

전력계통 안정도를 고려한 계통보호 대책 연구

장병태·이소영·김정호·안정식, 양정재\*·강계희\*, 박종근\*\*  
 한전 전력연구원, 한국전력거래소\*, 서울대학교 전기공학부\*\*

A Study of System Protection with emphasis on Power System Stability

B.T.Jang S.Y.Lee K.H.Kim J.S.Ahn J.J.Yang\* G.H.Kang\* J.K.Park\*\*  
 KEPRI KPX\* Seoul National University\*\*

**Abstract** - This paper is to introduce the R&D project called "System Protection with emphasis on Power System Stability". The principal objective of this project is protection aids to system stability. The objects of this project are as follows. First, drawbacks of classical underfrequency load shedding and implementation issues of the rate-of-change of frequency will be described. Secondly, the project discusses the possibilities of voltage instability in power system and how this risk will affect protective relays in real system. Lastly, special protection system is designed to preserve system stability for KEPCO

1. 서 론

전력계통은 전기의 발전과 수송 및 소비량이 상시 균형을 이루어지도록 운용되는 다양한 수많은 전력설비들로 연결되어진 시스템이다. 전력계통의 운용에 있어서 주요한 목표는 소비자들에게 가능한 한 최소의 비용으로 신뢰할만한 에너지원을 제공하는 것이다. 기술자 관점에서 보면 계통 전반에 걸쳐 일정한 주파수와 전압을 유지하는 것이 임무이다. 이러한 유지를 하지 못했을 때 바람직하지 못한 결과와 설비 피해를 초래할 수가 있다. 계통에 설치된 설비의 형태 및 이들의 연결측면 관점에서 살펴보면 전력계통의 복잡성이 꾸준히 증가되었다. 전력계통의 규모가 커지고 복잡화되어 갈수록 왜란에 의한 대규모 광역정전 발생 가능성은 커진다. 따라서 전력계통 외란의 영향을 최소화하고 동기탈락 방지 등 계통안정 운전상태를 유지할 수 있는 능력을 제고시키는 대처방안이 더욱 절실히 요구된다. 새롭게 제시되고 있는 보호방식들은 주로 전력계통 안정도 향상과 안전 강화 목적으로 설계되고 있다. 이런 보호방식들은 선로나 설비보호 방식과는 다르기 때문에 반드시 특별한 장치나 보호영역에 적용되는 것은 아니지만 시스템 구조, 안전, 연계 등을 보존하거나 변경하도록 하는 보호 수단들이다. 우리나라 계통도 안정도 향상을 위하여 전력계통 설비 보강을 지속적으로 추진해 오고 있으나 계통보호 측면에서 안정도를 고려한 대책은 상대적으로 연구실적이 많지 않아 이에 안정도를 고려한 계통보호 측면의 연구를 통하여 계통 불안정시 계통보호 대책을 수립하고자 한다.

2. 본 론

2.1 부하차단에 의한 전력계통 안정화 방안

전력계통에서 전원, 부하탈락 및 송전선로 개방과 같은 전기적 사고시 수급 불균형이 발생하고, 수급 불균형은 주파수 저하 또는 주파수 상승과 같은 계통 주파수 이상 상태로 진행하게 된다. 일반적으로 주파수 이상 상승의 경우 발전기 출력 감발로 계통 주파수가 정상 상태로 복귀되어 계통의 안정화가 가능한 반면 주파수 이상 저하의 경우는 발전기 출력 증발의 제약으로 인하여 발전기 제어 계통에 의한 계통 주파수 정상 상태로의 복귀가 용이하지 않아 강제로 부하를 차단하여 계통 주파수

를 정상 상태로 복귀시키고 있다. 전력계통 사고시 발전력 부족으로 일어나는 계통 주파수 저하는 발전기 터빈 날개 손상을 일으키고 주파수 저하가 심화되는 경우는 터빈 및 발전기 보호를 위하여 발전기를 정지시키게 되고 발전기 정지는 수급 불균형 정도를 더욱 악화시켜 전 계통 붕괴 사고로 진행된다.

