

### 한전계통에서 저전압 부하차단의 기법 연구

이상호, 강상희, 이성진, 오화진, 장병태

#### A Study for the application of UVLS in KEPCO System

Sang-Ho Lee, Sang-Hee Kang, Sung-Jin Lee, Hwa-Jin Oh, Byung-Tae Jang

**Abstract** - 계통에 발생하는 불안정 현상을 억제하기 위한 방법으로 저주파수 부하차단과 저전압 부하차단이 있다. 저전압 부하차단은 저주파수 부하차단에 비해 지역적 특성이 강하기 때문에 일반적인 기준이 제시되어 있지 않다. 본 논문에서는 정적 모의를 통하여 저전압 기준치를 결정하는 기법을 제안하고 동적 모의를 통하여 이를 검증하고 시지연값도 결정하도록 하였다.

주요어 : 저전압 부하차단, 저전압 기준치, 시지연

#### 1. 서 론

전력계통을 운용함에 있어 가장 중요한 것 중에 하나가 항상 계통의 안정성을 유지하는 것이다. 정상시는 물론이고 어떤 사고가 발생하였을 때에도 사고의 파급을 막고 계통을 안정적으로 유지하는 것이 중요하다. 전력계통의 불안정 현상은 여러 가지가 있을 수 있는데, 크게 나누면 유효전력의 수급 불일치로 기인되는 위상각 안정도와 무효전력 수급 불일치로 야기되는 전압 안정도로 나누어 볼 수 있다. 유효전력 수급 불일치로 발생하는 불안정 현상은 계통 전반에 걸친 전력 수급 불일치이며 주파수의 변화로 나타난다. 이러한 불안정 현상을 해소하기 위해 저주파수 부하차단(Under Frequency Load Shedding: UFLS)을 시행하는 경우가 많으며 세계적으로 많이 채용되어 있다. 주파수는 전 계통에 걸쳐 같은 값으로 결정되기 때문에 어느 곳에서 측정하여도 같은 값으로 불안정 현상이 발생하는 저주파수 값을 하나로 결정할 수 있다. 그러나, 전압은 지역적인 특성이 강하기 때문에 지역적 혹은 전체적인 무효전력 수급 불일치에 의해 전체적, 혹은 부분적인 저전압이 발생할 수 있으며 이에 따라 각 지역별로 불안정 현상이 발생하는 전압값이 다르게 된다. 그러므로 저전압 부하차단의 경우는 측정 위치마다 전압이 다르기 때문에 모든 곳에 같은 전압 기준치를 사용할 수는 없다. 대상 지역에 따라 다른 기준을 설정할 수 있는데 지금까지는 거의 계통 운용 경험에 따라 결정되는 경우가 많았으며, 해외의 전력회사들도 경험적인 값을 바탕으로 저전압 발생시 대처 방안을 마련해 놓고 있다.[1-3] 몇몇 논문에서 이러한 저전압 부하차단의 기준을 제시하고자 하였는데 아직 확정된 방법은 없는 실정이다.[4-10]

저전압 부하 차단을 위해 검토되어야 하는 것은 여러 가지가 있다. 부하 차단을 수동으로 해야 하는지 자동으로 해야 하는지, 부하차단을 할 때 1회만 하는지 아니면 여러 회에 걸쳐서 나누어서 시행해야 하는지, 불안정 현상 모의에 어떠한 요소들이 포함되어야 하는지, 차단 시 시지연과 부하 복구 기준, 저전압 기준치 등을 검토하여야 한다. 본 논문에서는 이 중에서 가장 중요한 변수인 저전압 기준치와 시지연에 대해 검토하였다. 나머지 사항들은 2절에서 간단히 요약하였다. 저전압 기준치와 시지연을 동시에 구할 수 있으면 가장 이상적이지만, 불안정 현상은 동적 특성이 강하므로 이 두 가지 요소는 서로 영향을 줄 수 있기 때문에 두 값을 한번에 결정하는 것

은 어렵다. 본 논문에서는 저전압 기준치를 구하는 일반적인 방법을 제시하기 위하여 정적 모의에서 저전압 기준치를 구하는 방식을 제안하며 동적 모의에서 이 값을 기준으로 부하차단을 시행하여 기준치를 검증하며 이 값으로부터 시지연 값을 결정하는 방식을 취하였다.

