

송전계통 보호계전기 취약도 평가

진보건* 이승재* 김상태** 이동철**
명지대학교 차세대 전력기술연구센터* 한전KDN(주)**

Impact of hidden failure analysis of protective relay in transmission system

Bo-Gun Jin* Seung-Jae Lee* S.Tae Kim** Dong-Chul Lee**
Myungji University NPTC* Korea Electric Power Data Network**

Abstract - This paper presents an vulnerability index for hidden failure of protective relays in transmission system. The bad influence can be quantized by a vulnerability index. When there is mis-operation, no-operation or mis-setting, power flow can be quantized by an index. According to the index, relays can be resetting. So the wide area blackout can be prevented.

1. 서 론

전력계통은 발전기, 부하 및 송전선로 등 구성요소 일부의 탈락이 전체 시스템 붕괴로 이어지는 것을 막기 위하여 비상상태 견딜 수 있도록 안전도(Security)를 유지하여 운전하고 있다. 그러나 후비계전기 오정정, 오퍼레이터의 실수, 제어시스템 통신실패, 보호계전기 고장 등의 원인으로 비상상태가 되면 광역정전으로 진행될 수 있다.[1][2] NERC(North America Reliability Council)의 정전기록 분석결과에 따르면 800[MW] 이상의 대형 정전사고는 매우 높은 빈도로 발생되고 있는 것으로 나타나고 있다.[3] 이를 방지하기 위해서는 여러 개의 설비가 동시에 고장 나더라도 견딜 수 있도록 충분한 여유를 두어야 하는데 이는 막대한 시설비가 소요되므로 경제적인 관점에서 현실적인 대안이 되지 못한다.

전문가들의 분석결과에 따르면 과거의 광역정전 진행 과정에서 적절한 시기에 크기 않은 양의 부하를 차단했다면 대부분의 광역정전을 막을 수 있었다고 한다. 이를 실현하기 위하여 최근에는 GPS를 이용한 동기화된 데이터 취득과 초고속 네트워크 기반의 데이터 전달체계를 활용하여 광역정전의 진행과정에서 데이터 취득, 제어계획 수립 및 계통변경을 통하여 안전도를 유지하는 광역디펜스 시스템의 연구가 다양하게 진행되고 있다.

보호시스템의 잠재고장(Hidden Failure)이 광역정전에 미치는 영향에 관한 연구도 진행되었으며 잠재고장은 평상시에는 나타나지 않다가 단일 비상사태(Single Contingency)가 발생한 경우에 나타나서 추가적인 선로 차단으로 다중 비상사태(Multi Contingency)를 일으키므로 계통 안전도(Power System Security)에 미치는 위험성이 매우 크다.[4] NERC는 SPS(Special Protection System) 또는 RAS(Remedial Action Scheme)를 전력계통의 비정상상태를 검출하고 정상적인 기능을 수행할 수 있도록 Corrective Action을 수행하는 시스템으로 정의하고 있다.[5] 델타 에이전트 시스템을 기반으로 취약성 산정 기법을 이용하여 전력계통에 자기복구 및 적응형 재구성 기능을 부여함으로써 광역정전을 막고자하는 SPID(Strategic Power Infrastructure Defense)이라는 시스템도 개발되어 있다.[6]

기존 광역정전사례를 살펴보면 1965년에 발생한 Northeast 광역정전의 원인은 230kV 선로의 후비 과전류 계전기의 오정정에 따른 오동작이 그 이유이며 이

후 타선로의 과부하로 인하여 기기들의 오·부동작이 이어지며 광역정전이 발생되었다. 1977년에 발생한 New York 광역정전의 원인은 345kV 선로에 낙뢰로 인하여 2개 선로 차단됨으로 시작되었으며 이때 선로의 계전기는 정동작하였다. 발전기 탈락으로 인하여 과 조류가 발생하고 이로 인하여 광역정전 발생하였다. 1998년에 발생한 Hydro Quebec 광역정전 사례는 눈과 비 그리고 낙뢰로 인하여 변전소가 차단되었고 그로 인하여 과부하가 발생하여 Load shedding을 시도하였으나 통신에 문제가 발생하여 광역정전이 발생하였다. 2003년에 발생한 North American 광역정전은 알 수 없는 이유로 2대의 발전기가 탈락하고 프로그램 오류가 발생한 가운데 선로 고장으로 인하여 계전기가 동작하여 선로를 차단하여 계통에 과부하가 발생하여 계전기가 동작하고 이로 인하여 광역정전이 발생하였다.

