

부하차단 방안 연구

오창수, 이백석, 전영환, 이강완

한국전력거래소, 한국전력공사, 홍익대학교, (주)대화기술사

A Study on the Load Shedding Scheme

Chang-Soo Oh, Back-Seok Lee, Yeong han Chun, Kang Wan Lee
Korea Power Exchange, KEPCO, Hongik Univ., DAEHWA Engineering

Abstract - 저주파수 부하차단 방안은 발전기 탈락 또는 송전선로 개방과 같은 사고에 대처하는 좋은 안정화 대책이다. 전력계통 규모와 구성 형태에 따라 그에 적합한 부하차단 방안이 있다. 전력계통의 규모 확대와 구성의 복잡화는 저주파수계전기에 의한 부하차단 만으로는 계통 안정화에 한계가 있어 저전압계전기에 의한 부하차단이 필요하다. 본 논문은 부하차단 방안을 정하는 방법을 제시하고 그 결과의 적정성 확인 및 저전압계전기에 의한 부하차단 방안을 과도안정도 해석 프로그램으로 검토 및 분석한 사례다.

1. 서 론

부하차단은 발전과 수요 간의 과도한 불균형으로 계통 주파수가 저하되어 전력계통이 불안정 상태로 가는 것을 방지하는 안정화 대책이다. 우리나라 전력계통 부하차단은 주파수 58.8Hz에서 57.8Hz까지 0.2Hz 간격으로 6단계 부하차단을 적용하고 있으며 저주파수계전기 오동작을 방지하기 위한 시간지연(Time delay)은 0.1초로 되어 있다. 후비용으로는 58.8Hz 이하에서 시간지연 12초를 적용하고 있다. 부하차단은 전체 부하의 41%가 단계별로 차단되도록 적용하고 있다.

계통에 연계되어 있는 터빈발전기 수명을 위해 그리고 신속한 계통 안정화를 위해서는 부하차단 검출 주파수를 상향 조정할 필요가 있으며 저주파수계전기 간의 협조를 위해서는 부하차단 단계별 주파수 간격이 충분히 벌어져 있는 상태가 바람직하다.

과도안정도 해석 프로그램은 발전기 제어계를 포함하여 부하 특성까지도 고려되는 전력계통의 시간적 동특성을 모의하는 도구다. 과도안정도 해석 프로그램을 이용하여 부하차단의 적정성 등을 분석할 수 있다.

2. 본 론

2.1 비정상주파수(Abnormal frequency) 운전한계

전력계통은 여러 가지 요인에 의하여 전기적 사고가 불가피하게 발생한다. 발전기 탈락 또는 송전선로 개방과 같은 발전과 수요의 불균형을 나타내는 사고는 계통 주파수를 저하시켜 전력계통의 안정 운영을 위협하게 된다. 전력계통에서 주파수가 규정 범위를 벗어난 상태로 운전하게 되면 전력을 사용하는 수용가에 나쁜 영향을 미치게 되고 전력 공급자 측에게는 터빈 발전기 수명을 단축하게 된다. 즉 비정상 주파수 운전의 경우 터빈발전기 회전체에 진동이 발생한다. 이와 같이 터빈발전기 측에 진동이 발생하면 터빈 날개에 스트레스를 가하게 되며 심한 경우는 진동이 터빈 공진 속도에 근접하여 터빈 날개를 손상시킨다.

미국규격협회/전기·전자통신학회(ANSI/IEEE)에서는 비정상주파수 보호지침을 C37.106-1987로 제시하여 터빈발전기 제작자들이 이 지침에 따라 터빈발전기를 제작하

도록 규정하고 있다.

표 1 터빈발전기 주파수 대 운전 최대허용시간

저주파수 한계[Hz]	고주파수 한계 [Hz]	운전최대 허용시간
60.0-59.5	60.0-60.5	연속 운전범위
59.4-58.5	60.6-61.5	3분
58.4-57.9	61.6-61.7	30초
57.8-57.4		7.5초
57.3-56.9		45사이클
56.8-56.5		7.2사이클
56.4이하	61.7 이상	즉시정지

표 1은 ANSI/IEEE에서 비정상주파수 보호지침 C37.106-1987로 제시한 터빈발전기 주파수 대 운전 최대 허용시간을 나타낸 것으로 연속 운전 주파수 대역은 59.5Hz에서 60.5Hz 까지다. 따라서 전력계통에 연계되어 운전되는 발전기 비정상주파수 운전 보호는 여기에 나타난 저주파수 및 운전 허용 시간을 고려하여 결정한다.