현재까지는 수급 불균형으로 계통 주파수가 저하되면 전체 전력계통을 일괄하여 저주파수계전기에 의한 저주파수 단계별 부하차단이 실시되도록 하고 있으나, 우리나라 전력계통은 지속적으로 대형화하는 추세에 있으며, 또한 단위 발전기 탈락으로 인한 계통 주파수저하는 미미하고 실제로 최근 수년간은 전체 계통주파수 저하로 인한 저주파수계전기 동작사례는 미미한 실정이다. 그러나 현재의 우리나라 전력계통은 주로 대단위 발전단지를 중심으로 지역적으로 계통분리 가능성이 있으며, 이러한 경우 예상되는 계통분리형태에 따라 지역별 발전력과 부하량을 고려한 적절한 부하차단 방식의 적용이 필요할 것으로 판단된다.

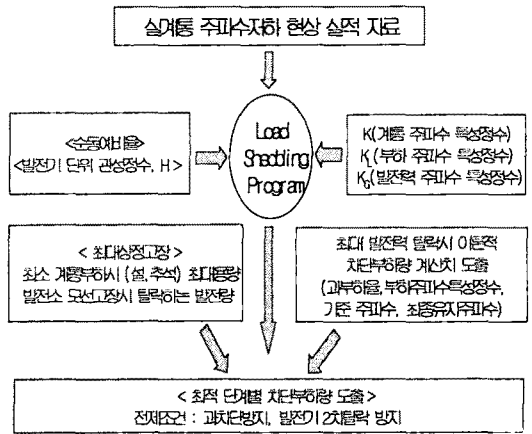


그림 1 실계통 적용중인 부하차단 절차

현재 운영되고 있는 실계통 부하차단의 수립 절차를 살펴보면 먼저 전체 대상 계통에 대해 최소 계통부하 조건을 선정하고 이 운전조건에서 연결된 최대용량 발전소의 모선고장시 연결된 발전기들이 모두 정지될 때 계통으로부터 탈락되는 발전량을 계산하고 과부하율 등을 이용한 이론적 차단부하량을 계산한다. 이렇게 산출된 계산량과 실계통에서 실제적으로 운전결과 취득된 주파수저하 사례 데이터를 이용하여 부하차단프로그램을 이용하여 계산하므로써 우리계통에서 차단되어야 할 부하차단 계획을 수립한다.

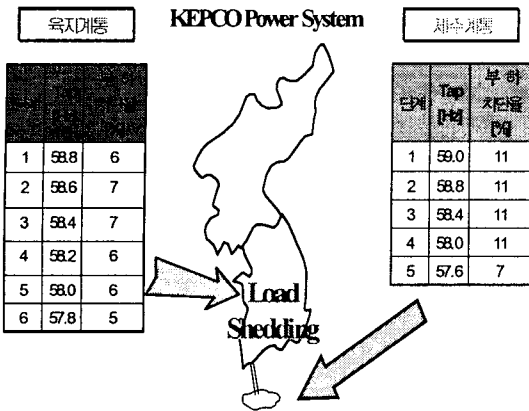


그림 2 부하차단 단계별 운용 현황

그림 2는 우리나라 계통에 적용되고 부하차단 단계별 운용 현황을 나타내고 있다. 부하차단 계획 수립시 고려되어야 할 주요 절차와 조건들은 사항은 다음과 같다

- 최대 예상 과부하율
- 부하차단 단계별 설정 수
- 각 단계시점에서 부하차단 해야 할 부하량
- 주파수 정정치
- 동작시간 지연 설정
- 주파수보호계전기의 설치 위치

고전적인 부하차단 방법은 다음과 같은 문제점이 발생 가능성이 있다. 실계통에 적용된 부하차단 수립은 임의의 상정사고 계통하에서 이루어졌기 때문에 실제적 계통운용에서는 과차단이나 부족차단을 발생할 수가 있으며 실제 계통의 전력조류가 미반영된 상태이므로 선로과부하 및 계통분리 가능성을 배제할 수 없는 실정이다. 따라서 실계통의 운전환경 및 동특성을 반영할 수 있는 부하차단 방식의 필요성이 대두되며 이의 연구를 앞으로 진행할 예정이다. 초기 왜란시의 주파수변화율을 이용하므로서 실계통의 동특성을 반영할 수 있는 예를 그림 3에 나타내고 있다.