이와같이 대정전의 원인을 분석해보면 계통의 고장 혹은 외란시 선로가 탈락되고 이로 인하여 과부하가 발생하고 이로 인하여 보호계전기가 동작하여 광역정전으로 발전한 경우가 대부분이었으며 계전기의 동작이 정상적인 동작이라 할지라도 그로 인하여 선로에 더욱 큰 과부하가 걸리게 되고 이로 인하여 또 다른 선로의 차단을 야기하게 되어 광역정전으로 발전한 경우가 대부분이며 한 연구결과에 따르면 보호계전기에 의한 영향이 전체 광역정전 사례 중 75%에 달한다고 한다. 따라서 광역정전을 방지하기 위해서는 선로의 과부하 발생시 보호계전기의 오동작을 방지하는 것이 매우 중요하다.

본 연구에서는 계전기의 위험정도를 정량화하여 제시함으로써 계전기의 위험정도를 평가하고 그 수치를 이용하여 이를 이용하여 계전기의 잠재고장(오·부동작 및 오정정)에 의한 피해를 미연에 방지할 수 있다.

본문의 구성은 계전기 잠재고장시의 영향에 대하여 분석하고 이를 바탕으로 취약도 지수에서 각 수치의 의미 및 계산방법을 설명하고 제한한 수치가 취약도를 나타내는데 타당함을 보였다.

2. 본 론

2.1 보호시스템의 구성

전력계통의 보호시스템은 주보호와 후비보호로 이루어져 주보호 계전기의 고장 혹은 다른 이유로 동작하지 못할 경우 후비보호가 동작하여 고장을 제거하도록 구성되어 있으며 보호설비는 송전선로, 모선, 차단실패, 변압기가 있다.

표 1은 154[kV] 계통 보호계전방식을 정리한 것이며 송전선로의 단락 및 지락보호의 주보호에는 방향비교 트립 저지 방식 또는 PCM 전류 차동 방식이 적용되고 있으며 후비 보호로는 3단계 한시거리계전방식이 이용되고 있다.

표 1. 154[kV] 계통 보호계전 방식

보호 설비	주보호	후비보호	
송전선로	·방향비교방식	거리계전방식 (3단계 한시)	
	·전류차동방식(P/W)		
	·전류차동방식(PCM)		
모선	2중모선 단모선	전류차동방식 전압차동방식	
차단 실패	·선로보호계전기 ·Timer	-	
변압기	전류비율차동 방식	154kV	·과전류계전방식 ·지락과전류계전 방식
		23kV	

모선보호에는 2중 모선인 경우 위상비교 전류 차동 방식이 적용이 되고 있으며, 단모선인 경우 전압 차동 방식을 사용한다. 또한 고장발생시 차단기가 동작하지 못할 경우 인접차단기를 트립시켜 고장을 제거한다. 변압기의 단락 및 지락고장 주보호로는 전류 비율 차동 계전기가 적용되고 후비보호로는 단락고장보호에 과전류 계전방식이 쓰이고 있으며 지락고장 후비 보호로 지락 과전류 계전방식이 쓰이고 있다.

2.2 보호 취약도

보호 취약도란 계통에 고장혹은 외란이 발생하였을때 계전요소의 오정정이 계통에 미치는 악 영향을 수치화한 것이다.

2.2.1 계산 대상

취약도의 계산 대상은 154[kV] 계통 보호계전기를 대상으로 하였으며 보호계전기의 오·부동작, 오정정시 계통에 미치는 영향을 분석하여 이를 정량화 하였다.

2.2.2 오·부동작 및 오정정시 계통영향

보호기기가 오·부동작 혹은 오정정으로 인하여 계전기가 정동작하지 않으면 건전구간이 탈락하게 된다. 오정정시에는 고장의 위치 혹은 오정정에 따라 다르며 예를 들어 거리계전기의 Zone1 리액턴스요소가 크게 오정정되어 있는 경우를 살펴보면 다음과 같다.

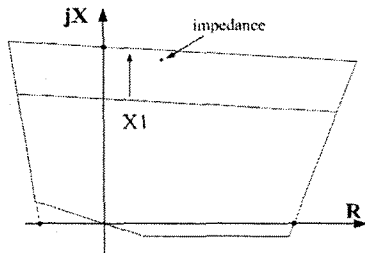


그림 1. Zone1 임피던스 다이어그램



그림 2. 선로 고장 및 동작 계전기

그림 2에서 검정색 위치의 거리계전기 Zone1 리액턴

스 요소가 그림 1과 같이 크게 오정정되어 있고 다음구간에 고장이 발생하고 앞구간의 PCM 주보호계전기가 동작하지 못한 경우 앞구간의 거리계전기 Zone1이 동작하여 고장을 제거하게 되고 오정정된 거리계전기가 계산하는 임피던스는 그림1의 impedance와 같이 되어 거리계전기의 Zone1요소가 동작하여 그림 2와 같이 2구간이 계통에서 탈락하게 된다.