2.2 외국 전력계통 부하차단 방안

해외 전력계통 부하차단 방안 및 운영 실태는 전력계통의 구성 특징 및 규모에 따라 각각 다른 형태를 나타낼 수 있다. 전력계통 연계 규모가 매우 방대한 북미 전력계통 WSCC 59.1Hz, NPCC 59.3Hz, ERCORT 59.3Hz 및 ECAR 59.5Hz에서부터 부하차단이 시작되고 서유럽 전력계통인 UCTE 경우 49.0Hz부터 부하차단이 시작된다. 우리나라와 같은 단독 계통인 대만 전력계통도 59.5Hz에서 부하차단이 시작 된다. 표 2는 대만 전력계통 부하차단 방안을 요약한 것이다.

표 2 대만 전력계통 부하차단 방안

단계	계전기 정정 [Hz]	차단부하 [%]
1단계	59.5	4.5
2단계	59.2	7.5
3단계	58.9	7.5
4단계	58.7	7.5
5단계	58.5	3.0
합계		30.0

여기에 비하여 우리나라 전력계통 저주파수 부하차단은 58.8Hz에서 57.8Hz까지로 상대적으로 검출 주파수가 낮은 편이다.

2.3 저주파수 부하차단 방안

부하차단 방안을 검토하기 위한 전력계통은 2005년을

기준하여 최대부하수준 54,000MW와 최저부하수준 35,700MW를 가정하였다. 전력계통 발전력 부족으로 인하여 계통 주파수가 저하되는 특징은 등가관성정수 및 부하민감도와 같은 계통 특성정수가 매우 중요 변수로 작용한다. 관성정수 H는 발전기 및 원동기 회전 운동에 너지로 관성정수가 작으면 발전과 수요 불균형 발생시 가속이 크게 되어 상차각 변동이 증가하여 안정도 면에서 불리한 반면 관성정수가 크면 상차각 변동속도가 느려져 계통 주파수 변화속도도 둔화되어 안정도 측면에서 유리하다. 본 논문에서 기기등가관성정수 H는 한국전력에서 사용하는 값 4.53(%MW·Sec/MVA)를 이용한다.

$$\text{기기등가관성정수 } H = \frac{\sum \%MW \cdot \text{Sec}}{\sum \text{Rated MVA}}$$

여러 대의 발전기들에 연계되어 운영되는 전력계통의 계통등가관성정수는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} & \text{계통등가관성정수} \\ &= \text{기기등가관성정수 } H \times \frac{\text{총 MVA}}{\text{총 발전 MW}} \end{aligned}$$

부하민감도 d는 주파수 변화에 따른 부하 소비전력 변화 상관관계이다. 이 값은 1970년 이전까지는 주로 d=2를 사용하였으나 시험에 의해 보다 작은 값이 정확한 것으로 판명되어 오늘날에는 d=1.5를 사용한다.

전력계통에서 발전과 수요 간의 불균형이 발생하면 이에 대한 주파수 변화는 다음과 같다.

주파수 변화

$$\Delta f = \frac{\Delta p}{D} (1 - e^{-\frac{Dt}{M}}) \quad (1)$$

여기서

Δf : 주파수변화 (p.u)

$$\Delta p = \frac{\text{발전} - \text{부하}}{\text{발전}} \quad (2)$$

$$D = d(1 - \Delta p) + \Delta p \quad (3)$$

H: 계통관성정수, M=2H

계통주파수 변화 Δf 에 요구되는 시간은 다음과 같이 계산된다.

$$t = \frac{-M}{D} \ln(1 - \frac{D\Delta f}{\Delta p}) \quad (4)$$

최대수요 : 54,000 MW

최저수요 : 35,700 MW

발전기 탈락 : 9,000 MW

최대수요기기 MVA : 62,100 MVA

최저수요기기 MVA : 44,600 MVA

발전기 탈락 MVA : 10,000MVA

운전허용최저주파수 : 57.7 Hz

운전허용최저주파수는 울진원자력 1,2호기 저주파수계전기 정정 값이 57.7Hz로 되어 있는 것을 고려한 것이다.

