

# 송전 계통의 광역정전 징후 시 PMU 취득 데이터를 이용한 거리계전기 Zone3 동작시간 예측 알고리즘

논문
58-12-1

## An Algorithm of Predicting the Zone 3 Trip Time of Distance Relay by using PMU Data when Power Systems Face Cascaded Event on Transmission System

김진환\* · 임일형\*\* · 이승재\*\*\* · 최면송† · 김태완§ · 임성일§§ · 김상태§§§  
(Jin Hwan Kim · Il Hyung Lim · Seung Jae Lee · Myeon Song Choi · Tae Wan Kim ·  
Seong Il Lim · Sang Tae Kim)

**Abstract** - Defense systems are needed to prevent catastrophic failures of a power grid due to cascaded events. Cascaded events can be attributed to improper operations of protective relays. Especially, it is the most dangerous problem that trips of backup relays by overload. In this paper, a new algorithm of predicting Zone 3 acting time of distance relay is proposed using the real time synchronized data from PMUs on the transmission system when the power system is danger. In the proposed, some part of the power system are outage when some unexpected fault in the power system, the algorithm will monitor the impedance locus of distance relay. At this time, if there is a big change of Impedance locus, the algorithm will calculate the Zone 3 acting time of the distance relay by the over load. In the case studies, the estimation and simulation network have been testified and analysed in Matlab Simulink.

**Key Words** : Black-Out, Distance Relay, Zone 3, Cascading, PMU

### 1. 서론

최근 들어 북미 유럽 등에서 발생한 대규모 정전사태는 무엇보다도 전기가 인류에 미치는 영향에 대한 중요성을 실감하게 해 주었다. 아마도 전기공학 분야의 관점에서는 역사상 가장 충격적인 사건으로 기억될 것이다. 이는 예측할 수 없는 우연한 동시 다발적 작은 사고에 의해 어마어마한 대규모 정전사태가 벌어졌다는데 실로 놀라움을 금할 수 없다. 이는 지금도 어디선가 광역정전의 위험성이 존재할 수 있다고 말할 수 있을 것이다[1].

광역정전에 대한 위험성과 분석 및 방지대책에 대한 연구는 세계적으로 많은 관심을 불러일으키며 활발한 연구가 진행되고 있다.

NERC(North America Reliability Council)의 정전 기록 분석에 따르면 대용량 정전사고도 높은 빈도로 발생되고 있으며, 충분한 여유용량 확보를 통해 운영하는 방법이 있다. 하지만 이는 막대한 시설비의 요구로 볼 때 현실적 대안이 되지 못한다[2].

또한 전력계통은 발전기, 부하 및 송전선로 등 구성요소 일부의 탈락이 전체 시스템 붕괴로 이어지는 것을 막기 위하여 안전도(Security)를 유지하여 운전하고 있다. 하지만 후비보호 계전기의 오정정[3], 운영자의 실수[4], 제어시스템 통신실패, 보호계전기의 고장[5]등의 원인으로 인하여 광역정전이 발생할 수도 있다.

현재까지 발생한 광역정전은 전력계통의 고장 혹은 외란에 의해 선로가 탈락되고, 이로 인하여 과부하가 발생하여 보호계전기가 동작하며 광역정전으로 발전한 경우가 대부분이었다. 사례분석 결과 보호계전기에 의한 영향이 전체 광역정전 사례 중 75%에 달한다고 한다[6, 7].

광역정전을 막기 위하여 적응형 거리계전기[8], 계전기 잠재고장에 대한 연구[9, 10], 또한 멀티에이전트 시스템을 기반으로 취약성 산정 기법을 이용하여 전력계통에 자기복구 및 재구성 기능을 부여함으로써 광역정전을 막고자하는 SPID(Strategic Power Infrastructure Defense)[11]이라는 시스템도 개발되어 있다. 이러한 연구들은 공통적으로 계전기 자체에서 문제를 찾고 해결하는 방법을 제시하고 있지만, 상황에 따른 예측 방법으로 모든 상황에 대한 검증이 어렵다.

따라서 본 논문에서는 거리계전기의 회피 또는 잠재고장에 대한 접근이 아닌 동작예측에 대해 초점을 맞추어, 사고 발생 시 광역정전의 주된 원인이 되는 Zone 3 동작시간을 예측하는 알고리즘을 제안한다. 이 알고리즘은 조류 재분배를 통한 거리계전기의 임피던스 궤적을 추적 예측하여 거리계전기 Zone 3 동작 시간을 예측 하는 알고리즘이다. 알고리즘에 대한 검증은 6모선 20선로의 계통을 Matlab을 이용하여 모의하였다.

또한 본 연구는 현재 개발되어 있는 PMU를 통해 취득된

\* 준 회원 : 명지대 공대 전기공학과 석사과정  
\*\* 정 회원 : 명지대 공대 전기공학과 박사과정  
\*\*\* 펠로우회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수  
§ 정 회원 : 명지대 공대 전기공학과 연구교수  
§§ 정 회원 : 경남대 공대 전기공학과 조교수  
§§§ 정 회원 : 한전 KDN 선임연구원  
† 교신저자, 정회원 : 명지대 공대 전기공학과 교수  
E-mail : mschoi@mju.ac.kr  
접수일자 : 2009년 8월 25일  
최종완료 : 2009년 10월 15일

시간 동기화된 실시간 데이터를 이용해 거리계전기의 동작 위험을 운영자에게 전달하여 광역정전 방지 대책 수립에 기여 할 것이다.