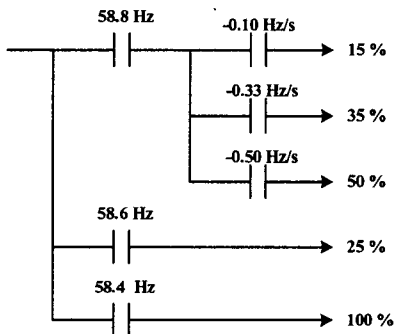


그림 3 주파수변화율을 이용한 부하차단 예시

## 2.2 긴급보호제어시스템을 이용한 안정화 방안

전력계통 안정도를 유지하는 장치로 설계되어진 보호시스템으로서 긴급보호제어시스템인 Special Protection System이 있다. 임의의 어떤 전력계통에서 계통성능 시뮬레이션을 실행하여 분석하면 중대선로나 전력설비에 대규모 왜란이 가해졌을 때 사고과급 등 광역정전을 일으키는 결과를 야기시킬 수 있는 사례가 있다. 이것은 중부하인 취약한 연계선로나 장거리 선로에 연계된 시스

템에서 발생할 수도 있다. 이것이 발생하면 시스템은 예측할 수 없는 상태로 분리될 수도 있고 대규모 발전과 부하의 불균형을 이루며 전력계통 분리 발생의 가능성을 지닌다. 이러한 불안정한 균형 분리는 존재할 가능성이 희박하지만 전체 정전을 야기시킬 수 있다. 이러한 정전 영향을 방지하는 한가지 방법은 부하와 발전사이의 합리적인 균형을 유지할 수 있도록 신뢰성있는 제어방식으로 양단의 시스템을 연계시키는 연계선로를 차단하여 계통을 분리하는 것이다. 이것으로 인하여 계통분리 후 새로운 안정된 계통의 운용 가능성이 증가한다. 이렇게 긴급보호제어방식은 임의의 사고를 유발시킬 수 있는 왜란에 대해서 특별히 설정된 명령에 의해서 실행되도록 설계되었다. 전형적인 왜란은 다음과 같다

- 송전선로 사고
- 선로의 연쇄 정전
- 발전기 정지
- 갑작스런 대규모 부하 변화
- HVDC 단극과 양극 정지
- 상기 항목들 간의 상호 조합

사전에 상정된 이벤트 왜란이 발생하였을 때 긴급보호제어시스템은 시나리오에 의해서 정해진 명령을 실행할 것이다. 이러한 예정된 명령은 시스템 특성에 대한 컴퓨터 연구에 기초를 두고 설계된다. 여기서 주의해야 하는 것은 긴급보호제어가 설계되지 않은 계통의 경우 초래될 수 있는 시스템 응답은 심각한 문제를 야기시킬 수 있는 것이다. 사전 설계된 긴급보호제어방식의 신속한 제어 명령들이 특별한 보호 긴급대책없이 계통 과급결과를 초래한 것보다 왜란 후의 안정한 시스템 상황을 제공할 수 있는 방안들이 실계통에 적용되는 사례가 점차 증가하고 있다. 이것은 부하 차단 또는 발전력 저하 등과 같은 정확한 명령들을 필요로 하지만 오히려 이러한 과감한 명령들이 전체 시스템 붕괴의 위험을 줄일 수 있다. 위에 언급된 이러한 제어보호방식의 형태는 SPS 이외에 다양한 이름으로 알려져 있으며 대부분 창시자에 의해 좌우되며 대표적인 예는 다음과 같다

- Special stability controls
- Dynamic security controls
- Contingency arming schemes
- Remedial action schemes
- Adaptive protection schemes
- Corrective action schemes
- Security enhancement schemes

이러한 보호방식들은 왜란 발생시 발생할 수 있는 문제의 유형에 따라 다양한 형태의 제어 명령을 제공한다. 대표적인 기능들을 살펴보면 일부 보호방식들은 발전기를 차단시키거나 또는 송전선로를 개방시키며 혹은 예정된 위치에서 계통을 분리시킨다. 이러한 보호방식들은 공통적으로 몇가지 특징을 가진다.