발전과 수요가 상대적으로 가혹한 경우를 고찰하기 위해 최저부하수준 상태를 검토한다.

최저부하수준 계통등가관성정수

$$H = 4.53 \times \frac{44,600 - 10,000}{35,700 - 9,000} = 5.87 (\%MW \cdot \text{Sec}/MVA)$$

과부하율 Δp

$$\Delta p = \frac{\text{Gen} - \text{Load}}{\text{Gen}} = \frac{26,700 - 35,700}{26,700} = -0.34 \text{ p.u.}$$

초기주파수저하율

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2H} = \frac{-0.34}{2 \times 5.87} = 0.029 \text{ p.u./s}$$

$$-0.029 \times 60 \text{ Hz} = -1.74 \text{ Hz/s}$$

주파수 감소 Δf 를 계산할때 식(1)에서 t를 무한대로 두면 다음과 같이 간략화 된다.

$$\Delta f = \frac{\Delta p}{D}$$

윗 식으로부터 운전허용최저주파수를 57.7Hz로 가정하여 과부하율 Δp 를 구하면

$$\Delta p = \Delta f (D)$$

$$\Delta f = 60 - 57.7 = 2.3 \text{ Hz}$$

$$2.3/60 = -0.0383 \text{ p.u.}$$

D는 식(3)으로부터

$$D = 1.5 [1 - (-0.34)] + (-0.34) = 1.67 \text{ p.u.}$$

따라서

$$\Delta p = -0.0383 \times 1.67 = -0.064 \text{ p.u.}$$

발전기 탈락으로 나타난 과부하 -0.34p.u.는 운전허용최저주파수를 57.7Hz로 제한할 경우 -0.064p.u.만큼 감소한다. 즉,

$$-0.34 - (-0.064) = -0.276 \text{ p.u.}$$

이를 잔유 발전력으로 환산하면

$$26,700 \times (-0.276) = 7,369 \text{ MW}$$

이를 다시 원래 부하에 대해 환산하면

$$\frac{7,369}{35,700} \times 100 = 20.6$$

앞에서 제시한 것과 같이 9,000MW 발전탈락에 대해 20.6% 부하차단이 요구되지만 확실한 주파수 회복이 보장될 수 있도록 탈락량 보다 많은 26% 부하차단이 권장된다.

부하차단은 가능하면 비정상주파수 운전을 최소화 할 수 있도록 59.2Hz부터 58.3Hz까지 4단계 부하차단으로 하고 각 부하차단 단계는 0.3Hz 차를 두고 1단계부터 3단계까지는 각각 6% 부하차단으로 마지막 4단계는 나머지 8% 부하차단을 가정하여 검토한다.

초기 주파수저하율은 -1.74Hz/s 이므로 계통 정상주파수 60Hz에서 운전허용최저주파수 57.7Hz까지 도달하는 시간은 2.3Hz/1.74Hz/s = 1.31s 이다.

저주파수계전기 시간지연(Time delay)은 디지털형태 계전기로 구현 될 수 있는 최소시간 0.1초로 가정하고, 저주파수계전기가 저주파수를 검출하여 차단기에 차단신호를 전달하여 해당 차단기가 개방될 때까지 소요시간은 0.1초로 가정하였다.

- 1단계(59.2Hz) 저주파수계전기 시간지연 및 차단기 개방 시간을 고려한 부하차단 시간 T1

$$T1 = \frac{(60 - 59.2) \text{ Hz}}{1.74 \text{ Hz/s}} + 0.1 + 0.1 = 0.65 \text{ s}$$

- 2단계(58.9Hz) 저주파수계전기 부하차단 시간 T2는 우선 식(4)로부터 t2=0.66s가 구해지고

$$T2 = 0.66 + 0.1 + 0.1 = 0.86 \text{ s}$$

1단계 부하차단이 실행된 시간 T1(0.65초)에서 계통주파

수 F1은 $60 - (1.74\text{Hz/s} \times 0.65\text{s}) = 58.87\text{Hz}$ 가 된다.