**2. 광역정전과 계전기 Zone 3 동작과의 관계**

**2.1 광역정전 피해 사례와 계전기 동작과의 관계**

1977년 7월 13일 Buchanan South와 Millwood West 사이의 2개의 345[kV] 선로가 낙뢰로 인해 탈락 하고 약 18분 뒤 또 다른 낙뢰에 의해 Sprain Brook와 Buchanan 사이의 한 개의 345[kV] 선로와 Sprain Brook와 Millwood West 사이의 한 개의 345[kV] 선로가 탈락 하였다. 그 후 23분이 지나 345[kV] 선로가 나무에 접촉하며 계전기가 동작하여 탈락 하며 광역정전으로 진행을 하였다. 이로 인해 6,000[MW]의 부하가 탈락하며 900만 명이 피해를 입었다. 또한 2003년 8월 14일 Eastlake의 5개의 발전기가 탈락을 하며 시작하여 29분후 Stuart-Atlanta 345[kV] 선로가 나무에 접촉하여 탈락하였다. 그 후 57분이 지나 52분 동안 3개의 345[kV] 선로가 나무에 접촉하여 탈락 하였고 24분후 29분 동안 16개의 138[kV] 선로가 과부하로 탈락 26분 후 5분 동안 대다수의 중요 선로가 거리계전기 동작에 의해 탈락 하며 광역정전이 일어나 총 70,000[MW]의 피해를 가져 왔다[12].

광역정전의 사례를 보면 초기 불특정 사고에 의해 시작을 한다. 이는 예측이 어렵거나 자연 재해와 같은 막을 수 없는 사고에 의해 이루어진다. 하지만 광역정전으로 진행 과정에서 위 사례에는 공통점이 있다. 사고가 아니 과부하에 의해 계전기가 동작하여 정전구간이 넓어지고 또한 계전기 동작에 의한 조류 재분배로 타 선로에 과부하를 일으켜 선로의 탈락을 유발시킨다.

**2.2 선로 탈락에 대한 조류 재분배 현상**

본 연구의 제안한 알고리즘 설명에 앞서 IEEE 39 모선 시스템을 이용한 모의 결과를 통해 선로 탈락에 대한 조류 재분배 현상을 살펴보았다.

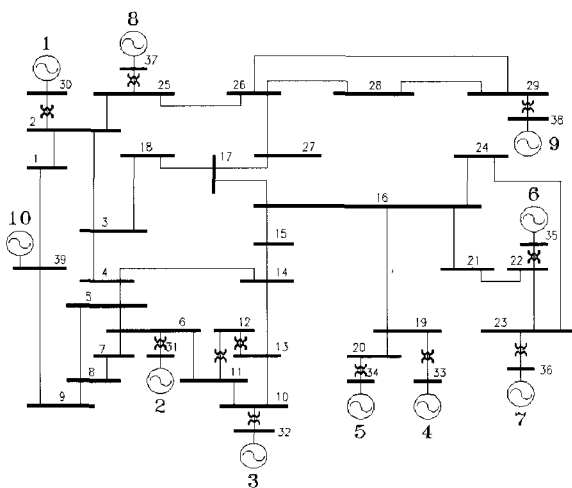


그림 1 IEEE 39 모선 시스템  
Fig. 1 Power Flow of IEEE 39 Bus System

표 1 정상상태와 13-14선로 탈락후의 조류 흐름

Table 1 Power Flow normal states and 13-14 line outage

Normal states			after 13-14 line outage		
From	To	P[MW]	From	To	P[MW]
13	14	334	13	14	0
5	6	532.4	5	6	822.1
6	11	306.6	6	11	639.8
10	11	312.6	10	11	617.4

그림 1은 IEEE 39 모선 시스템이다. 위 계통에서 13-14 선로의 탈락을 가정하여 모의했고 표 1에 조류 변화가 많은 3개의 선로의 조류 흐름을 볼 수 있다. 이는 선로 13-14 선로의 정상상태 일 때 334[MW]의 조류가 선로 탈락 후 각 선로에 재분배 된 후 표 1에서 보여주는 3개의 선로에 과부하 된 것을 볼 수 있다. 이는 크지 않은 조류가 흐르던 선로의 탈락이 계통의 일부분에 과부하를 일으킬 수 있는 요소가 된다. 또한 과부하를 일으킨 선로의 계전기 동작으로 2차 탈락을 하게 되면 또 다른 선로의 과부하를 유발 시켜 Cascading 현상을 일으킬 수 있다. 실제 사례에서도 이러한 현상이 발견이 되었고 이를 시점으로 정전구간의 확산이 가중 되어 치명적 광역정전이 일어나게 되었다.

본 연구에서는 설비 탈락을 통한 조류 재분배가 이루어질 때 거리계전기의 임피던스 궤적을 PMU를 이용한 실시간 시간 동기화된 데이터를 이용하여 예측 하고 이를 통해 Zone 3 동작시간을 예측하는 알고리즘을 개발을 진행하였다. 이를 통해 현재 개발을 하고 있는 계통 감시 시스템에서 광역정전의 징후에 대한 감시를 가능하게 하여 Cascading 현상이 발생 시 광역정전으로 진행에 대한 방지 대책 마련에 기여 할 것이다.