#### 2. 저전압 부하차단 모의 시 고려사항

저전압 부하차단에 가장 중요한 것은 저전압 기준치와 시지연 값이지만, 실제로 부하차단을 시행할 때 자동 동작을 채용할 것인지, 여러 번으로 나누어 차단할 것인지와 불안정 모의 시 포함시키는 요소들과 부하 복구 기준 등도 결정하여야 한다. 본 연구에서는 이러한 사항들을 해외의 저전압 부하차단 사례들을 참조하여 다음과 같이 가정하였다. 저전압 부하차단은 불안정 현상을 억제하기 위한 것이므로 수동 동작을 통해서는 빠른 대응이 어렵기 때문에 자동 동작을 원칙으로 한다. 또한, 한 번에 차단 가능한 모든 부하를 차단하는 것은 큰 전압 스윙이 발생할 수 있기 때문에 한 번에 차단하는 양을 미리 결정하고 이를 여러 번에 반복 시행함으로써 그 충격을 줄이도록 한다. 불안정 모의 시 포함되어야 하는 요소들로 는 발전기 출력 한계, 변압기 동작, 커패시터나 리액터의 투입 등을 고려할 수 있다. 본 논문에서는 모든 모의에서 발전기의 출력 한계를 고려하였고 변압기의 동작은 없는 것으로 가정하였다. 커패시터나 리액터는 전압에 의존하는 특성을 가지고 있으므로 저전압시 투입하는 것은 큰 효과를 볼 수 없으므로 투입 여부를 배제하였다. 저전압 부하차단을 시행하기 위해 결정되어야 하는 것 중에 가장 중요한 것은 저전압 기준치와 시지연이다. 즉, 전압이 얼마 이하로 떨어지면 부하 차단을 시행하는냐는 것과 저전압이 발생되었다고 판단되면 언제 부하차단을 시행하는냐는 것이다. 전력계통의 모든 현상은 근본적으로 동적 현상이지만 동적 모의 자체가 어려운 경우가 많고, 동적 모의를 통해서만 일반적인 기준을 유도하기 어렵기 때문에 정적 모의를 통해서 일반적인 기준을 도출하고 동적 모의를 통해 이를 검증하는 방식이 많이 채용된다. 본 논문에서도 저전압 기준치에 대한 모의는 정적인 모의를 이용하며, 동적 모의에서 이 기준치를 검증하는 방식으로 진행하였다. 또한, 시지연의 결정은 동적 모의를 통하여 검토하였다. 모든 모의는 전력계통 모의 프로그램인 PSS/E를 사용하여 이루어졌으며 부하차단단의 효과를 확인하기 위하여 다른 제어 동작은 없는 것으로 가정하였다.

#### 3. 저전압 기준치 설정

##### 3.1 저전압 기준치 설정 과정

부하 차단을 위한 저전압 기준치 설정을 위해 정적 해석을 통한 기법을 사용한다. 먼저 모의에 사용될 부하 모델은 다음과 같이 정전력, 정전류, 정임피던스 형태로 가정하였다. ( $n1=0, n2=1, n3=2$ ) 실제 부하는 훨씬 복잡한

형태를 가질 수 있지만 정적 모의에서는 통상적으로 이러한 3가지 형태만 사용하여도 충분하다.

$$P = P_{load}(a_1 V^{n1} + a_2 V^{n2} + a_3 V^{n3}) \quad (1)$$

$$Q = Q_{load}(a_4 V^{n4} + a_5 V^{n5} + a_6 V^{n6}) \quad (2)$$

위의 부하 모델을 포함한 조류 계산으로부터 PV곡선을 유도하여 정적 안정도 한계점을 구해볼 수 있다. 계통 운용에 여유도를 주기 위해 여기에 최악의 상정사고를 가정한 조류계산을 통해 수정된 PV곡선을 유도할 수 있다. 수정된 PV곡선의 끝점이 상정사고를 고려한 정적 안정도 한계점이라 할 수 있다. 통상적으로 부하예측의 오차는 3%정도라고 알려져있다. 그러므로 상정사고를 고려한 정적 안정도 한계점으로부터 3% 정도의 여유도를 주어 저전압 기준치를 설정할 수 있다. 이 과정을 그림. 1에 나타내었다.