Zone1요소가 작게 오정정된 경우를 살펴보면 다음과 같다.

거리계전기 Zone1 리액턴스 요소가 작게 오정정되어 있고 자구간에 고장이 발생하고 PCM 주보호계전기가 동작하지 못한 경우 오정정된 거리계전기가 계산하는 임피던스는 동작구간에 들어오지 못하여 거리계전기 Zone1이 동작하지 못하게 되고 거리계전기의 Zone2요소가 동작하여 뒷단의 Zone2와 함께 동작하게 되어 오정정 계전기가 뒤쪽 모선에 연결된 모든 선로가 계통에서 탈락하게 된다.

이와같이 154[kV]의 보호계전기의 계전요소를 분석하고 이를 정리하여 그 영향을 분석하였다.

2.2.3 탈락 유형에 따른 분류

계전기의 오류(오·부동작 및 오정정)시 그 오류에 따라 탈락선로가 다르게 나타난다. 위의 정정요소 오류시 탈락구간을 분석해보면 오정정으로 인한 탈락선로가 동일한 유형으로 나타나는 오정정요소를 발견할 수 있으며 이를 바탕으로 발생하는 탈락선로의 유형으로 구분하여 이를 분석하면 많은 수의 정정요소를 일일이 분석하지 않고 오류시 어떤 유형에 해당하는지에 대한 정보만으로 몇 가지 탈락선로 유형만을 분석함으로써 계전요소의 취약도를 계산할 수 있다.



그림 3. 탈락구간 유형 1

그림 5는 탈락구간 유형1로써 고장이 존재하지 않으나 계전기의 오동작으로 인하여 1개 선로가 탈락된 경우이다.



그림 4. 탈락구간 유형 2

그림 6은 고장으로 인한 1개 선로의 탈락과 뒷단 혹은 앞단 계전기의 오동작으로 인하여 1개 선로가 탈락되어 총 2개 선로에 정전이 발생한 경우이다.

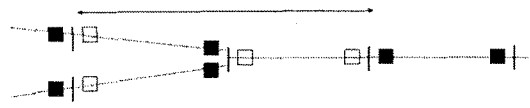


그림 5. 탈락구간 유형 3

그림 7은 고장으로 인한 1개 선로의 탈락과 관련된 한쪽 계전기의 부동작으로 인하여 1개 모선에 연결된 모든 선로가 탈락한 경우이다.

2.2.4 취약도 지수

계전기 혹은 계전요소에 잠재고장이 발생하여 탈락구간이 발생한 경우 계통에 미치는 영향을 계산하고 정량화 하기 위해서는 이를 판단할 수 있는 지수가 필요로 하며 이러한 지수들을 통합하여 하나의 수치로 나타내어야 하며 이를 나타낼 수 있는 지수로는 전류, 전압, 전력등 많은 수치들이 존재한다.

본 논문에서는 보호시스템에 잠재고장 존재시 발생하

는 악영향을 정량화하기 위하여 과부하율을 제안하였으며 이는 선로에 흐르는 전류를 이용하여 수치화 한 것으로 보호 시스템의 오류시 탈락구간이 발생하고 그 결과로 선로에 흐르는 조류가 변화하게 되어 발생하는 과조류의 위험정도를 측정하는 수치로 이용하였다.

$$OL = \text{현재조류} / \text{허용조류} \quad (1)$$

여기서 OL : 과부하율

수식(1)은 과부하율을 나타내는 수식이며 이를 이용하여 한 선로에 위험정도를 측정하였다.

$$VI_{Loc} = \text{Max}(VI_{Ry}) \quad (2)$$

$$VI_{Ry} = \text{Max}(VI_E) \quad (3)$$

$$VI_E = \sum(OL) \quad (4)$$

여기서 VI_{Loc} : 계전위치의 취약도
 VI_{Ry} : 계전기의 취약도
 VI_E : 계전요소들의 취약도

수식 2 ~ 4에서 계전요소의 잠재고장시 과부하율을 합하여 계전요소의 취약도를 계산하고 계전기에 존재하는 계전요소들의 취약도중 가장 큰 값이 계전기의 취약도가 되며 임의의 위치에 존재하는 계전기의 취약도중 가장 큰 값이 그 위치에서의 취약도가 되며 이는 임의의 한 위치의 보호계전 시스템에서의 취약도 계산 지수를 나타낼 수 있다.