**3. 광역정전 방지 대책을 위한 거리계전기 Zone3 동작 시간 예측 알고리즘**

**3.1. 실시간 데이터를 이용한 거리계전기 임피던스 궤적 예측 알고리즘**

거리계전기의 Zone 3 동작은 전압과 전류를 이용하여 임피던스를 계산하여 동작을 하게 된다. 이는 계통의 사고에 의한 설비의 탈락 이 없을 시에는 최대 부하일 때 Zone 3 동작을 안 하도록 정정치를 정하므로 문제가 되지 않는다. 하지만 광역정전 사례에서 보듯이 단순한 사고 후 계통이 변화하고 그로 인한 조류 재분배 현상으로 선로 과부하 현상에 대한 임피던스의 Zone 3 진입을 가능하게 하여 건전 선로의 탈락 위험이 있다.

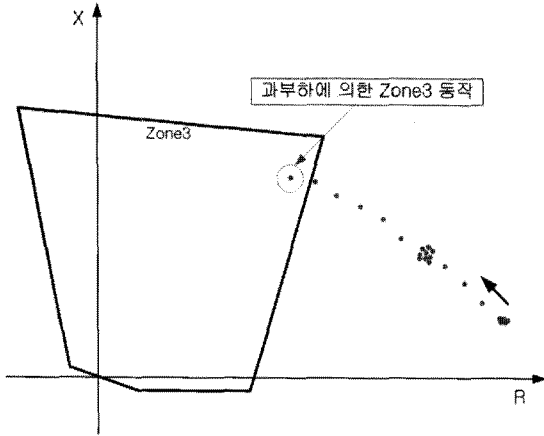


그림 2 과부하에 의한 Zone 3 동작 예  
Fig. 2 Zone 3 trip by overload

그림 2는 계통의 사고이후 건전 선로의 거리계전기의 임피던스 궤적이 Zone 3 영역에 진입하며 동작 하는 상태를 가정한 임피던스 궤적이다. 거리계전기 정정치는 계통의 사고가 없을 때에는 부하에 대해서 동작을 하지 않게 정하지만 그림 2에서와 같이 계통의 사고 후 조류 재분배로 선로의 과부하가 흐르게 되면 동작을 할 수 있다. 또한 광역정전 사례 분석 자료에 의하면 계통의 사고 후 불안정한 상태에서 수십 분의 시간이 흐른 뒤 계통의 일부가 계전기 동작에 의해 탈락 하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 전력 IT산업의 발전으로 PMU를 이용한 실시간 동기화 된 데이터 취득을 바탕으로 사고 혹은 계통의 변화에 의한 조류 재분배 현상이 일어나고 이때 거리계전기 임피던스 변화에 대한 예측으로 부적합한 후비 보호 거리계전기 Zone 3동작을 예측하는 알고리즘을 소개한다.

거리계전기의 임피던스 궤적은 실시간 전압, 전류 데이터 취득을 이용한 디지털 임피던스 궤적을 알 수 있다. 본 알고리즘은 임피던스 데이터를 수치해석으로 궤적의 경로를 예측한다.

### 3.1.1 데이터를 이용한 궤적 예측 방법

본 연구의 목적은 임피던스 궤적의 현재까지의 일정 시간 동안의 데이터를 이용하여 앞으로의 궤적을 추측하여 거리계전기의 동작시간을 예측하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 Spline과 Least Square 법을 적용 고려 대상으로 하였다. 하지만 Spline는 보간법 즉 현재 이후의 데이터가 아닌 데이터 사이의 예측에 적합하다. 이는 미래에 대한 데이터에 대한 고려는 하지 않아 본 알고리즘에 적용하기는 어렵다. 반면에 Least Square 법은 데이터를 근사하여 함수를 구한다. 이는 주어진 데이터에 가장 근접한 함수를 구하여 데이터를 예측하여 본 연구에서는 Least Square 법을 예측 알고리즘에 적용하였다.

최소 자승법은 함수 값과 데이터 값 사이의 차분의 제곱합을 최소화 하려고 한다. 이는 작은 차분에 대해서 작아지고 큰 차분에 대해서는 확대된다..

$$y_i = a_0 + a_1x_i + a_2x_i^2 \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m y_i w^{j-1} = a_0 \sum_{i=1}^m w^{j-1} + a_1 \sum_{i=1}^m x_i w^{j-1} + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^2 w^{j-1} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^m y_i x_i w^{j-1} = a_0 \sum_{i=1}^m x_i w^{j-1} + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^2 w^{j-1} + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^3 w^{j-1} \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^m y_i x_i^2 w^{j-1} = a_0 \sum_{i=1}^m x_i^2 w^{j-1} + a_1 \sum_{i=1}^m x_i^3 w^{j-1} + a_2 \sum_{i=1}^m x_i^4 w^{j-1} \quad (4)$$

$x_i, y_i$  : Input data

$a_0, a_1, a_2$  : Unknown value

$w$  : weighting factor

식(1)은 취득된 데이터 즉 입력 데이터를 2차식으로 표현한 것이다. 이를 통해 알지 못하는 데이터를 예측을 할 수 있다. 식(1)에서 미지수를 알기 위해서 식(2), (3), (4)를 이용하여 미지수를 알아내 식(1)을 구하여 주어진 데이터 이외의 데이터를 예측 할 수 있다.