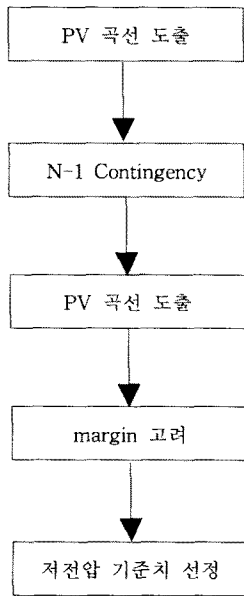


그림. 1 저전압 기준치 선정 과정

### 3.2 저전압 기준치 적용 검토

2005년도 한전계통을 대상으로 저전압 기준치 선정을 적용하였다. PV곡선은 정상상태시 가장 전압이 낮은 모선(#5645, 단양)을 선정하여 나타내었다. 대상지역은 수도권으로 하였으며 이 경우 최악의 상정사고는 765kV 송전선로 중 #1020(신가평)~#5010(신대백) 선로 탈락 사고이다. 수정된 PV곡선의 끝점은 12,623MW, 전압 0.937p.u이다. 여기에 3% 여유도를 주면 12,444MW(=13,623×0.97), 전압 0.96p.u이다. 한전계통의 경우 area가 9개로 나뉘어져 있으며, 수도권은 이 중 area 1, 2에 속한다. 다른 지역도 이와 비슷한 과정을 통해 저전압 기준치를 구해볼 수 있으며 저전압 기준치는 대략 0.94p.u~0.96p.u 정도로 나타남을 알 수 있었다. 그림. 3 은 area 4, 5에 대한 경우이다. 이 경우 저전압 기준치는 대략 0.945p.u.정도이다.

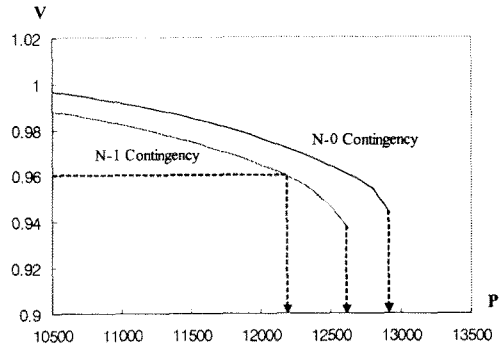


그림. 2 저전압 기준치 선정 과정 (area 1, 2)

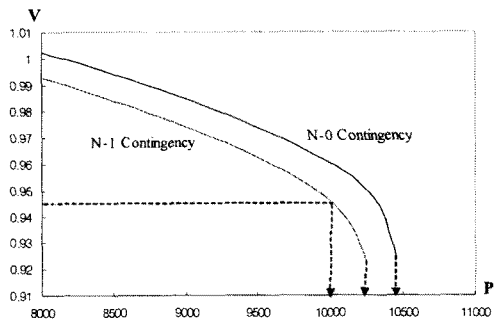


그림. 3 저전압 기준치 선정 과정 (area 4, 5)

## 4. 동적 모의에서의 검증

3절에서 제시된 저전압 기준치 설정을 검증하기 위해 동적 모의를 시행하였다.