- ① 모든 시스템은 동적 안정화 보호제어시스템이다.
- ② 모든 시스템은 온라인 실시간 제어로 이루어지는 반면에 오프라인 분석에 의해 연구되었다. 이런 이유는 전력계통 응답이 일반적인 순차적인 제어시스템에 시간을 할당하기에는 너무 빠르다는 것이다. 이것은 다음과 같이 요약될 수 있다.
  - (a) 실시간 판측
  - (b) 왜란의 범위 결정
  - (c) 필요한 명령 결정
  - (d) 필요한 명령 실행

③ 이러한 보호방식들의 대부분은 특별한 시간영역대에 시스템의 필요성을 충족하기 위하여 필요유무에 따라 선택되기도 한다. 다른 말로 표현하면 특별 제어로직이 어떤 운전 상황하에서는 필요하지 않다는 것이며 이런 경우에 SPS는 갖추지 않는다.

④ 보호방식들의 모든 부분은 판측된 시스템의 긴박한 상황을 제어하여 안정화되도록 특별한 시스템을 제공하거나 또는 계통에 사고가 발생했을 때 그것의 결과 영향

이 무시하기에는 너무나 심각한 정도의 중대사고라고 계산되어질 때 사전 시나리오에 의해 계획된 명령들을 실행한다.

우리나라에 운전되고 있는 SPS의 실제 사례를 살펴보면 345kV 삼천포 화력발전소 모선에 연결된 345kV 송전선로 #1,2T/L 및 삼해 #1,2T/L의 4회선 중 3회선, 또는 4회선 모두 차단시 모선에 연결된 발전기들의 동기 탈조방지를 위하여 발전기 차단 및 발전기 감발은전이 되도록 긴급보호제어시스템이 신계통에 적용되고 있다. 이것은 대표적인 발생장소, 사고직전의 발전기출력 등으로 계통상태를 분류하여 계통상태별로 차단할 발전기대수를 미리 설정해두고 운용중에 사고가 발생하면 계통상태에 따라 미리 정해둔 발전기 대수를 차단하는 방식이다.

연구과제 수행을 통하여 부분적으로 국내에 적용되고 있는 사례와 국외에 알려진 SPS의 현황을 상세분석하고 이를 이용한 우리계통 대상으로 다양한 해석을 시행하여 우리나라 계통에 적합한 SPS의 기술규격 및 가이드라인을 제시할 계획이다.