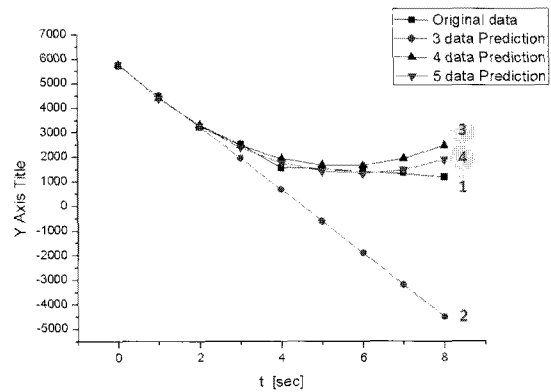


그림 3 입력 데이터와 수치 해석을 이용한 데이터 예측 결과  
Fig. 3 Input data and data prediction result by numerical method

그림 3은 입력 데이터(①) 알고리즘을 통해 구한 예측된 데이터를(②, ③, ④) 보여준다. 3개의 데이터로 예측을 했을 때의 결과(②)는 입력데이터와의 오차가 큼을 알 수 있다. 이에 대한 예측 결과는 신뢰 할 수 없다. 하지만 입력된 데이터의 양이 4개와 5개로 증가 했을 때의 결과(③, ④)은 입력 데이터와의 오차가 적다. 이는 데이터양이 충분하다면 본 논문에서 소개하는 예측 알고리즘의 결과는 신뢰 할 수 있음을 보인다.

### 3.1.2 실시간 데이터 활용 방법

본 논문에서는 실시간 데이터를 이용하여 임피던스 궤적의 t-R(시간-저항), t-X(시간-리액턴스)의 관계식을 2차 최소 자승법을 이용해 구하였다. 하지만 전력계통의 특성상 두 가지 데이터 적용 방안을 제시한다.

첫째 계통의 특성상 부하의 변화에 따른 거리계전기의 임피던스는 계속해서 변한다. 이는 거리계전기 임피던스 궤적에 있어서 작은 변화 일지 모르지만 본 논문에서 소개하는 궤적 예측 알고리즘에는 큰 영향을 줄 수 있다. 그림 4은 6 모선 계통의 1개의 선로가 탈락 시 다른 선로의 임피던스

궤적을 나타내는 그림이다. 그림 4에서 선로 탈락 이전에는 데이터 그룹(①)로 정상상태일 때 임피던스 궤적은 많은 데이터가 그림 4의 작은 그래프에서 보여지듯이 미세한 변화의 데이터가 모여 있다. 하지만 선로 탈락 후 임피던스 궤적은 크게 변하고 이후 다시 안정된 상태에서는 임피던스 궤적은 움직임이 적어진다. 이에 대해 본 논문에서는 데이터의 임피던스 값을 선로 탈락과 같은 계통 변화 후 발생하는 조류 재분배 현상에 대해서만 알고리즘 적용을 위해 임피던스 값의 작은 변화는 같은 데이터로 간주하여 적용하였다. 다시 말해 데이터 값이 바로 전의 데이터 값과 차가 큰 것만을 적용하고 오차가 작은 값은 시간과 데이터의 값의 평균을 적용하였다.

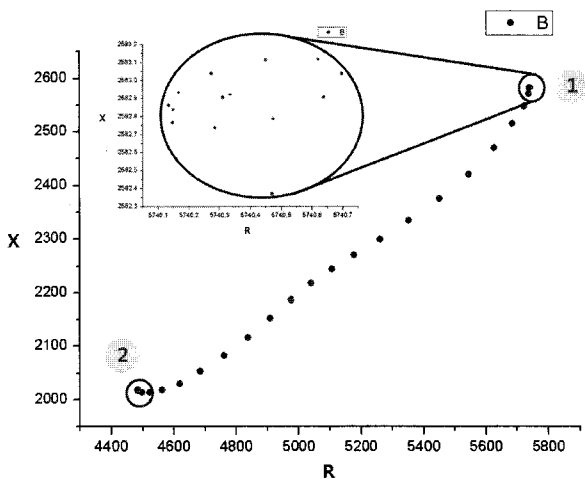


그림 4 6모선 계통의 1개의 선로 탈락 시 임피던스 궤적의 변화

Fig. 4 Impedance locus when one line outages in 6 buses system

돌출 취득된 실시간 데이터의 오차 및 계통의 사고 혹은 낙뢰와 같은 외란에 대한 데이터 오차가 있을 수 있다. 이에 대해 본 연구에서는 실시간 데이터에 대한 알고리즘의 신뢰를 높이기 위해 연속적인 5개의 데이터에 대한 평균값을 알고리즘에 적용하였다. 즉, 1개의 데이터 값이 입력이 되면 바로 직전의 4개의 데이터와 평균을 계산하여 적용하고 시간은 데이터의 입력 시간을 이용하였다. 이는 5개의 데이터 값에 1개의 외란이 있을 때에도 알고리즘에 적용되는 데이터에는 큰 영향을 안주어 알고리즘 적용에 신뢰를 높였다.

위 두 가지 사항을 고려하여 전력계통의 특성에 맞는 실시간 데이터를 이용한 임피던스 궤적 예측을 하였다.

3.2. 임피던스 궤적 예측을 이용한 거리계전기 동작 시간 예측 알고리즘

본 논문의 주목적인 거리계전기 동작 시간 예측 알고리즘은 취득되는 실시간 전압, 전류 데이터를 이용하여 임피던스 궤적을 예측 하고 이때 예측된 임피던스 궤적이 Zone 3 영역에 들어오게 되면 Zone 3 영역 시간 딜레이를 고려하여 동작 시간을 예측 한다.