### 4.1 수도권 지역

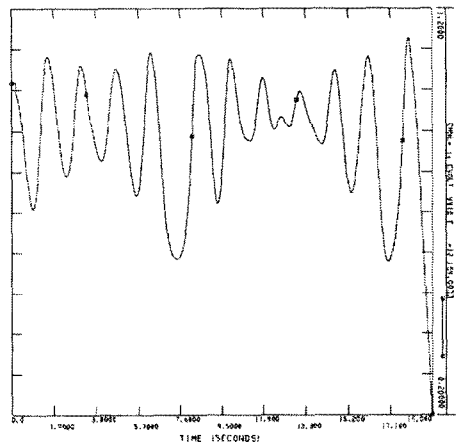


그림. 4 765kV 2회선 탈락 시 전압 파형

그림. 4는 신안성~신서산 간 765kV 2회선이 동시 탈락한 경우이다. 큰 전압 스윙을 보이다가 불안정해지는 경우이다. 이와 같이 큰 사고가 발생한 경우는 수 초 내에 부하 차단 등과 같은 안정화 동작을 취해야 한다.

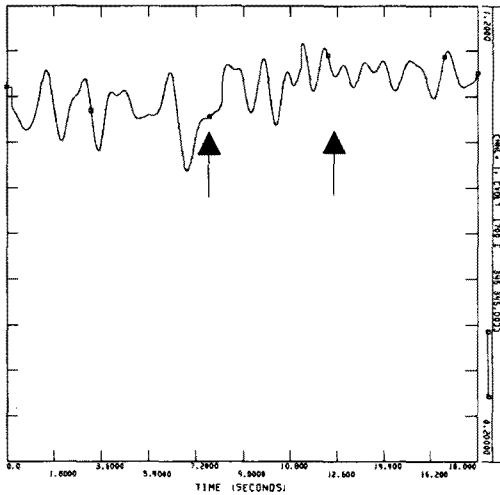


그림. 5 부하차단 시 전압 파형

그림. 5는 두 번에 걸쳐 area 1, 2 부하를 8초와 12초에 각각 20%씩 차단한 경우이다. 한 번의 차단으로는 불충분하여 두 번 부하 차단을 시행하여 안정화시켰다. 그림. 6은 신안성~신서산 765kV 1회선이 탈락하고 이 충격으로 약 2초 후에 추가적으로 인근 345kV 선로가 탈락된 경우이다. 이 경우는 앞의 경우보다 전압 붕괴 시간이 더 급박해서 빠른 부하차단이 필요하다.

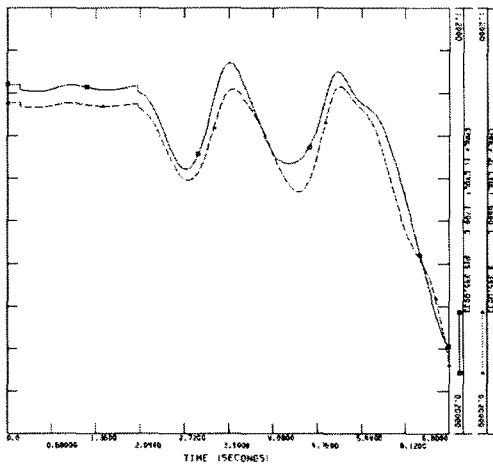


그림. 6 765kV 1회선과 345kV 1회선 탈락 시 전압 파형

그림. 7은 2초경에 사고가 난 후, 약 4초 후에 부하 20%를 차단하고 다시 4초 후에 부하 20%를 더 차단한 경우이다. 이 경우는 첫 번째 부하 차단에 의해 전압 붕괴는 어느 정도 차단된 상태이나 전압 스윙이 계속 존재하여 다시 부하 차단을 한 경우이다. 두 번의 부하 차단으로도 전압의 스윙이 완전히 잡히지는 않으며 두 번째의 부

하 차단은 좀 더 긴 시지연을 주어도 비슷한 결과를 보인다. 즉, 이 경우는 부하 차단만으로는 완전한 복구가 힘들다. 이 경우처럼 큰 사고가 난 경우는 부하 차단만으로는 완전한 복구가 힘들며 다른 제어 동작과 협조가 필요한 것으로 보인다.

