

민감도 지수를 이용한 취약도 지수와 거리계전기 동작 시간 예측 알고리즘을 적용한 모니터링 시스템 설계

*김진환, *임일형, *이승재, *최명순, **임성일, ***김상태
*명지대, **경남대, ***한전KDN

Distance relay Monitoring System Design by using Vulnerability Index using of Sensitivity Factor and expecting acting time of Distance relay

*Jin-Hwan Kim, *Il-Hyung Lim, *Seung-Jae Lee, *Myeon-Song Choi, **Seong-Il Lim, ***Sang-Tae Kim
*Myong-Ji University, **Kyung-Nam University, ***KDN

Abstract - 본 논문에서는 I-PIU를 통해 동기화된 데이터를 취득 이용하여 실시간 계통 감시는 물론 광역정전 방지에 대한 방법을 제안하고 있다. 또한 민감도 지수(Sensitivity Factor)를 이용한 취약도 지수(Vulnerability Index)와 실시간 데이터를 이용한 거리계전기 동작을 예측 알고리즘을 적용하여 실시간 계통의 상황감시는 물론 계통의 위험 정도를 미리 알리는 거리계전기 모니터링 시스템을 설계하였다. 이는 운영자로 하여금 계통의 위험 요소를 적절한 조치를 취해 제거함으로써 치명적인 광역 정전 사태의 방지와 효율적 계통관리를 기대 할 수 있다.

통을 감시함으로써 제어 계획 수립 및 계통변경을 통해 안전도 유지에 기여하기 위하여 I-PIU에서 취득한 데이터를 토대로 하는 모니터링 시스템을 설계하였다.

또한 광역정전에 큰 부분을 차지하는 후비 보호계전기인 거리계전기 동작에 초점을 맞추어 취약도 및 민감도를 이용한 위험도 산출 기법과 거리계전기 Zone3에 대한 동작시간 예측 알고리즘을 적용하여 연구를 진행했다.

2. 본 론

1. 서 론

현대 사회에서 전력계통은 가장 중요한 기반 시설 중의 하나이다. 이런 전력계통은 점차 발전하고 있는 현대 사회에 맞게 더욱 경제적이고 효율적으로 운영하기 위하여 설비 시설에 대한 효율을 향상 시켜 적은 마진으로 정밀하게 제어할 수 있도록 발전하고 있다. 하지만 적은 마진으로 전력계통을 운영함에 있어 대규모 정전 사태인 광역정전의 위험에 노출 되어 있다.

NERC(North America Reliability Council)의 정전 기록 분석결과에 따르면 800[MW] 이상의 대형 정전사고는 높은 빈도로 발생되고 있는 것으로 나타나고 있다. 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[1], 운영자의 실수[2], 제어시스템 통신실패, 보호계전기의 고장[3]등의 원인으로 인하여 생기는 광역정전은 막을 수가 없었다. 과거의 광역정전 사례 분석을 보면 적절한 시기에 크지 않은 부하를 차단하거나 보호계전기의 동작을 제어 할 수 있었다면 대부분의 광역정전을 막을 수 있었을 것이다.[4]

이와 같이 광역정전의 많은 원인들 중 보호계전기의 동작이 중요한 부분을 차지한다. 계통의 고장 혹은 외란에 의해 선로가 탈락되고 이로 인하여 과부하가 발생하여 보호계전기의 동작 그로 인하여 광역정전으로 발전한 경우가 대부분이었다. 사례분석 결과 보호계전기에 의한 영향이 전체 광역정전 사례중 75%에 달한다고 한다.[5]

이러한 대형 정전사고를 막기 위하여 적용형 거리계전기, 계전기 잠재고장에 대한 연구, 또한 멀티에이전트 시스템을 기반으로 취약성 산정 기법을 이용하여 전력계통에 자기복구 및 재구성 기능을 부여함으로써 광역정전을 막고자하는 SPID(Strategic Power Infrastructure Defense)[6]이라는 시스템도 개발되어 있다.

