

## 제주계통 UFR LOAD SHEDDING 적용방안에 관한 고찰

양정재, 이성진, 김재호  
한국전력거래소

### Consideration on The UFR Load Shedding Scheme in JEJU Power System

Jeong-Jae Yang, Sung-Jin Lee, Jae-Ho Kim  
Korea Power Exchange

**Abstract** - 제주계통은 계통규모에 비해 전원용량이 큰 HVDC 제주연계선과 단위기 용량이 큰 발전기들이 운전되고 있다. HVDC 2회선 동시 탈락이나, HVDC 미운전시 단위기 용량이 큰 발전기가 전력계통에서 탈락하면 제주계통 주파수는 급격히 저하되고 적절한 보호대책을 수립하지 않으면 전 계통 붕괴가 일어날 수도 있다. 본 논문은 저주파수 계통에 의한 부하차단방식 적용시 고려하여야 할 조건과 제주계통 저주파수계통에 의한 부하차단방식에 관해 기술하였다.

제주수요의 20%의 부하를 차단한 후 주파수가 회복되는 것을 볼 수 있다. 그림2는 그림1과 같은 계통수요 조건에서 HVDC 제주연계선 미운전시 남제주T/P #3호기 100MW 탈락을 LSD프로그램으로 모의한 결과를 나타낸 그래프다

### 1. 서 론

전력계통에서 전력수급 불균형이 발생하면 계통주파수의 저하 또는 상승을 초래하게 된다. 특히 대용량 발전기 탈락이나 계통분리에 따른 과도한 주파수 저하는 전력계통 안정운전을 저해할 뿐만 아니라 적절한 조치를 신속하게 취하지 않으면 전 계통 붕괴를 초래할 수도 있다. 또한 주파수 변화는 주파수에 민감한 전동기 부하의 회전속도를 느리게 하여 불량제품이 발생하는 등 산업전반에도 나쁜 영향을 미치게 된다. 이러한 문제점에 대한 대책으로 주파수가 일정치 이하로 저하하면 일정량의 부하를 자동으로 차단하여 계통주파수를 조속히 회복시켜 안정적인 계통 운영이 가능하도록 하는 저주파수 부하차단방식을 대부분의 전력회사에서는 적용하고 있다. 본 논문에서는 제주계통의 주파수 특성을 고려한 제주계통 UFR Load Shedding(UFRLS) 방식에 대해 기술하고자 한다.

### 2. 본 론

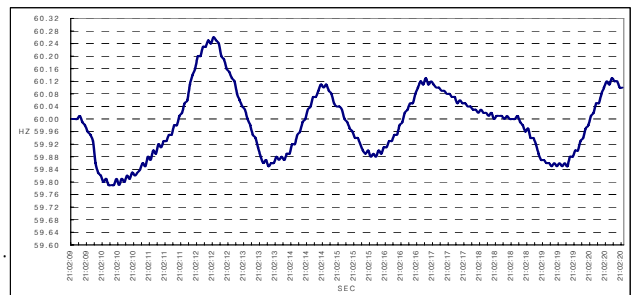
#### 2.1 제주계통 주파수 특성

제주계통은 계통규모가 작은 반면 단위기 용량이 큰 발전기들이 운전되고 있을 뿐 만 아니라 제주수요의 50%(또는 150MW)에 해당하는 전력을 HVDC 제주연계선을 통해 공급하고 있다.

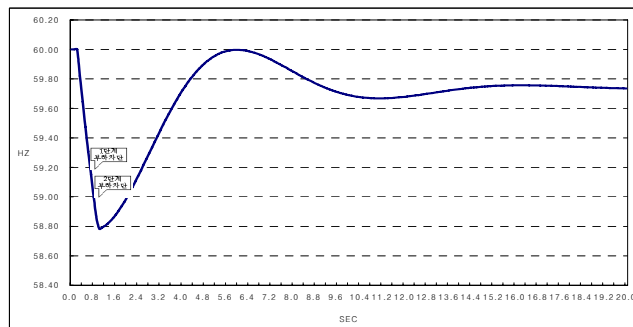
**<표 1> 제주계통 발전설비 및 계통수요 현황('07.5기준)**

발전설비현황		계통수요 (최대 '07예상)
발전기명	공급용량	
제주기력#1	10MW×1	548MW
제주기력#2,3	75MW×2	
제주내연#1	10MW×1	
제주G/T#3	55MW×1	
남제주기력#1,2	10MW×2	
남제주기력#3,4	100MW×2	
남제주내연#1~4	10MW×4	
한림복합	35MW×3	
제주연계선	77.5MW×2	
신재생	18.649MW	
계	763.649MW	