1단계 부하차단이 완료된 T1(0.65초)에서 주파수변화율이 변하여 새로운 주파수저하율이 2단계 부하차단 완료 시점 T2(0.86초)까지 계속된다. 우선 1단계 부하차단 다음의 과부하율을 구하면

$$\Delta p = -0.257p.u.$$

$$D = 1.6285$$

T2(0.86초)에서 주파수는 식(1)을 이용하여 계산하면

$$\Delta f = -0.00453p.u.$$

$$-0.00453 \times 60 = 0.272\text{Hz}$$

$$F2 = 58.87 - 0.27 = 58.6\text{Hz}$$

앞에서와 같은 방법으로 각 부하차단 단계별 부하차단 시간과 이때 계통주파수를 계산하면 표3과 같이 된다.

표 3 부하차단 계산 결과

단계	정정치(Hz)	부하차단		
		시간(초)	주파수(Hz)	차단부하(%)
1	59.2	0.65	58.87	6
2	58.9	0.86	58.60	6
3	58.6	1.06	58.42	6
4	58.3	1.52	58.20	8
		2.52	58.25	

부하차단의 최종 단계인 4단계(58.3Hz)는 1.52초에 완료된다. 이로부터 1초 후 즉, 2.52초에서 계통주파수를 계산한 결과 58.25Hz가 되어 주파수가 상승되고 있는 상태를 보여준다.

2.4 부하차단 방안 동특성 모의

과도안정도 해석 프로그램은 전력계통의 구성, 발전기 특성, 조속기, 여자기 및 안정화설비 등의 제어 특성과 부하의 동특성 등이 고려되는 전력계통의 시간적 동특성을 규명하는 도구다. 이를 이용하여 주어진 전력계통의 수급 불균형에 대한 계통주파수 변화를 모의할 수 있다.

발전과 수요 불균형 사례는 원자력발전소 발전기 탈락 모의하였으며 전력 수요는 앞에서 제시한 35,700MW를 가정하였다.

표 4 발전기 탈락 안정도 해석 결과

발전기 탈락			안정도 해석 결과	
탈락 대수	탈락[MW]	과부하 Δp [%]	기존 방안	새로운 방안
1	950	2.73		
2	1975	5.86		1단계부하차단
3	2950	9.01	1단계부하차단	1단계부하차단
4	3957	12.47	전압불안정	전압불안정
5	4992	16.26	전압불안정	전압불안정
6	6030	20.32	전압불안정	전압불안정

안정도 해석 결과 발전기 4대 이상 탈락할 경우 기존 및 새로운 부하차단 방안 공히 전압 불안정 상태가 되었다.

그림 1은 기존 부하차단 방안을 적용한 발전기 탈락 고장을 모의한 결과 모든 154kV 모선 주파수를 나타낸 것이다. 발전기 1대 또는 2대 탈락의 경우는 부하주파수 특성 및 발전기 제어에 따라 주파수가 정상으로 회복된다. 발전기 3대 탈락의 경우는 1단계 부하차단으로 계통주파수가 정상으로 회복하고 있다. 반면에 발전기가 4대 이상 탈락하면 전압 저하로 전압 불안정 상태가 되어 이

를 표시하지 않았다.