후비 보호용 거리계전기는 Zone 1,2,3에 대한 동작을 하

고 여기에서 Zone 3는 자기 구간 사고가 아닌 접근 영역의 가장 긴 구간의 보호를 목적으로 하고 있다. 하지만 Zone 3에 대한 동작은 선로의 과조류가 흐를 때 동작할 수 있는 요소가 된다. 이는 실제 광역정전에서 알 수 있듯이 계통의 변화 후 조류 재분배를 거쳐 선로에 과조류가 흐르게 되면 Zone 3 동작을 할 수 있기 때문에 실제 사고에 대한 예측을 제외하고 조류 재분배에 대한 예측만을 고려하였다.

본 논문에서 소개하는 거리계전기 동작 예측 시간을 통하여 과조류에 대한 거리계전기 동작 위험을 계산한다. 이를 통해 계통의 위험을 운영자에게 알려 줄 수 있다. 만약 시스템 운영자에게 실시간 감시를 통한 거리계전기 Zone 3 동작시간을 알려 준다면 부적절한 거리계전기 Zone 3 동작에 대한 블리킹을 통해 동작을 제어 하거나 과조류에 대한 간단한 부하 차단을 통해 광역정전으로 발전하는 것을 막을 수 있을 것이다.

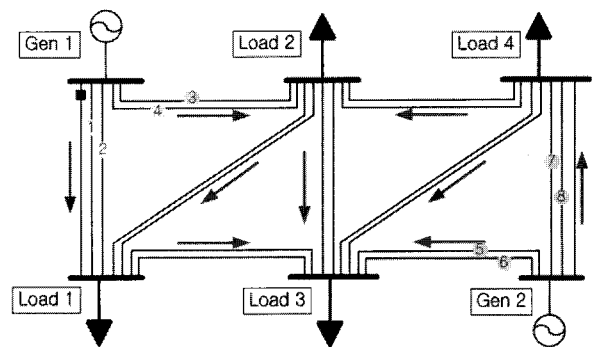
4. 사례 연구

본 논문의 사례연구는 6모선 20선로의 계통을 Matlab을 통해 모의 하였다. 사례연구의 순서는 계통에서 거리계전기의 Zone 3 동작 시간 예측을 위해 관심선로를 두고 계통의 사고를 가정하여 나머지 선로 중 관심선로에 영향을 많이 주는 선로 4개의 탈락과 영향이 적은 선로 4개의 탈락 시켜 관심선로의 거리계전기 Zone 3 동작을 예측하였다.

처음 4개의 선로 탈락은 광역정전의 초기 선로 탈락에 대한 조류 재분배 현상을 일으켜 거리계전기의 동작 위험을 줄 수 있는 방향으로 진행을 하고 나머지 선로 4개의 탈락은 영향이 많이 가지 않는 방향으로 진행을 하여 본 연구의 알고리즘을 검증하였다.

4.1 6모선 20선로의 거리계전기 동작시간 예측 사례 계통 및 시나리오

본 논문의 사례연구는 그림 6에서와 같이 400[kV] 6모선 20선로의 시뮬레이션 계통을 이용하였다. 시뮬레이션 계통의 입력데이터는 표 2에 나타내다. 또한 표 3은 시뮬레이션 계통의 각 모선 유효전력 및 무효전력을 나타내었다. 그림 5에서와 같이 선로 Gen1-Load1의 선로 중 한 개의 선로를 관심선로로 두고 거리계전기의 동작시간 예측을 한다.



■ : 거리계전기

그림 5 6 모선과 20 선로 시뮬레이션 계통  
Fig. 5 6 Buses and 20 Lines Simulation System

표 2 사례연구 계통 입력 데이터

Table 2 Input data for Simulation system

Line connection	Resistance [ $\Omega$ ]	Inductance [mH]	Power [MW]
Gen1-Load1	3.2	6.73755	48.9
Gen1-Load2	5.6	11.79071	48.2
Load1-Load2	1.6	4.24465	1.9
Load1-Load3	2.4	8.75881	7.3
Load2-Load3	4.8	10.10632	9.7
Load2-Load4	5.6	5.20812	11.1
Load3-Load4	1.6	8.28718	2.4
Load3-Gen2	2.4	6.13117	35.2
Load4-Gen2	4.8	8.08506	26.4

표 3 시뮬레이션 계통의 모선의 유효전력과 무효전력

Table 3 Each bus Active Power and Reactive Power in simulation

Bus	Active Power [MW]	Reactive Power [Mvar]
Gen1	243.10	136.40
Gen2	96.50	148.90
Load1	122.76	48.51
Load2	49.50	23.97
Load3	91.20	26.60
Load4	91.00	41.46

사례 연구는 계통의 사고에 의한 선로의 연쇄적인 탈락으로 거리계전기 Zone 3 동작 예측 알고리즘을 검증하기 위한 것이다. 계통의 사고는 표 4와 그림 6에서와 같이 선로의 탈락을 가정하여 진행을 하고 처음 4개의 선로(①~④)는 관심선로에 큰 영향을 주는 선로를 선택하여 탈락 시키고 다른 4개의 선로(⑤~⑧)는 관심선로에 큰 영향을 주지 못하는 선로를 선택하여 관심 선로의 거리계전기(■)의 Zone 3 동작 예측 알고리즘의 검증을 하였다.