보호계전기에는 여러 계전요소가 존재하며 이 계전요소중 잠재고장이 존재하여 선로 탈락이 발생하면 이때 과부하율을 계산하고 이중 가장 큰 값이 계전기의 취약도가 되며 보호계전 시스템의 보호계전기의 취약도중 가장 큰 값이 임의의 위치에서의 취약도가 된다.

2.2 보호 취약도 계산 및 이용방안

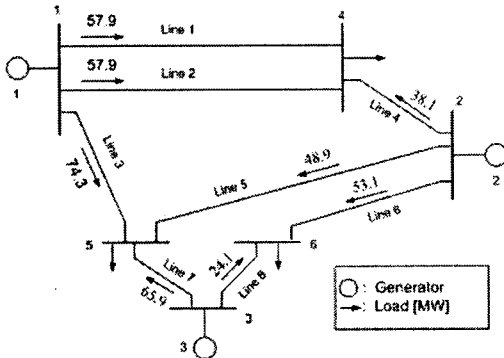


그림 6. IEEE 6 Bus System

그림 8은 IEEE 6 모선 계통을 나타내고 있으며 선로 1의 1번 모선측 거리계전기의 Blinder요소가 크게 정정된 경우와 Zone1 리액턴스요소가 크게 정정된 경우를 예로 설명하도록 하겠다.

Blinder요소가 크게 정정된 경우 부하가 늘어나게 되어 거리계전기가 자동작하게 되면 선로 1이 계통에서 탈락하게 된다.

이때 조류의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

표 2. 선로1 탈락시 조류변화

Line Num	2	3	4	5	6	7	8
Load(MW)	103	90	53	40	46	60	30

표 2는 선로1의 탈락시 조류변화를 나타내고 있으며 선로의 허용용량을 100(MW)라 가정하면 거리계전기

Blinder 요소의 취약도는

$$VI_{Blinder} = 103/100 = 1.03 \text{ 이 된다.}$$

다음으로 Zone1 리액턴스요소가 크게 정정된 경우 선로2에 고장이 발생하게 되면 선로1과 선로2가 계통에서 탈락하게 되고 이때 조류의 변화를 살펴보면 다음과 같다.

표 3. 선로1, 선로2 탈락시 조류변화

Line Num	3	4	5	6	7	8
Load(MW)	249	163	20	1	13	30

표 3은 선로1과 선로2의 탈락시 조류를 나타내고 있으며 Zone1 리액턴스요소의 취약도를 계산해보면

$$VI_{Z1X} = 149/100 + 163/100 = 4.12 \text{ 가 된다.}$$

선로1에 거리계전기의 취약도를 계산하면

$$VI_{DistanceRy} = \text{Max}(1.03, 4.12) = 4.12 \text{ 가 된다.}$$

이는 하나의 계전기에 두 개의 계전요소에서만 취약도를 계산하였으나 모든 계전기의 잠재고장시 취약도를 계산하면 위험 계전기 혹은 계전요소를 알 수 있으며 재정정 혹은 계전기의 상태를 재정정하여 잠재고장요소를 제거함으로써 광역정전의 발생을 미연에 방지할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 송전 보호계전 시스템의 잠재고장이 미치는 악영향을 정량화하는 방안에 대하여 제시하고 있으며 이는 잠재고장시 그 영향에 대하여 분석하고 계통에 미치는 악영향을 정량화 하였으며 이를 이용하여 계전기의 재정정 혹은 계전기의 상태확인을 통하여 광역정전의 발생을 미연에 방지할 수 있다.

감사의 글

본 논문은 산업기술평가원의 중기거점과제 연구비 지원에 의하여 수행되었음.(과제번호 10016681)

[참 고 문 헌]

- [1] "NIGHT OF TERROR", TIME, pp. 24-26, July 25, 1977.
- [2] 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.
- [3] Gregory S. Vassell, Fellow, IEEE, "Northeast Blackout of 1965", IEEE Power Engineering Review, pp. 4-8, January 1991.
- [4] A. G. Phadke and J. S. Thorp, "Expose hidden failures to prevent cascading outages", IEEE Computer Applications in Power, vol. 9, no. 3, pp. 20-23, July 1996.
- [5] North American Electric Reliability Council(NERC) Task Force on Electric System Reliability, "Final report of the maintaining reliability in a competitive U.S. electricity industry", September, 1998.
- [6] C. C. Liu, J. Jung, G. T. Heydt, V. Vittal, A. G. Phadke, "The strategic power infrastructure defense (SPID) system. A conceptual design", Control Systems Magazine, IEEE, Vol. 20, Issue 4, pp. 40-52, August 2000.