본 논문에서는 광역정전을 방지하기 위해서는 계통의 상태와 보호계전기의 동작을 사전에 예측하는 모니터링 시스템 구축 방법을 제안하고 있다. 이는 현재 많은 연구가 이루어진 GPS를 이용하여 동기화된 데이터 취득과 초고속 네트워크 기반의 데이터 전달체계를 활용하여 계

2.1 광역정전

광역정전은 예측 못한 사고에 의해 광범위한 정전구간이 발생하는 것으로 과거의 광역정전사례들을 살펴보면 2003년 North American 광역정전은 2대의 발전기가 탈락한 것을 시작으로 프로그램 오류가 발생한 가운데 계전기가 동작하여 선로를 차단하고 다시 과부하에 의한 계전기 동작으로 광역정전이 발생했다.

이러한 광역정전으로 진행은 자연 재해나 설비 고장에 의해 보호기기의 동작으로 고장이 제거 되고 고장 제거에 의한 조류 재분배가 이루어진다. 이때 선로에 과조류가 흐르게 되고 선로 과부하에 대한 계전기가 동작을 하고 캐스케이딩 현상으로 발전하면서 광역정전이 일어난다. 본 논문에서는 광역정전 징후 감시 시스템을 1.6초의 시간딜레이를 갖는 후비 보호 목적인 거리계전기 Zone 3 영역 동작을 중심으로 계통의 상태를 감시하고 또한 전력 설비의 부분적 탈락으로 인한 과부하 선로의 거리계전기 동작 시간을 예측 알고리즘을 적용한 모니터링 시스템을 설계하였다.

민감도 지수(Sensitivity Factor)를 이용한 예측 알고리즘을 적용해 취약도 지수(Vulnerability Index)를 이용하여 사고에 의한 계통 구성이 변할시 위험도를 산출해 감시 우선순위를 결정하고 또한 과부하에 대한 거리계전기 동작 시간을 예측하여 모니터링 시스템에 적용해 설계함으로써 캐스케이딩 현상에 대한 문제를 초기에 해결 할 수 있을 것이다.

2.2 선로 위험도 산출 기법

전력 계통의 단일 고장 혹은 다중 고장이 최악의 경우 Cascading 현상을 일으켜 광역정전으로 발전될 수 있다. 하지만 대부분의 광역정전은 초기 고장이 발생 하였을 때 적은양의 부하차단과 같은 단순한 제어로 방지할 수 있는 것이었다. 이러한 제어를 할 수 있게 하려면 사고에 의한 선로 탈락 혹은 발전기 탈락에 의한 계통의 일부분의 변화가 있을 때 각 선로에 흐르는 조류 변화량을 예측하여 운영자에게 그 정보를 전달 해 주었다면 광역정전으로 발전하는 것은 막을 수 있었을 것이다.

취약도는 전력 계통에 있어서 예측하지 못한 사고에 의해 선로 탈락이 일어났을 때, 연계 선로에 미치는 영향에 따라 추가적으로 생길 수 있는 선로 탈락률을 수치

화 하는 것이다. 이러한 취약도 지수는 선로의 과부하정도, 전압의 크기 및 위상차, 전류의 크기 주파수 등을 이용하여 산출할 수 있다.

본 논문에서는 선로 탈락에 의해 건전 선로에 유효전력만을 고려하였다. 이는 탈락된 선로에 흐르던 유효전력이 타 선로로 유입되므로 타 선로의 과조류로 인한 거리계전기 동작 확률이 커지게 되므로 선로의 중요도를 대표한다고 할 수 있다. 본 연구는 선로 탈락에 대한 유효전력을 이용하기 위해 민감도 지수(Sensitivity Factor)를 이용한 조류 예측 알고리즘을 이용하여 적용하였다.

2.2.1 민감도 지수(Sensitivity Factor)

본 논문에서는 민감도 지수(Sensitivity Factor)를 이용하여 계통의 변화에 대한 조류 변화량을 예측하여 적용하였다. 민감도 지수는 발전기나 선로의 탈락에 대한 다른 선로의 조류 변화 정도를 나타내는 지수로 2가지로 나눌 수 있다. LODF(Line Outage Distribution Factor)와 GSF(Generation Shift Factor)로 선로에 대한 민감도와 발전 모선에 대한 민감도 2가지로 나눌 수 있다.