표 4 선로 탈락 시나리오

Table 4 Line Outage Scenario

NO	Line	Time [sec]
1	Gen1-Load1(1)	20
2	Gen1-Load1(2)	40
3	Gen1-Load2(1)	60
4	Gen1-Load2(2)	80
5	Load3-Gen2(1)	100
6	Load3-Gen2(2)	120
7	Load4-Gen2(2)	140
8	Load4-Gen2(2)	160

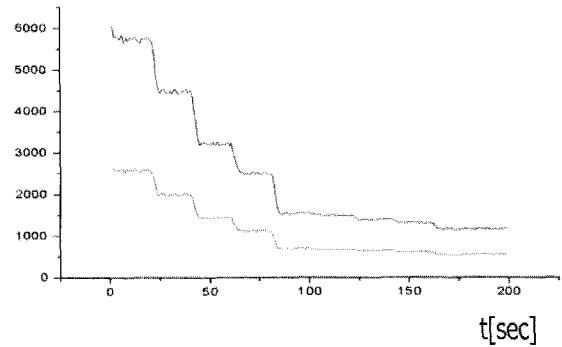
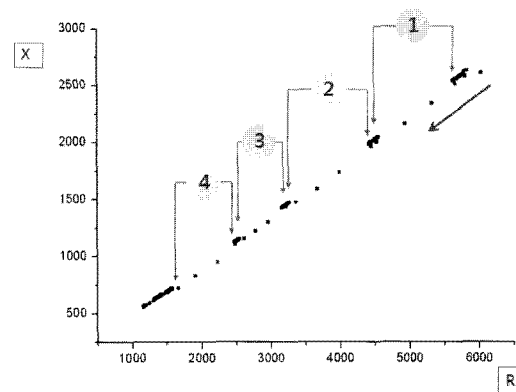


그림 6 선로 탈락에 따른 관심선로 거리계전기 임피던스 궤적

Fig. 6 The distance relay on the focus Line according to Line outage

그림 6은 선로 탈락에 따른 관심 선로의 거리계전기의 임피던스를 저항과 리액턴스를 시간에 따른 그래프로 나타낸다. 본 사례연구의 입력 데이터는 PMU의 데이터 취득과 중앙시스템에서의 데이터 전달에 특성에 따라 약 1초당 1 Sampling으로 하였다. 또한 데이터의 신뢰도를 2% 내외로 오차를 두어 알고리즘에 입력되는 데이터는 실제 계통의 취득 과정 중 발생할 수 있는 오차를 고려하여 적용했다.



? : 선로 탈락 순서

그림 7 선로 탈락에 따른 관심선로 거리계전기 임피던스 궤적

Fig. 7 The distance relay on the focus Line according to Line outage

그림 7에서는 선로 탈락에 따른 관심선로 거리계전기의 임피던스 궤적을 나타내고 선로의 탈락이 있을 때 마다 거리계전기 Zone 3 영역으로 접근을 하고 있음을 알 수 있다. 또한 처음 4번의 선로 탈락 시 임피던스 궤적의 움직임이 크고 나머지 4개 선로의 탈락은 임피던스 궤적이 Zone 3에 접근을 하지만 움직임이 크지 않음을 알 수 있다. 이는 거리계전기의 임피던스 궤적에 미치는 영향에 따라 Zone 3 동작 시간 예측 알고리즘의 결과를 비교 분석 할 수 있게 하여 알고리즘 검증을 진행하였다.

**4.2 거리계전기 Zone 3 동작 시간 예측 알고리즘 적용 및 결과**

거리계전기 Zone 3 동작 시간 예측 알고리즘은 입력된 임피던스 궤적 데이터를 시간에 따라 동작 시간을 예측 하였다. 그림 8는 각 시간 마다 거리계전기 Zone 3 동작 예측 알고리즘을 이용하여 관심선로의 거리계전기 Zone 3 동작 시간 예측 결과를 보여준다.

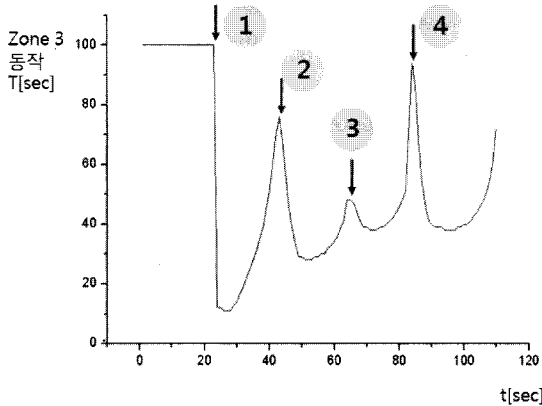


그림 8 거리계전기 Zone 3 동작 시간 예측 결과

Fig. 8 The predicting result of the Distance Relay Zone 3 acting time

그림 8의 그래프를 보면 처음 선로의 탈락(①)에 의해 임피던스 궤적의 변화가 심하여 예측된 거리계전기 동작 시간을 약 10~15[sec] 후로 예측한다. 그 후 2차 선로 탈락까지 임피던스 궤적의 변화가 없이 정상상태로 돌아오게 된다. 이때 거리계전기 동작 시간 예측 알고리즘 결과는 증가하게 된다. 이는 거리계전기의 임피던스 궤적이 안정됨에 따라 궤적의 예측 또한 안정되어 예측 시간이 증가하게 된다. 이 상태로 계통에 이상이 없다면 알고리즘은 거리계전기 동작을 하지 않을 것이라고 결과를 보여줄 것이다. 하지만 20~40[sec] 사이에 선로의 추가 탈락(②)이 생기면서 거리계전기 Zone 3 동작 예측 시간은 다시 약 30[sec] 정도로 짧아지게 된다. 이 또한 처음 선로 탈락과 같이 실제 임피던스 궤적의 변화가 심하여 본 알고리즘 결과 Zone 3 동작 시간을 짧게 예측한다.