HVDC 제주연계선이 운전 중에는 단위기 용량이 큰 발전기가 탈락하더라도 HVDC 연계선의 주파수 추종성이 빠르므로 주파수 저하정도가 작을 뿐 만 아니라 주파수 회복도 신속하게 이루어져 UFR에 의한 부하차단이 발생하지 않는다. 그림1은 계통수요 405.9MW에서 HVDC 제주연계선 운전중 남제주T/P #3호기 100MW 탈락(과부하율 32.7%)시 주파수 저하 실적그래프로 최저주파수는 59.79HZ까지 저하하고 부하차단 없이 신속히 주파수가 회복되는 것을 볼 수 있다. 그러나 HVDC 제주연계선이 미운전 중에 100MW의 발전기가 탈락하게 되면 그림2에서 보는 바와 같이 최저 주파수는 58.78HZ까지 저하하고 UFR 2단계 동작으로



**<그림 1> HVDC 연계선 운전중 남제주T/P #3호기(100MW)탈락시 주파수 실적그래프**



**<그림 2> HVDC연계선 미운전 중 남제주T/P #3호기(100MW) 탈락시 주파수 모의결과**

이상에서 살펴 본 바와 같이 제주계통의 주파수 저하 특성은 HVDC 연계선 운전여부에 따라 큰 차이가 있는 것을 알 수 있다.

#### 2.2 제주계통 주파수 저하 사례

2000년 이후 HVDC 제주연계선 탈락 또는 발전기 탈락에 의해 주파수가 저하하여 UFR 동작으로 부하를 차단한 사례는 총 26건으로 주요 고장내용은 표2와 같다.

**<표 2> 발전력 탈락에 의한 UFR 부하차단 현황**

일시	원인	수요 (MW)	탈락발 전력 (MW)	최저주파수 (Hz)	부하차단 (MW)
06.04.01	HVDC2회선, 제주내연 탈락	348	195 (56%)	전 계통 정전	5단계 (169.2MW)
04.06.28	HVDC2회선 Trip	323	149 (46%)	58.05HZ	4단계 (144.5MW)
00.08.07	HVDC2회선 Trip	301	150.5 (50%)	57.96HZ	4단계 (117.9MW)
00.10.23	북제주#3호기 Trip	213	71.5 (33%)	58.2HZ	3단계 (61.33MW)

### 2.3 UFR 부하차단방식 결정시 고려사항

저주파수계전기에 의한 부하차단 방식을 검토할 때 다음의 사항들을 고려하여 부하차단방식을 결정한다.

#### 2.3.1 허용 최저 주파수

터빈은 연속 운전주파수를 벗어나면 수명이 단축되고 기기 손상을 초래할 수 있다. 따라서 주파수 저하에 의한 터빈 손상을 방지하기 위해 주파수가 일정치 이하로 저하하면 저주파수계전기에 의해 터빈을 Trip시키도록 되어 있다. 그러므로 저주파수계전기에 의한 부하차단 방식 적용시 고려할 최저주파수는 발전기 저주파수계전기 정정치를 고려하여 선정한다. 표3은 제주계통 발전기 저주파수계전기 정정현황이며, 발전기 Trip UFR 정정치 57.5HZ 3sec를 고려하여 제주계통 UFR 부하차단 방식 적용에서 고려할 최저주파수는 57.5HZ에서 1.5sec 이상 지속되지 않도록 하고, 순시 저하 제한치는 57.0HZ 이상으로 한다.

<표 3> 발전기 UFR Setting 현황

발전기명	UFR Setting	
	TAP(HZ)	TIME(SEC)
남제주T/P 기력#1,2 한림복합 GT, ST	57.5	3
제주T/P 기력#1~3	57.5	10
제주T/P 내연#1	57.0	4
남제주T/P 기력#3,4	56.3	0.1

#### 2.3.2 최종회복 목표 주파수

부하차단 후 최종회복 목표 주파수는 터빈 연속운전 주파수를 고려하여 결정한다. 또한 문헌에 의하면 주파수가 59.0HZ 이하에서는 발전기 보조기기들의 회전력 감소로 보조기기의 출력이 저하되고 이로 인해 발전기 출력이 저하하는 현상이 발생할 수 있다. 표4는 터빈 제작사별 주파별 운전시간을 나타낸 것이다.