### 2.3 전압불안정시 발송배전 보호계전기 응동현상 및 보호협조 방안 도출

전압붕괴는 하나 또는 그 이상의 복합적 상정사고에 의해 야기되어지며 주로 유효 발전력이나 송전설비(변압기나 송전선로)의 갑작스런 탈락, 무효전력의 적절한 공급없이 부하의 증가, 계통사고시 고장제거의 지연조치 등의 경우에 발생될 확률이 커다. 전력계통은 동적 시스템이며 다음과 같은 다양한 원인으로 인하여 계통의 변화가 발생할 수 있다. 수요나 발전의 변화, 선로 개폐, 썬어지와 사고, 부하량과 발전량의 수급에 기인한 느린 변화는 계통운용상에 항상 발생하며 정상상태 변화로 간주되어진다. 수 싸이클 이내가 주로 전부인 급속한 변화는 일반적으로 동적 상태로 분류한다. 빠르게나 느린 변화는 직접적으로 계통전압에 영향을 미치며 간혹 전압붕괴를 야기시키기도 한다. 전압붕괴는 보편적인 전력계전기 불안정 문제에 비해 상대적으로 흔히 느린 사고이다. 계통전압이 돌연히 또는 서서히 감소하기 시작하여 수초에 걸쳐 수분 또는 수시간까지 발생 가능하다. 현재 발전과 송전설비의 효율적 사용의 극대화를 위하여 송전선로에 보다 중부하가 실리면 전압붕괴의 가능성이 증가한다. 원거리 발전단으로부터 전송전력의 의존도가 증가할수록 송전선로와 관련된 무효전력 손실분은 전압안정도를 유지하기 위하여 지역의 무효전력 공급을 더 필요로 한다. 전력계통의 전압안정도는 대개 이용가능한 무효전력원의 양, 위치, 형태에 좌우된다. 무효전력 공급이 너무 멀리 있거나 크기 측면에서 불충분한면지 분포 커패시터에 너무 의존하면 상대적으로 일반적인 사고(선로정전, 갑작스런 부하증가)로 대규모 계통의 전압저하를 일으킬 수 있다. 전압안정도는 전력회사들이 계획단계에서 조사해야 하는 중요한 문제이다. 전압붕괴로부터 전력계통을 보호하는 방법들을 도출하기 위해서는 전력계통이 전압안정도 상실을 일으킬 수 있는 모든 상정사고들을 조사해야 하는 것이 절대 필요하다. 전력계통에 운용중인 전력설비를 보호하는 보호계전기들 중에서 계통의 서전압시 계전기 응동에 영향을 미칠수 있는 주요발송배전용 보호 항목들을 대략 살펴보면 서전압 부하차단, 발전기 후비보호, 여자기 과부하 보호, 보조기 보호, 후비 선로보호, 전압제어 과전류 보호 등이 있다. 서전압 부하차단의 경우 계통왜란이 발생하고 임의의 설정된 시간동안 임의의 설정된 크기까지 전압이 저하된다면 설정된 부하를 차단할 것이다. 이러한 부하차단계획 수립시에는 차단해야 할 부하의 양을 결정하고 부하의 우선순위를 결정하여야 하며 또한 부하차단의 단계별 시간을 결정하고 차단을 시작해야 하는 전압기준치를 결정해야 한다.

송전계통이 중부하일수록 전력계통의 전압불안정 가능

성은 더욱 증가하는 계통의 복잡화 추세에 비하여 전력계통의 전압붕괴시 보호계전기 동작 상관관계 연구는 상대적으로 연약한 현실이며 이에 대비한 신뢰할만한 보호계전기 성능이 요구되고 있는 실정이다. 보호계전기 기술 추세의 경향은 자동으로 동작하는 보호 알고리즘 및 제어 방식을 적용하여 전압붕괴의 위험을 최소화 할 수 있도록 보호계전기와 통신기술들을 활용하는 추세이다. 연구과제 수행을 통하여 전압불안정시 발송배전 보호계전기 응동현상 및 보호협조 방안을 도출하여 향후 전압붕괴시 보호계전기의 적용에 활용할 계획이다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 전력계통에 적용되고 있는 부하차단 수단의 환경변화에 대한 새로운 정책방안 도출과 국내에 사용되고 있는 긴급보호제어시스템의 우리 계통에 적합한 규격 및 가이드라인 제시 및 전압불안정시 발송배전 보호계전기 응동현상 및 보호협조 방안 도출을 위하여 한전 전력연구원과 기초전력공학공동연구소가 공동으로 수행하고 있는 전력계통 안정도를 고려한 계통보호 대책 연구과제를 소개한 것이다. 현재 본 연구과제가 수행중에 있으며 계통보호 측면의 전력계통 안정화 방안에 활용될 수 있을 것이다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] P.M. Anderson, "Power system protection," IEEE, Inc., 1999.
- [2] Damir Novosel, Khoi T. Vu, David Hart and Eric Udem, "Practical protection and control strategies during large power system disturbances", IEEE, 1996.
- [3] Khoi T. Vu, Carson W. Taylor, Kebede M. Jimma, "Voltage Instability: Mechanisms and Control Strategies" Proc. of IEEE, Vol.83, No.11, Nov. 1995.
- [4] Working Group K12 Protection aids to voltage stability, "System Protection and Voltage Stability" Jun. 1993.