전체적으로 보면 그림 7의 임피던스 입력 데이터에서 첫 번째(①) 두 번째(②), 네 번째(④) 선로 탈락의 경우 임피던스 궤적의 변화가 세 번째(③) 선로 탈락일 때 보다 크다. 이는 결과 데이터에서 보듯이 세 번째 선로 탈락의 경우 Zone 3 동작 시간이 짧아지지만 다른 3개의 선로 탈락 일 때 보다는 변화가 크지 않다. 이는 취득된 임피던스 궤적의 변화에 따라 거리계전기 Zone 3 동작시간을 예측 하고 있음을 알 수 있다. 이는 조류 재분배에 대한 선로의 영향에 따라 동작 시간을 예측 한다는 것으로 볼 수 있다.

마지막으로 그림 5의 본 사례연구는 처음 4개의 선로(①~④)는 큰 영향을 주는 선로를 탈락 시키고 마지막 4개의 선로(⑤~⑧)는 관심선로에 큰 영향을 주지 않는 선로를 탈락 시켜 비교 한다. 그림 8의 결과 그래프에서 처음 4개의 선로 탈락 시 거리계전기 Zone 3 동작시간을 예측 하고 있다. 하지만 마지막 4개 선로는 큰 영향을 주지 않기 때문에 관

심 선로는 거의 정상상태로 있게 된다. 이는 그림 7의 임피던스 궤적을 보면 알 수 있다. 이렇게 임피던스 궤적이 정상 상태이고 Zone 3 영역 안에 존재 하지 않고 많은 시간이 흐르게 되면 알고리즘은 거리계전기가 Zone 3 동작을 안 하게 될 것이라고 판단하게 된다. 그림 8에서는 112[sec] 이후에는 계통내의 선로탈락이 있지만 동작시간을 예측 하지 않는 결과 데이터를 보여준다.

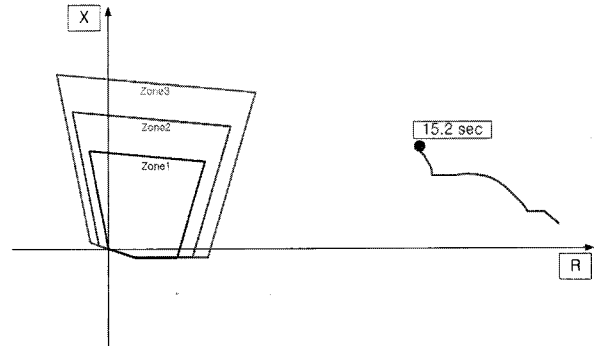


그림 9 거리계전기 동작 예측 시간 알고리즘의 시스템 적용 방안

Fig. 9 Predicting the acting time of Distance relay to apply to Monitoring System

본 논문에서 제안한 알고리즘은 실시간 데이터 기반으로 감시 시스템을 운영하는데 중요한 요소로 작용 할 것이다. 그림 9은 계통 감시 시스템에 적용을 위한 방안으로 중앙 감시 시스템에서 계통의 상태를 감시하게 될 때 거리계전기의 임피던스 궤적의 변화가 심할 때 거리계전기의 정정치에 대한 표현을 하고 본 알고리즘을 적용한 동작 예측 시간을 표시하여 나타내어 광역정전에 대한 위험 요소를 나타내게 될 것이다. 이를 통해 광역정전 방지 대책을 마련하여 치명적 사고를 막아 계통을 보호하는 역할을 수행 할 수 있을 것이라 생각된다.

**5. 결 론**

본 논문에서는 최근 15년간 빈번하게 발생하는 치명적 피해를 가져오는 광역정전 방지를 위하여 거리계전기 Zone 3 동작시간 예측 알고리즘을 개발 하였다.

광역정전 사고는 초기 예기치 않은 사고에 의한 설비의 탈락 이후 조류 재분배 현상이 생기고 이에 대한 선로의 과조류가 발생하게 된다. 그때 사고가 아닌 거리계전기의 Zone 3 동작을 하게 되고 이후 계통의 붕괴하여 광역정전을 일으키게 된다. 전 세계적으로 광역정전에 대한 많은 연구가 진행 되어 지고 있다.

현재 국내에서 전력 IT분야의 발전으로 PMU를 개발 하여 실시간 시간 동기화된 데이터 취득이 가능해지고 계통 실시간 감시에 대한 연구가 진행이 되고 있다. 거리계전기 Zone 3 동작 예측 알고리즘은 이러한 실시간 시간 동기화된 데이터를 이용한 알고리즘으로 거리계전기의 임피던스 궤적을 감시하여 사고가 아닌 과부하에 의한 동작 시간을 예측 하여 위험을 알려 준다. 이는 광역정전의 큰 부분을 차지하는 계전기의 과부하에 대한 동작을 감시하여 치명적 광역정

전의 발생을 막을 수 있을 것이다.

본 연구에서 제시한 알고리즘을 검증하기 위하여 Matlab 시뮬링크를 이용하여 결과를 비교하였으며, 결과대상은 시간에 따른 계통의 선로 탈락에 대한 선로의 거리계전기에 입력되는 임피던스 궤적과 알고리즘을 통한 거리계전기 Zone 3 동작 예측 시간을 비교 분석 하였다. 이는 광역정전을 일으키는 과조류에 대한 거리계전기의 동작 시간을 예측 하여 위험을 미리 알 수 있어 운영자의 조치를 통한 대정전 방지를 가능하게 할 수 있음을 입증 하였다.