<표 4> 터빈 제작사별 주파수 운전한계

발전기	터빈 제작사	한계주파수	운전허용시간
제주T/P G/T#1,2,3	UTI	58.0~60.2 58.0~57.5, 60.2~61.3 57.5~57.0, 61.3~62.3 57.0~56.5, 62.3~63.0	연속운전 80분/회 28분/회 10분/회
한림복합 G/T, S/T	G.E	59.4~60.6 59.4~58.8, 60.6~61.2 58.8~58.2, 60.6~61.8 58.2~57.6, 61.8~62.4	연속운전 누계 90분/년 누계 12분/년 누계 1분/년
남제주T/P 기력#1,2 제주T/P 기력#1	FUJI	58.2~61.8 58.2~57.6 57.6~57.0	연속운전 20분/회(누계120분/년) 10분/회(누계60분/년)
남제주T/P 기력#3,4	MELCO	58.8~61.5 58.5~56.3, 61.5~63.2 56.3~56.2 63.2~63.3 56.2~56.1, 63.3~63.4	연속운전 연속운전가능 누적15분/Life 누적3분/Life 누적1분/Life

따라서 발전기 연속운전 주파수를 고려하고 또한 주파수 저하에 의한 발전기 출력저하 주파수를 고려하여 부하차단 후 최종 주파수 회복 목표는 59.0HZ 이상으로 한다.

#### 2.3.3 최초 부하차단 주파수

최초 부하차단 주파수는 원칙적으로 주파수 저하에 대해 계통에서 스스로 회복가능 한 주파수보다 낮아야 하고 또한 기기들이 연속운전 가능한 주파수 보다 낮게 설정하여야 한다. 제주계통은 HVDC 연계선이 주파수 모드로 운전 중에 발전기가 탈락하는 경우는 주파수 저하가 크지 않으나 작은 계통규모 및 제주자체 발전기의 주파수 조정에비려 부족상태에서 HVDC 연계선이 탈락하거나 또는 HVDC 연계선 미 운전 중에 단위기 용량이 큰 발전기가 탈락하는 경우는 주파수 저하 폭이 크고 주파수 회복이 늦어진다. 따라서 최초 부하차단 주파수는 HVDC 연계선 1회선 탈락으로 나머지 한 회선으로 절제되는 동안 부하차단이 발생하지 않는 주파수와 주파수 조기회복을 위하여 59.2HZ를 최초 부하차단 주파수로 고려할 수 있다.

#### 2.3.4 최대 과부하율

제주계통의 최대 상정고장은 HVDC 2회선 동시 탈락을 고려할 수

있다. 그러나 '06.4.1 제주계통 전정전 발생시 HVDC 2회선 및 제주내연 발전기 동시 정지고장이 발생한 사례가 있으므로 최대 과부하율은 HVDC 2회선150MW 및 제주내연 40MW 동시 Trip을 고려하고 계통수요는 경부하지 수요를 고려하여 350MW를 고려하여 과부하율을 계산한다.

$$\text{Overload} = \frac{\text{Load} - \text{Remaining Generation}}{\text{Remaining Generation}} \times 100\% \\ = \frac{350\text{MW} - 160\text{MW}}{160\text{MW}} \times 100\% = 118.7\%$$

#### 2.3.5 최대 차단부하량

과부하율 118.7%, 주파수 변화량 Δf(HZ), 주파수 F(HZ)로 회복시키기 위한 최대 부하차단량은 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta f = f_0 \times \frac{O_L}{K(1 + O_L)} \times \left(1 - \epsilon^{-\frac{t}{\frac{2.4H}{K_L(1 + O_L)}}}\right) \text{-----①}$$

$$L_D = \frac{\frac{O_L}{1 + O_L} - K\left(1 - \frac{f}{f_0}\right)}{1 - K\left(1 - \frac{f}{f_0}\right)} \text{-----②}$$

- f<sub>0</sub> = 정격주파수(60HZ)
- f = 회복목표 주파수
- K = 계통주파수 특성정수(13.0%MW/HZ)
- O<sub>L</sub> = 과부하율(p.u)
- H = 관성정수(4.49MW.sec/MVA)
- t = 시간

식 ①, ②로 부터 과부하율 118.7%에서 계통주파수를 59.0HZ이상으로 회복시키기 위한 최대 부하차단량 계산값은 47.4%이나 각종 정수의 오차를 고려하여 실제 부하 차단량은 52%를 고려한다.

