전망 최적운영 알고리즘들을 구현하는 응용프로그램(AP)이다.

배전자동화 응용프로그램은 서버에서 계통정보를 읽어와서 단선도상에 표시되고 있는 선로를 중심으로 운영 알고리즘을 적용하여 별도의 창을 띄워 표시하는 형태로 이루어져 있다.

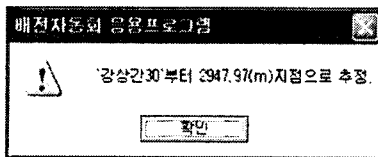
본 논문에서 다루어지는 고장점 추정 알고리즘을 적용하기 위해서는 해당선로의 F.I 정보를 분석하여 전압·전류의 고장전 1Cycle 과 고장발생이후 4~5Cycle 의 파형을 전송받아 DFT(Discrete Fourier Transform)로 기본성분을 분석하여 고장전후의 각 상별 전원단과 고장점 근처의 전압·전류값을 반복추정 알고리즘에 적용시켜야 한다. <그림 2.4.1>에 고장점 추정 알고리즘을 적용시키기 위한 입력창을 보여주고 있다.

FRTU별로 전압·전류 Sampling 회수가 다를수 있으므로 Sampling회수를 선택할 수 있게 하였다.

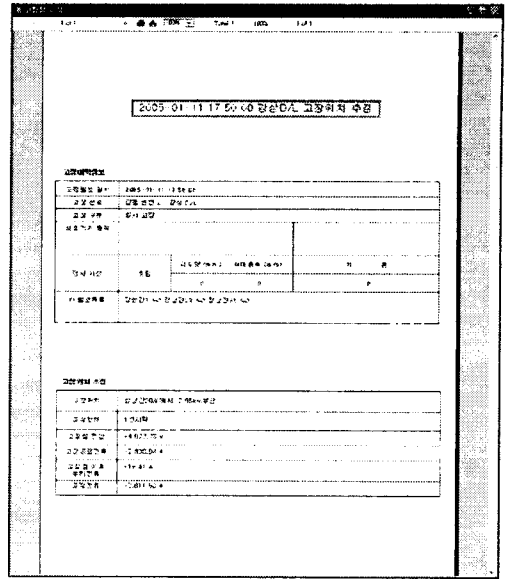


<그림 2.4.1> 고장점 추정을 위한 입력창

고장점은 F.I가 발생한 개폐기 이후에 존재하므로 결과창은 <그림 2.4.2>와 같이 출력되고 보고서형태로도 출력할 수 있게 되어 있다.



<그림 2.4.2> 결과창



<그림 2.4.3> 고장점 추정 보고서

### 3. 결 론

본 논문에서는 컴퓨터를 이용한 반복추정기법을 이용하여 배전계통의 불평형을 고려한 고장점 추정 방법이 제안되었다. 현재 시점에서 배전선로의 고장위치를 육안으로 판별한다는 것을 고려해 볼때 이 연구는 배전자동화 운영을 위해 필수적이라고 볼 수 있다. 하지만 현재까지 선로상에 있는 대부분의 구형FRTU는 전압·전류 파형을 샘플링 하는데 있어서 파형의 읽으러짐과 샘플링 횟수의 부족등으로 인하여 정확한 결과를 기대하기 힘든 실정이다. 그러나 시험제작용 신형FRTU를 통해서라도 이 알고리즘을 연구및 시험적용 해보지 않는다면 점점기능의 확대를 요구받는 배전자동화 시스템의 발전방향에 역행할 수도 있을것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] James J. Burke, "Power Distribution Engineering Fundamentals and Applications", MARCEL DEKKER, INC, 1994
- [2] 이광진, "배전선로 보호협조", 한국전력공사 서울지역본부, 판매01-3, 2001.11
- [3] 이진이, "디지털 신호처리", 기한재, 2003.06