점차 전력계통은 산업의 발전함에 있어 복잡해지고 효율적 운영을 하기 위한 방향으로 변하고 있다. 이렇게 변하고 있는 전력계통은 적은 마진으로 운영이 되면서 광역정전에 대한 위험에 노출 되어 있다. 현재 전 세계적으로 광역정전 방지를 위한 노력들이 많아지고 있다. 국내에서도 실시간 계통 감시를 위한 WAMS라는 전력계통 감시 시스템 개발을 진행 하고 있다. 본 논문에서 제시한 알고리즘은 WAMS의 모니터링 시스템에 적용 되어 계통의 위험을 실시간으로 광역정전에 대한 위험을 진단하고 알려 줄 수 있는 역할을 해줄 것으로 기대하고 있다.

**감사의 글**

본 연구에 참여한 연구자(의 일부)는 『2단계 BK21 사업』의 지원비를 받았으며, 교육과학기술부/한국과학기술재단 선도연구센터육성사업(ERC)의 지원(차세대전력기술연구센터)으로 수행되었음

**참 고 문 헌**

[1] B.A. Carreras, V.E. Lynch, I. Dobson, D.E. Newman, "Critical points and transitions in an electric power transmission model for cascading failure blackout", Chaos, vol. 12, no. 4, December 2002, pp. 985-994.  
 [2] P. Fairley. "The Inruly Power Grid", IEEE Spectrum, pp. 22-27, August 2004.  
 [3] Gregory S. Vassell, Fellow, IEEE, "Northeast Blackout of 1965", IEEE Power Engineering Review, pp. 4-8, January 1991.  
 [4] "NIGHT OF TERROR", TIME, pp. 24-26, July 25, 1977.  
 [5] C. W. Taylor, "Improving Grid Behavior. IEEE Spectrum. June 1999. pp. 40-45.  
 [6] J. Chen, J. S. Thorp and M. Parashar. "Analysis of Electric Power System Disturbance Data", Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Science, 2001.  
 [7] A.G. Phadke and J.S. Thorp, "Expose Hidden Failure to Prevent Cascading Outages", IEEE Computer Application in Power, pp. 20-23, July 1996.  
 [8] Seong-II Lim, Chen-Ching Liu, Seung-Jae Lee, Myeon-Song Choi and Seong-Jeong Rim. "Blocking of Zone 3 Relays to Prevent Cascaded Events",

Power Systes. IEEE Transactions on Volume 23, pp. 747-754, May 2008.

[9] Phadke, A.G and Thorp, J.S. "Expose hidden failures to prevent cascading outages in power systems", Computer Applications in Power. IEEE, pp 20-23, July 1996  
 [10] David C. Elizondo, J. de la Ree, Arun G. Phadke and Stan Horowitz, "Hidden Failures in Protection System and their Impact on Wide-area Disturbances", IEEE, 2001. pp 710-714.  
 [11] April 2000.U.S.-Canada Power System Outage Task Force, ""Final Report on the August 14, 2003 blackout in the United States and Canada". <http://www.ferc.gov/>, April, 2004.  
 [12] Carson W. Taylor, Bonneville Administration, "Improving Grid Behavior-The inglorious summer-of-1996 blackouts taught the west to improve emergency control and protection and to sharpen simulation techniques", IEEE SPECTRUM JUNE 1999, pp. 42-45.

**저 자 소 개**



**김진환 (金眞煥)**

1980년 6월30일생. 2008년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
 Tel : 031-335-2068  
 Fax : 031-330-6816  
 E-mail : jin60001374@mju.ac.kr



**임일형 (林一亨)**

1979년 4월 13일생. 2005년 명지대학교 전기공학과 졸업(학사). 2007년 동대학 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정  
 Tel : 031-336-3290  
 E-mail : sojoo2jan@mju.ac.kr



**이승재 (李承宰)**

1955년 11월 30일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 Univ. of Washington 전기공학과 졸업(공학). 1994년 Univ. of Washington 교환 교수. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.  
 Tel : 031-336-6362  
 E-mail : sjlee@mju.ac.kr



**최 면 승 (崔 勉 松)**

1967년 4월생. 1989년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 Pennsylvania State Univ. 방문 연구원. 1992년 기초전력공학 공동연구소 전임연구원. 현재 명지대학교 공대 전기공학과 교수.

Tel : 031-336-3290

E-mail : mschoi@mju.ac.kr



**김 태 완 (金 泰 完)**

1970년 5월 19일생. 1994년 건국대 공대 컴퓨터공학과 졸업. 1996년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(석사). 2002년 현대중공업(주) 기계전기연구소 연구원, 2006년 동 대학원 컴퓨터공학과 졸업(공학박). 2007년 건국대 컴퓨터공학과 강의 교수. 현재 명지대학교 전기공학과 연구교수.

Tel : 031-330-6819

E-mail : twkim@mju.ac.kr



**임 성 일 (林 星 日)**

1967년 7월 10일생. 1994년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996-2001년 한국전력공사 전력연구원. 2004년-2005년 명지대학교 차세대 전력기술 연구센터 연구교수 2006년 Iowa State University 방문 연구원. 현재 경남대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 055-249-2630

E-mail : slim@kyungnam.ac.kr



**김 상 태 (金 尙 泰)**

1971년 2월 15일생. 1996년 명지대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한전KDN(주) 전력IT연구원 송변전IT연구그룹 선임연구원. 대한전기학회 국제위원. 관심분야는 Synchro-Phasor기반 전력계통 감시보호제어 기술, 디지털 보호계전기 및 정정협조기술, 디지털 신호처리기술.

Tel : 031-420-0751

E-mail : jesteka@kdn.com