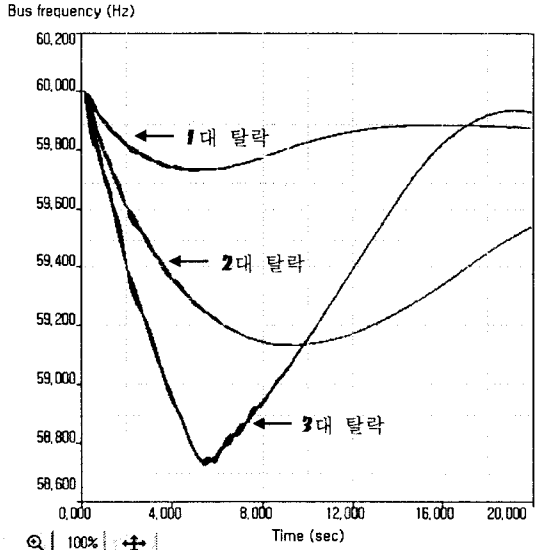


그림 1 기존 부하차단 방안 적용 154kV 모선 주파수

그림 2는 새로운 부하차단 방안을 적용한 발전기 탈락 사고 동특성 모의 결과 154kV 모선전압을 나타낸 것이다. 여기서는 발전기 2대 이상 탈락시 부하차단이 일어나고 있다. 저주파수 검출을 상향 조정한 새로운 방안의 경우 비정상주파수 운전 시간이 짧고, 신속한 정상 주파수로 복귀되어 안정도를 향상시킬 수 있는 장점이 있는 반면, 더 많은 부하차단으로 전력 공급 신뢰도를 저하시키는 단점이 있다.

새로운 부하차단 방안 적용에서도 발전기가 4대 이상 탈락하면 전압 저하로 전압 불안정 상태가 되어 이를 표시하지 않았다.

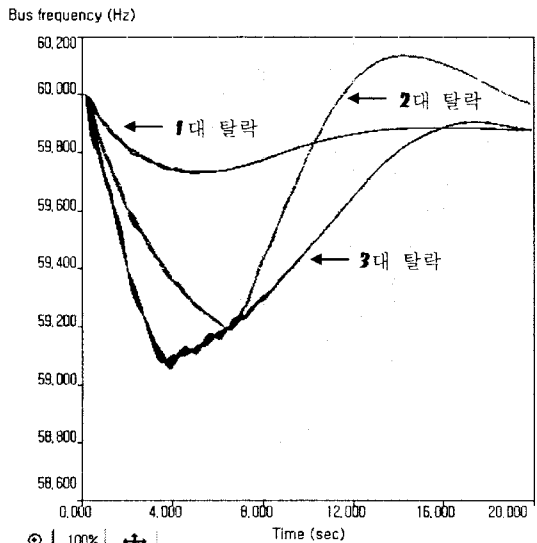


그림 2 새로운 부하차단 방안 적용 154kV 모선 주파수

그림 3은 발전기 4대 탈락시 154kV 모선전압을 나타낸 것이다. 우리나라 남서부에 위치한 발전기 탈락시 영동지역 무효전력 부족으로 과도한 전압강하가 발생하여 영동지역 전압 불안정 상태가 나타났다.

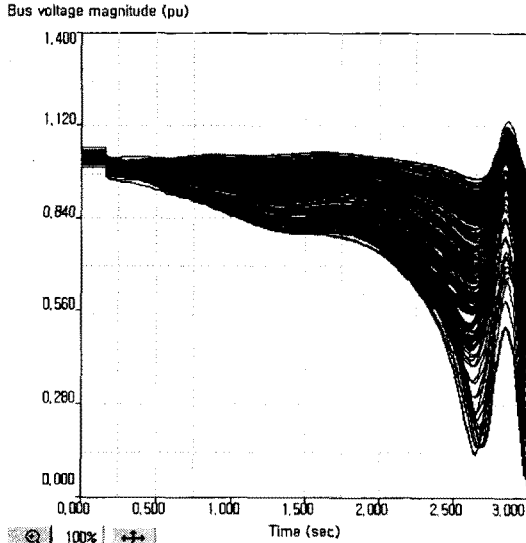


그림 3 발전기 4대 탈락시 154kV 모선전압

전압 불안정 상태를 대처할 수 있도록 저주파수계전기에 의한 부하차단에 다음과 같은 2단계 저전압계전기 부하차단 방안을 추가하여 모의하였으며 저전압계전기 검출로부터 차단기 개방까지 0.1초가 소요되는 것으로 가정하였다.