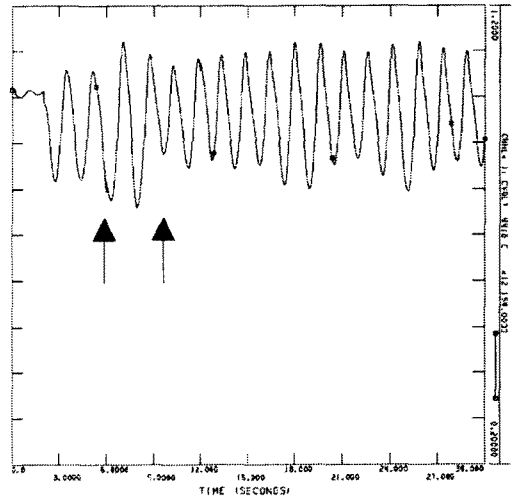


그림. 7 부하차단 시 전압 파형

#### 4.2 강원, 충청 지역 (area 4, 5)

강원, 충청 지역은 수도권과 달리 부하는 작지만 상대적으로 발전소가 적어서 전체적으로 전압이 낮은 지역이다.

수도권 지역에서는 가장 심각한 상정 사고는 765kV 선로의 탈락인데 반해, 강원, 충청 지역은 상대적으로 적은 발전기의 탈락의 경우가 가장 심각한 상정사고이다.

그림. 8에 이 둘을 비교하였는데, case0는 아무런 사고가 없는 경우이고, case1은 765kV 선로가 탈락된 경우이며, case2는 발전소가 하나 탈락된 경우이다. (이 경우는 영흥발전소, #23251이 탈락된 경우이다.) 발전소가 탈락된 경우가 더 큰 상정사고임을 알 수 있다.

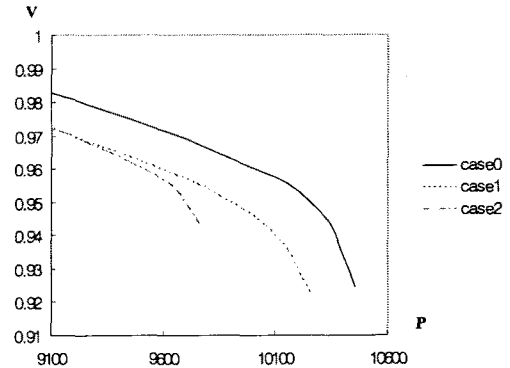


그림. 8 여러 경우의 PV 곡선

그림. 9에 저전압 기준치를 구하는 과정을 도시하였다. 최악의 상정사고 시 불안정해지는 점은 9,755MW이다. 여기에 3%의 여유도를 주면 9,462MW(=9,755×0.97)이며 이 때 전압은 약 0.96p.u. 정도이다.

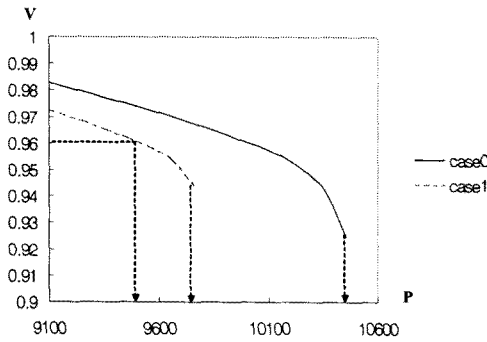


그림. 9 저전압 기준치 선정

PV 곡선으로부터 구한 저전압 기준치를 검증해보기 위하여 동적 모의를 수행한다. 태안 발전소가 탈락되고 인근의 선로가 추가로 탈락된 경우 그림. 10과 같은 불안정 현상이 나타난다.