LODF는 선로 탈락에 의한 타 선로의 조류 변화 정도를 수치화 한 것으로 (1)식과 같다.

$$d_{i,k} = \frac{x_k (X_{in} - X_{jn} - X_{im} + X_{jm})}{x_k - (X_{nn} + X_{mm} - 2X_{nm})} \quad (1)$$

x_k : 선로 k의 리액턴스
 X_{ab} : a,b번 X matrix 요소
 i,j : 선로 l에 연결된 버스 number
 m,n : 선로 k에 연결된 버스 number

GSF는 계통에의 발전기 탈락과 같은 발전 모선의 전력 변화에 대한 타 선로의 조류 변화 정도를 수치화 한 것으로 (2)식과 같다.

$$a_{i,g} = \frac{1}{x_i} (X_{ng} - X_{mg}) \quad (2)$$

i : 선로 number
 g : 모선 number
 x_i : 선로 l의 리액턴스
 X_{ab} : a,b번 X matrix 요소
 m,n : 선로 k에 연결된 버스 number

위에서 설명한 두 요소를 이용하여 계통의 일부분의 변화에 대한 타 선로의 조류 변화 예측은 (3)식과 같다.

$$\hat{P}_i = P_i + a_{i,g} \Delta P_g + d_{i,k} \Delta P_k \quad (3)$$

\hat{P}_i : 선로 k 탈락 후 선로 l에 흐르는 조류
 P_i : 선로 k 탈락 전 선로 l에 흐르는 조류
 ΔP_g : 발전 모선 g의 조류
 ΔP_k : 선로 k의 조류

2.2.2 취약도 지수(Vulnerability Index)

취약도 지수는 위 2.2에서 설명한 바와 같이 여러 가지 요소들을 이용할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 선로 탈락에 중요한 영향을 끼치는 유효전력만을 고려하였다.

취약도는 크게 2가지 유형으로 나눌 수 있다. 첫 번째로 한 개의 선로가 탈락 했을 때 계통의 나머지 부분의 영향 정도, 두 번째 한 개의 선로와 선로 탈락 시 영향을 많이 받는 인근 선로의 탈락 시 영향 정도이다. 타입 2는 선로의 사고 발생 시 주 보호 계전기의 기계적 고장 등으로 오부동작을 했을 때 후비보호계전기의 동작으로 2개의 선로 탈락과 또는 선로 탈락에 의한 과도 현상 시

계전기 동작으로 탈락 하는 경우 등을 고려한 사항이다. 각 타입에 대한 취약도는 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$VI_{ij} = \sum_{n=1}^k (EF_{nm})_{(n \neq m)} \quad (4)$$

i, j, n, m : Bus Number
 k : Total Bus Number
 EF_{nm} : nm선로의 영향도

취약도는 영향도의 합으로 나타내는데 영향도는 다시 3가지의 지수의 곱으로 나타낼 수 있다.

$$EF_{nm} = w1 \cdot w2 \cdot w3$$

$w1$: 탈락률 지수
 $w2$: 과부하율 지수
 $w3$: 2차 영향정도

본 논문에서는 영향도를 탈락률 지수, 과부하율 지수, 2차 영향정도를 이용하여 계산한다. 탈락률 지수는 선로의 탈락확률을 나타내는 지수로 선로의 과조류에 대한 계전기의 동작을 0~1까지로 나타낸다. 과부하율 지수는 그 선로의 조류가 많이 흐르면 그에 비례하여 선로 탈락 시의 영향정도가 증가함을 나타내는 지수이다. 마지막으로 2차 영향정도는 과부하 정도로 큰 조류가 흐르던 선로가 탈락하게 되면 그에 비례하여 계통에 영향을 미친다. 이를 2차 영향정도로 이용하여 취약도를 계산하였다.