- 1단계 전압: 0.90p.u., 시간지연: 0.2초, 부하차단: 30%
- 2단계 전압: 0.85p.u., 시간지연: 0.3초, 부하차단: 20%

그림 4 는 새로운 저주파수 부하차단 방안에 저전압계전기 부하차단 방안을 추가하여 모의한 결과 154kV 주파수를 나타낸 것이다. 즉, 저전압계전기 부하차단 방안을 적용함으로써 보다 안정된 전력계통 운영이 가능한 것으로 나타났다.

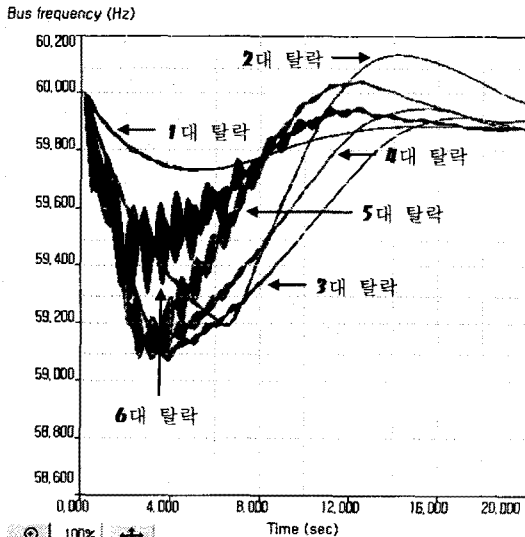


그림 4 저전압 부하차단 방안 적용 154kV 모선 주파수

그림 5 는 발전기 4대 탈락시 154kV 모선전압을 나타낸 것으로 저전압계전기에 의하여 부하차단이 이루어져 전압이 안정 상태로 복귀한 것을 보여준다.

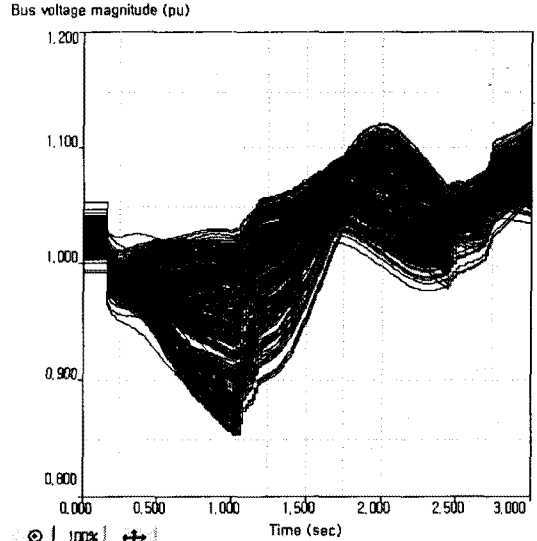


그림 5 발전기 4대 탈락시 154kV 모선전압(UVR 적용)

3. 결 론

전력계통에서 59.5Hz이하 비정상주파수 운전 시간은 짧을수록 좋다. 저주파수계전기에 의한 부하차단 방안에서 정정값을 상향 조정하게 되면 비정상주파수 운전시간이 단축되고 안정도면에서도 유리하다.

발전과 수요가 지역에 따라 편중되어있는 상황에서 발전기 탈락 또는 송전선로 개방과 같은 사고 발생시 저주파수계전기에 의한 부하차단 만으로는 계통 안정화에 한계가 있다.

전력계통 안정도를 향상시키기 위해서는 저전압계전기에 의한 부하차단이 필요한 실정이다. 실계통에 저전압계전기 부하차단을 적용하기 위해서는 지속적인 연구 검토가 있어야 된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이강환, 배주천, 조범섭, 오화진, "TSAT을 이용한 우리나라 계통의 저주파수 부하차단 방식 검토", 대한전기학회 전력기술부문회, 2003년도 추계 학술대회논문집, pp34-37, 2003. 11
- [2] 류성호, 이강환, 김광원, 황갑주, "전력시장에서의 적정 운영 예비력 기준에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 52권, 5호, 2003.5
- [3] P.Kunder, "Power System Stability and Control", McGraw - Hill, 1993
- [4] P.M. Anderson, "Power System Protection", McGraw - Hill, 1999
- [5] Berdy, J., "Load Shedding Application Guide", General Electric Trans, 1968