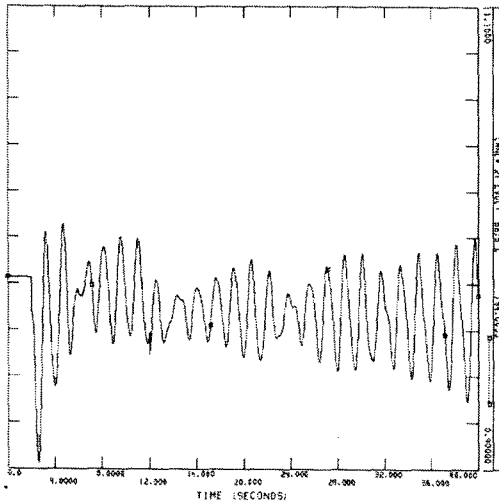


그림. 10 저전압 현상

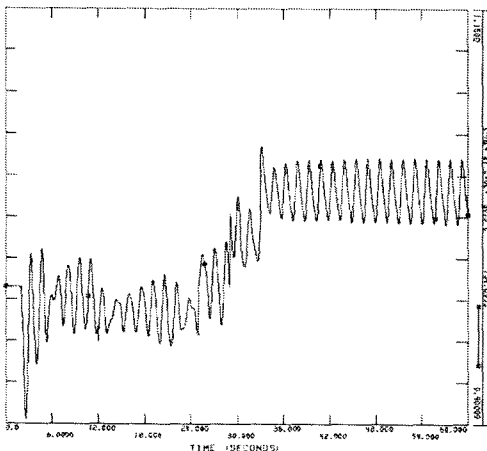


그림. 11 부하 차단 후 전압 파형

이러한 불안정 현상을 개선하기 위하여 부하차단을 시행하여야 하는데, 모의 결과 시지연 4초를 주고 15%씩 두 번의 부하 차단으로도 충분히 안정화되지 못하여 10%의 부하를 더 차단하여서 불안정 현상을 억제할 수 있었다. 이 경우도 완전히 안정화되지 못하고 비교적 작은 진폭의 진동을 계속하므로 부하차단과 더불어 다른 제어 동작도 같이 해주는 것이 더 효과적일 것이다. 여러 가지 모의 결과, 단일 사고의 경우는 부하차단만으로도 어느 정도 안정화를 시킬 수 있지만, 여러 선로의 다중 사고인 경우는 부하차단만으로는 전압 스윙을 완전히 억제할 수는 없어 보인다.

## 5. 결 론

전압 불안정 현상이 발생한 경우 이를 해결하기 위해 저전압 부하차단을 시행할 수 있다. 저전압 부하차단에 가장 중요한 변수인 저전압 기준치와 시지연을 결정하기 위한 기법을 제안하였다. 최악의 상정사고를 고려한 PV 곡선으로부터 저전압 기준치를 결정하고 이를 바탕으로 동적 모의를 수행하여 시지연값을 결정하는 방식을 택하였다. 단일 사고의 경우는 부하차단이 효과적이지만 다중 사고인 경우는 추가적인 제어 협조가 필요한 것으로 보인다.

## [참 고 문 헌]

- [1] NERC(North America Electric Reliability Council) / WECC(Western Electricity Coordinating Council) Planning Standards, September 1997
- [2] Under Voltage Load Shedding Guidelines, July 1999, Under Voltage Load Shedding Task Force(UVLSTF), Technical Studies Subcommittee, Western Systems Coordinating Council
- [3] Abbas M. Abed, "WSCC Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology", Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999, Vol. 1, 18-22, July, 1999
- [4] C. Moors, D. Lefebvre and T. Van Cutsem, "Design of Load Shedding Schemes against Voltage Instability", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2000, Volume. 2, pp.1495-1500, 2000
- [5] Arthur R. Bergen, "Power Systems Analysis", PRENTICE-HALL, INC. 1986
- [6] Thierry Van Cutsem and Costas Vournas, "Voltage Stability of Electric Power Systems", Kluwer Academic Publishers, 1998  
Sacramento Area Undervoltage Load Shedding Study-1998 Study Report, Sacramento Valley Study Group (SVSG), July 1998
- [7] Carson W. Taylor, "Voltage Stability Analysis with Emphasis on Load Characteristics and Undervoltage Load Shedding", IEEE/PES Summer Meeting, Long Beach, CA, July 10, 1998
- [8] Carson W. Taylor, "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.7, No. 2, pp. 480-488, April, 1992
- [9] Abed, A., "WSCC Voltage Stability Criteria, Undervoltage Load Shedding Strategy and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, pp. 191-197, 1999
- [10] Z. Feng, V. Ajjarapu and D. J. Maratukulam, "A Practical Minimum Load Shedding Strategy to Mitigate Voltage Collapse", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 13, no. 4, pp. 1285-90, 1998