## 2.4 제주계통 UFR 부하차단방식 결정

### 2.4.1 부하차단 단계

부하차단 단계 수는 최대 부하차단량과 관계가 있다. 최대 부하차단량이 크면 클수록 부하차단 단계도 많아져야 한다. 일반적으로 부하차단 단계는 3~5단계로 하는 것이 협조상 편리하다. 그러나 제주계통의 경우 최대 부하차단량이 많은 점을 고려하여 부하차단 단계는 5~7단계를 고려하여 모의하고 모의 결과에 따라 차단단계를 결정한다.

### 2.4.2 단계별 부하차단 량

최초단계 부하차단 량은 제주계통 주파수 저하특성을 고려하여 결정한다. HVDC 미 운전시 제주계통 수요의 약 10%의 발전력이 탈락하면 최초단계 59.2HZ에서 부하차단이 발생한다. 따라서 최초단계에서 10%이상의 부하를 차단하게 되면 과 차단에 의해 과부하율이 발생할 수 있다. 그러므로 최초단계 부하차단량은 계통수요의 10%이하로 설정하고 다음 각 단계의 차단부하 배분은 차단단계 수에 따라 적절하게 배분하고 주파수 모의 프로그램을 이용하여 발전력 탈락을 모의하여 주파수 회복 결과에 따라 결정한다.

### 2.4.3 부하차단 시간

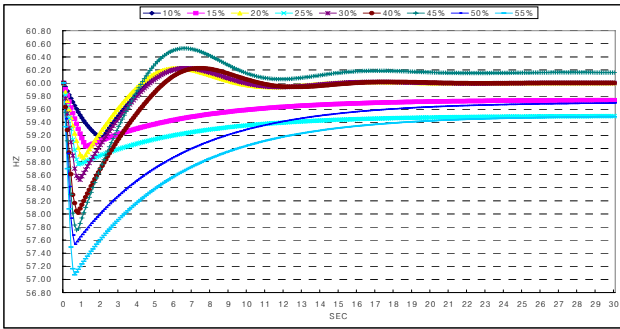
부하차단 시간은 차단단계별 협조에 별 문제가 없는 한 신속한 부하차단으로 주파수를 조기에 회복시키기 위해서 순시차단으로 한다. 그러나 계통의 과도적인 현상에 저주파수계전기가 오동작 하지 않도록 6~10HZ 지연시킨다.

## 3. 결 론

이상의 경우를 종합하여 Load Shedding Program으로 모의한 결과 제주계통의 저주파수계전기에 의한 부하 차단방식은 표5와 같이 설정하는 것이 가장 적합한 방식으로 나타났다. 표5의 부하차단방식을 적용하여 제주계통의 발전력 탈락에 대한 주파수 회복 모의 결과를 그림3에 도시하였으며, 55%의 발전력이 탈락하는 경우에도 최저 주파수 순시저하 제한치 57.0HZ이상으로 유지 가능하고 추가 발전기 탈락 없이 주파수 회복 목표치인 59.0HZ 이상으로 회복되는 것으로 확인 되었다. 그러나 모의 프로그램에서 적용한 각종 정수들의 오차나 계통조건 변경 등에 따라 55%의 전원이 동시에 계통에서 탈락하는 경우에는 모의와 같은 결과를 100% 보장하기는 어려울 것으로 판단된다. 따라서 주파수 변화율을 검출하여 부하를 차단하는 방식이나, WAMS 등과 같은 광역계통 보호시스템의 적용도 고려해 보는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

**<표 5> 제주계통 UFR 부하차단 방식**

단계	주파수 (HZ)	차단부하 (%)	지연시간 (HZ)
1	59.2	10	10
2	59.0	10	10
3	58.6	10	10
4	58.4	10	6
5	58.0	7	6
6	57.6	5	6
계		52%	



**<그림 3> 발전력 탈락률별 주파수 회복모의 결과**

**[참 고 문 헌]**

- [1] 전력거래소 수급조정팀, “’07년도 전력수급전망 및 대책”, 2007.04.04
- [2] 전력거래소 계통보호팀, “보호장치 동작상태 분석보고서” 2000년~2006년
- [3] General Electric Company Electric Utility Engineering Operation, John Berdy, “Load Shedding - An Application Guide”
- [4] 전력거래소 계통보호팀, “제주계통 저주파수계전기 부하차단방식 개선” 2006.06
- [5] 전력거래소, 전력연구원, “전력계통 안정도를 고려한 계통보호대책 연구”, 2003.12
- [6] 전력연구원, “Load Shedding Simulation Program”, 1993.9