이렇게 산출된 취약도는 자기 선로의 탈락에 대한 위험도를 산출한 것으로 그 선로에 대한 감시 정도를 나타내는 지수로 이용 할 수 있다. 이는 계전기와 같은 기기는 필히 점검을 해야 하지만 방대한 양의 기기임으로 운영자가 감시하는 모니터링 시스템에 취약도를 위험도로 이용하여 점점 우선순위를 효과적으로 표현 할 수 있다. 또한 계통 제어하는데 필요한 지수로 이용될 수 있다.

3. 거리계전기 모니터링 시스템 설계

본 연구에서 설계한 거리계전기 모니터링 시스템은 실시간 데이터를 이용한다. 이 데이터는 GPS를 이용한 동기화된 데이터를 I-PIU에서 취득하고 이를 적용하였다.

3.1 I-PIU(Intelligent Power Information Unit)

I-PIU는 전력계통의 변전소에 계속 장비로 위성을 이용하여 시간 동기화를 이룬 전압, 전류, 주파수, 위상각, CB동작 여부 등의 계통의 정보를 초고속망을 이용하여 정보를 전달 해준다. 현재 I-PIU는 IEEE 37.118의 표준화에 맞춰 데이터양과 종류를 취득하여 실효치 전압의 크기와 위상각, 전류의 크기와 위상각을 취득하고 있다.

본 논문에서는 I-PIU를 통해 위성 시간 동기화된 실시간 계통정보를 취득하여 거리계전기 감시 모니터링 시스템에 적용이 가능하다는 가정을 두고 시스템을 설계하였다.

3.2 모니터링 시스템의 기능

<그림 1>은 거리계전기 모니터링 시스템 설계 구성을 나타낸다. 또한 단일 사고에 의한 선로의 탈락 후 과부하에 따른 위험 선로 표시를 시스템에 표현 하였다.

모니터링 시스템은 고장이 발생하여 계전기 동작이 이루어지면 I-PIU에서의 전송 받은 CB 데이터를 이용해 표시해 주고 실시간데이터에 의해 선로 한계량의 80%의

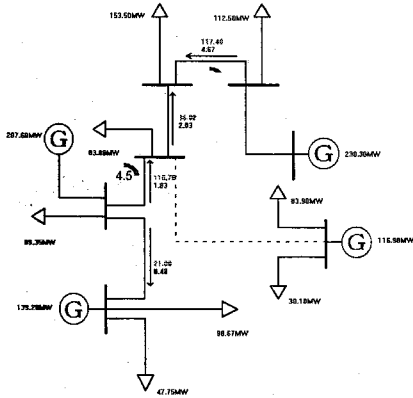


그림 1 모니터링 시스템

조류가 흐르면 노란색의 경고 표시를 해준다. 또한 선로 탈락에 의한 거리계전기의 동작위험을 원 표시를 이용하여 운영자에게 효과적으로 알려준다.

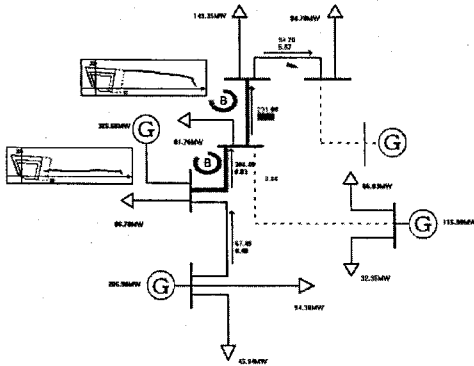


그림 2 선로 과부하일 때 모니터링 시스템

<그림 2>은 2개의 선로를 탈락 하였을 때의 모습이다. 2개 선로의 탈락으로 다른 2개의 선로의 거리계전기 임피던스 제적이 Zone 3 영역에 접근하게 된다. 이는 사고가 아닌 과조류에 의한 후비보호용 거리계전기 Zone 3영역의 동작을 예상해 연구된 바가 있는 적응형 거리계전기의 이용을 통한 거리계전기 Blocking을 한 모습이다. 마지막으로 취약도 취약도 위험정도는 계통의 조류가 변화할 때 또는 계통의 구성이 변화 할 때마다 알고리즘을 통해 위험정도를 산출하여 계통에 표시 함으로써 운영자에게 알려 준다.

3.2 거리계전기 동작시간 표시 기법

거리계전기 동작시간 예측 알고리즘은 디지털 데이터에 대한 수치해석을 통한 거리계전기 임피던스 제적의 경로를 예측 알고리즘을 이용하였다. 또한 Zone 3에 대한 동작시간 딜레이를 추가 하여 동작시간을 예측하였다.



그림 3 거리계전기 임피던스 제적 표시 기법

<그림 3>은 거리계전기 임피던스 제적에 대한 위험도

를 연속적인 원표시를 이용하였다. 이는 거리계전기 동작에 대한 신속한 대응을 위해 운영자에게 빠른 인식을 요구하는데 적합하다. 또한 거리계전기의 동작시간 예측은 <그림 4>에 나타내었다. 거리계전기 동작시간을 표시 하여 운영자에 의한 제어와 계통의 상태를 예측하여 광역정전 발생에 대한 대책을 마련하는데 도움이 될 수 있다.



동작 시간 표시

동작 블러킹

그림 4 거리계전기 동작 예측 시간 및 블러킹 표시 기법

3.3 거리계전기 모니터링 시스템의 역할

본 논문에서 제안하는 모니터링 시스템은 CB동작 여부와 선로 정보와 같은 기본적 데이터를 이용한 위험예측 기능을 가지고 있기 때문에 운영자에게 계통의 위험을 빠르게 알려주어 계통 제어를 위한 시간적 여유를 주고, 또한 실시간 계통 정보를 이용한 위험도 표시 기능은 운영자로 하여금 부하 차단 혹은 계전기 동작을 제어함으로써 광역정전은 물론 캐스캐이딩 현상도 막을 수 있는 효과를 가져 올 수 있다. 마지막으로 본 연구의 거리계전기 모니터링 시스템은 전력계통에 동기화된 데이터를 이용한 감시 시스템임으로 광역정전에 대한 분석을 용이하게 하는 역할을 할 것으로 기대된다.

3. 결 론

본 논문에서는 북미 유럽의 대정전 사태와 같은 광역정전을 방지하기 위해 광역정전의 주요 원인이 되는 거리계전기의 감시를 위한 모니터링 시스템을 설계하였다. 이 시스템은 I-PIU를 이용하여 실시간 데이터를 취득한다는 가정 하에, UI(User Interface)를 설계를 통해 오퍼레이터가 실시간으로 송전계통의 위험 요소를 감시하여 계통을 안정적으로 운영 할 수 있도록 역할을 할 것이다. 이를 위하여 본 논문에서는 SF와 VI를 이용하여 계통의 위험도를 나타내는 방법의 시스템을 설계하였다.

향후에는 광역정전 현상도 이 감시 시스템을 이용하여 방지할 수 있는 모니터링 시스템이 되도록 계속해서 연구가 진행 될 것이다. 본 연구의 결과로 송전계통의 실시간 분석은 물론이고 광역정전에 대한 분석이 가능해지고 더 나아가 광역정전 방지 대책에 대한 연구에 도움이 되기를 기대한다.

감사의 글

본 연구는 에너지자원 인력양성 사업의 전력IT 인력양성 사업 지원으로 수행되었으며(전력IT 인력양성 사업 센터), 과학기술부/한국과학재단 우수연구센터 육성사업의 지원으로 수행되었음(차세대전력기술연구센터)

[참 고 문 헌]

- [1] Gregory S. Vassell, Fellow, IEEE, "Northeast Blackout of 1965", IEEE Power Engineering Review, pp.4-8, January 1991.
- [2] "NIGHT OF TERROR", TIME, pp. 24-26, July 25, 1977.
- [3] C. W. Taylor, "Improving Grid Behavior", IEEE Spectrum, pp. 40-45, June 1999.
- [4] Massoud Amin, "Toward Self-Healing Energy Infrastructure Systems", IEEE Computer Applications in Power, 2001.
- [5] 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.
- [6] C. C. Liu, J. Jung, G. T. Heydt, V. Vittal, and A. G. Phadke, "The strategic power infrastructure defense (SPID) system: A conceptual design," IEEE Control Systems Magazine, vol. 20,issue 4, pp. 40-52, Aug. 2000.